

Международная ассоциация транспортных инженеров
При содействии А+S

Библиотека транспортного инженера

ОСНОВЫ ТРАНСПОРТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Практическое пособие

Санкт-Петербург
Коста
2015

УДК 519.1/[711.7+656.02]
ББК 22.18в6
О 75

Рецензенты:
В. С. Лукинский, д. т. н. (ВШЭ),
Ю. Г. Котиков, д. т. н. (СПбГАСУ)

О 75 **Основы транспортного моделирования: Практическое пособие /**
А. Э. Горев, К. Бёттгер, А. В. Прохоров, Р. Р. Гизатуллин (серия «Библиотека транспортного инженера»). — СПб.: ООО «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2015. — 168 с., ил.
ISBN 978-5-91258-343-8

В книге рассматривается комплекс вопросов, связанных с использованием транспортного моделирования при планировании и управлении транспортной системой городской агломерации. Основное внимание уделяется роли транспортного моделирования при транспортном планировании и изучении транспортных потоков. Последовательно рассматриваются все этапы транспортного моделирования: моделирование транспортного предложения, расчет матриц корреспонденций, распределение поездок по сети, калибровка модели и транспортное прогнозирование. Практический материал работы ориентирован на использование программного комплекса PTV VISUM — обширной и гибкой системы для транспортного планирования.

Книга представляет интерес для широкого круга читателей, занимающихся изучением и моделированием транспортных потоков, специалистов в области транспортного планирования, научных работников — инженеров, экономистов и математиков, а также аспирантов и студентов инженерных специальностей.

Книга предназначена для слушателей курсов повышения квалификации в области транспортного планирования и моделирования.

Табл. 19. Ил. 58. Библиогр.: 17 назв.

УДК 519.1/[711.7+656.02]
ББК 22.18в6

ISBN 978-5-91258-343-8

© Горев А. Э., Бёттгер К., Прохоров А. В., Гизатуллин Р. Р., 2015.
© Международная ассоциация транспортных инженеров, 2015.
© ООО «ИПК «КОСТА», оформление, 2015.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Транспортное планирование и моделирование	6
1.1. Основные термины и определения	6
1.2. Транспортные проблемы городов и основы транспортного планирования	7
1.3. Транспортные модели и особенности их применения в городах	21
1.4. Основы программного средства транспортного макромоделирования PTV VISUM	25
Глава 2. Транспортные потоки в городах	28
2.1. Характеристики транспортных потоков	28
2.2. Методы и алгоритмы сбора данных о транспортных передвижениях	49
Глава 3. Моделирование транспортного предложения	61
3.1. Описание транспортной сети	61
3.2. Структура исходных данных для транспортного моделирования	67
3.3. Транспортное районирование	70
3.4. Формирование матрицы затрат	76
Глава 4. Модели расчета матриц корреспонденций	82
4.1. Транспортная подвижность населения	82
4.2. Модели и методы генерации поездок	87
4.3. Модели и методы распределения поездок по транспортным районам	96
4.4. Модели и методы выбора вида транспорта	103
4.5. Методы прогнозирования поездок	109
Глава 5. Модели распределения поездок по сети	113
5.1. Модели распределения поездок на индивидуальном транспорте	113
5.2. Модели распределения поездок на общественном транспорте	121
5.3. Модели распределения поездок на грузовом транспорте	124
Глава 6. Калибровка моделей	128
6.1. Понятие и цели калибровки	128
6.2. Основные методы калибровки транспортных моделей	130

Глава 7. Транспортное прогнозирование	137
7.1. Прогнозирование социально-экономических показателей развития региона	137
7.2. Формирование сценариев прогноза	141
7.3. Учет влияния индуцированного транспортного спроса в моделях прогнозных лет	141
Глава 8. Транспортное моделирование в управлении транспортной системой	146
8.1. Система показателей качества проекта	146
8.2. Использование транспортной модели в структуре управления городом	151
8.3. Транспортная модель как инструмент устойчивого развития	159
Заключение	166
Список литературы	167

ВВЕДЕНИЕ

В условиях роста уровня автомобилизации существенно повышается значение сбалансированного использования ресурсов для эффективной организации дорожного движения. При этом на участках высокой интенсивности движения основной ресурс — земельный — является всегда дефицитным и одним из наиболее финансово емких. Современным инструментом сбалансированного использования ресурсов и является транспортное планирование.

Данная книга состоит из восьми глав, в которых рассмотрены следующие вопросы:

Глава 1 — основные термины и определения транспортного планирования и моделирования, значение транспортного планирования в решении транспортных проблем городов, основные сведения о программном комплексе PTV VISUM.

Глава 2 — характеристики транспортных потоков в городах, методы сбора данных транспортного моделирования.

Глава 3 — основные этапы моделирования транспортного предложения: описание транспортной сети, структура исходных данных, транспортное районирование, формирование матрицы затрат.

Глава 4 — элементы модели расчета матриц корреспонденций: оценка транспортной подвижности населения, модели генерации поездок, модели распределения поездок по транспортным районам, модели выбора вида транспорта, методы прогнозирования поездок.

Глава 5 — модели распределения поездок по сети на транспорте: индивидуальном, общего пользования (общественном) и грузовом.

Глава 6 — основные сведения о калибровке модели.

Глава 7 — методы транспортного прогнозирования.

Глава 8 — значение транспортного моделирования в управлении транспортной системой.

Практический материал работы ориентирован на использование программного комплекса PTV VISUM, который представляет собой обширную и гибкую систему для транспортного планирования, расчета спроса на транспортные передвижения (матрицы корреспонденций для общественного и индивидуального транспорта), анализа транспортной сети, расчета себестоимости общественного транспорта и прогноза запланированных мероприятий и их последствий. PTV VISUM используется во многих странах мира для транспортного планирования и оптимизации общественного транспорта: в городах и городских агломерациях, регионах, отдельно взятых районах и т. д.

ТРАНСПОРТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

1.1. Основные термины и определения

В этой книге используются следующие основные термины и определения.

Дорожная сеть — совокупность транспортных связей, по которым осуществляются пассажирские и грузовые перевозки.

Корреспонденция — вещественный обмен, происходящий от элемента i к элементу j транспортной системы в полном цикле законченного процесса перемещения. Таким образом, корреспонденция характеризуется вектором, имеющим координаты начальной и конечной точек и величину нагрузки в количестве пассажиров или объеме груза. При наложении на транспортную сеть корреспонденция получает еще одну характеристику — протяженность.

Маршрутная сеть — совокупность транспортных связей, по которым осуществляются маршрутные перевозки пассажирским транспортом.

Матрица корреспонденций — количественная характеристика перемещений между каждой парой транспортных районов с учетом вида транспорта и момента перемещения.

Модель — система, исследование которой служит средством получения информации о другой системе.

Транспортное планирование — комплекс транспортных, планировочных, строительных и природоохранных мероприятий, направленных на обеспечение требуемых потребностей в перемещениях населения и экономике рассматриваемого региона.

Транспортное предложение — возможности транспортной системы для удовлетворения транспортного спроса.

Транспортная сеть — подмножество транспортных связей, по которым осуществляются перевозки определенного вида или движение определенного типа транспортных средств. Например, при перевозках пассажиров транспортная сеть может включать помимо маршрутной сети автобусов линии метрополитена, железной дороги и т. п.

Транспортная система в наиболее общем случае — это образующая связанное целое совокупность работников, транспортных средств и оборудования, элементов транспортной инфраструктуры и инфраструктуры субъектов перевозки, включая систему управления, направленная на эффективное перемещение грузов и пассажиров.

Транспортное районирование — это способ агрегирования индивидуальных потребностей пользователей при использовании транспортной сети в некую общность по определенным параметрам (пункты отправления или прибытия, маршрут, вид транспорта и т. п.) для целей моделирования.

Транспортный спрос — потребность населения и экономики в перемещениях, отображаемая матрицей корреспонденций.

1.2. Транспортные проблемы городов и основы транспортного планирования

Актуальность анализа передового опыта западных стран в области построения системных моделей для решения задач транспортного планирования, а также проблемы адаптации этого опыта для практических приложений в принятии решений по развитию транспортной инфраструктуры городов и регионов России обусловлена особенностями развития нашей страны. В значительной степени настоятельная потребность в решении указанных проблем определяется имевшим место в последние годы неуклонным ростом транспортной подвижности населения и ростом транспортной обеспеченности.

Одним из наиболее простых и, в то же время, информативных показателей средней транспортной обеспеченности населения страны является уровень автомобилизации населения. Под уровнем автомобилизации населения принято понимать количество собственных легковых автомобилей, приходящихся на тысячу человек. Изменение уровня автомобилизации в РФ за последние 15 лет показано на рисунке 1.1. За это время его значение выросло практически в 3 раза.

Проведенный анализ данных об автомобилизации показывает, что на протяжении последних лет в России происходил стабильный рост обеспеченности населения индивидуальными транспортными средствами, и дает некоторые основания предполагать, что эта тенденция сохранится в дальнейшем. Такое положение вещей неизбежно вызовет дальнейший рост интенсивности движения транспортных потоков на улично-дорожной сети (УДС) городов.

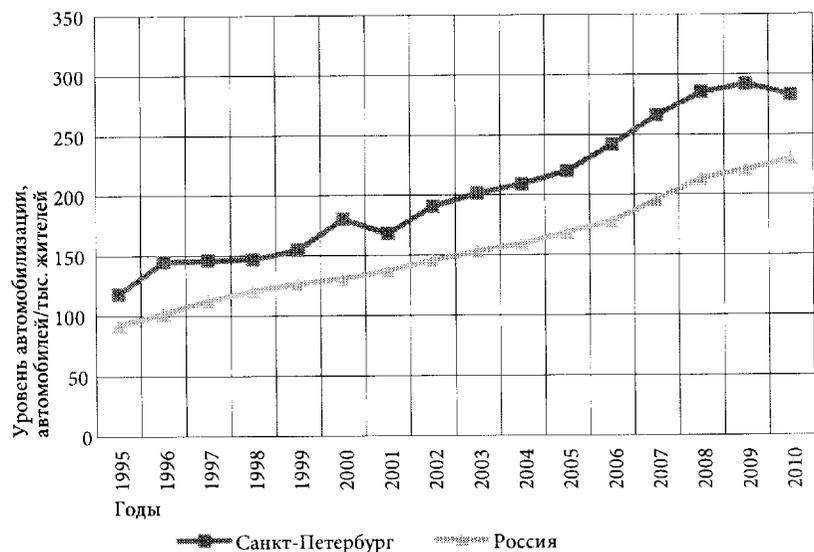


Рис. 1.1. Изменение уровня автомобилизации в целом по России и в г. Санкт-Петербурге

Функционирование и развитие транспортных систем невозможно без решения ключевых проблем автомобильного транспорта и тем самым снижения негативных последствий его деятельности для общества. Можно выделить следующие основные проблемы автомобильного транспорта, без решения которых невозможно его эффективное развитие:

1. Существенное влияние автомобильного транспорта на загрязнение окружающей среды. Это влияние ощущают на себе практически все жители городских и сельских поселений, расположенных вдоль автомобильных дорог. В 2008 г. автомобильным транспортом в нашей стране в атмосферу было выброшено более 17 млн т загрязняющих веществ, что составляет 46% в общем объеме выбросов, включая стационарные источники¹. При этом за последние годы объем выбросов и доля участия автомобильного транс-

¹ Транспорт России. 2009: Статистический сборник. М.: Росстат, 2009. 215 с.

порта в загрязнении окружающей среды только возрастает. Основные направления в снижении экологического воздействия заключаются в совершенствовании конструкции транспортных средств и особенно двигателей внутреннего сгорания, ужесточении экологических норм, использовании при производстве транспортных средств экологически чистых материалов, совершенствовании организации движения с целью снижения транспортных задержек и повышения плавности движения, совершенствовании процессов технического обслуживания и ремонта, утилизации выведенных из эксплуатации транспортных средств.

2. Возрастание потребления нефтепродуктов, запасы которых ограничены. При этом удовлетворение потребностей транспорта в нефтепродуктах во многом обуславливает развитие экологически опасных производств в нефтяной, химической и металлургической промышленности. Основными направлениями работ в данном направлении являются использование на транспорте возобновляемых источников энергии, технологий снижения потребления нефтяного топлива (гибридные транспортные средства), совершенствование конструкции и т. п.
3. Недостаточное развитие и качество дорожной сети. В России плотность автомобильных дорог составляет 0,044 км/км², тогда как в Финляндии этот показатель равен 1 км/км², а в Японии — 3 км/км². Но помимо необходимости развития транспортной сети не менее актуальна потребность в модернизации уже существующей для повышения ее пропускной способности и безопасности движения. Значительные резервы заложены в совершенствовании организации дорожного движения.
4. Увеличение издержек общества от ДТП. Так, в 2012 г. в нашей стране произошло более 200 тыс. ДТП, в результате которых погибли почти 28 тыс. человек и более 250 тыс. получили ранения¹. ДТП наносят экономике нашей страны значительный ущерб, составляющий в последние годы около 2,5% валового внутреннего продукта страны. Примеры значительного снижения аварийности показывают экономически развитые страны, используя системный подход к этой проблеме. Необходимо в первую очередь

¹ Официальный сайт ГИБДД: www.gibdd.ru.

изменить систему надзора за дорожным движением, вернуться к более жестким требованиям к подготовке профессиональных водителей, совершенствовать пассивную и активную безопасность транспортных средств, создавать систему современных автомобильных дорог с эффективной организацией дорожного движения, развивать транспорт общего пользования.

5. Градостроительная политика в РФ строится исходя из интересов инвесторов относительно покупки земельного участка и строительства нового здания. Практически нет механизмов, которые позволяли бы в порядке общей практики подчинить желание инвестора требованиям по комплексному развитию территории, резервирования достаточного пространства для прокладки линий общественного транспорта и строительства объектов транспортной инфраструктуры. В результате в городах исчезает пространство для развития транспортной системы, а хранение транспортных средств на непредназначенных для этого территориях ведет к ухудшению качества жизни населения.

Спрос на транспортные перемещения возникает не ради самого перемещения, а для удовлетворения определенных потребностей (в труде, отдыхе, здоровье) и осуществления различного рода деятельности в определенных местах. Это в равной степени значимо для перевозки товаров. Для того, чтобы понимать, как формируется спрос на перемещения, необходимо представлять, каким образом эта деятельность распространяется в пространстве как в городском, так и в региональном аспектах. Эффективная транспортная система расширяет возможности для удовлетворения этих потребностей; перегруженная или с плохими транспортными связями система ограничивает возможности экономического и социального развития. Спрос на транспортные услуги отличается высокими требованиями к показателям качества и сильно дифференцирован. Для транспорта существует целый ряд специфических требований, которые разделены по времени суток, дню недели, цели поездки, типу груза, скорости передвижения, частоте поездок и т.п. Транспортное обслуживание без учета этого дифференцированного спроса обычно оказывается невостребованным. Эта особенность транспорта делает его более трудным для анализа и прогнозирования спроса на транспортные услуги. Обычные валовые показатели работы транспорта, измеряемые в тоннах и пассажирокилометрах, не отражают весь объем требований и услуг.

Транспортный спрос реализуется в пространстве, в котором распределены пункты начала и окончания поездки, места производства, складирования (хранения) и потребления товаров (грузов) и услуг. Даже на уровне современных информационных технологий весьма затруднительно учесть индивидуальный спрос на транспортные услуги. Поэтому наиболее типичным подходом является агрегирование¹ спроса и поиск баланса между возможностями транспортной системы и спросом в определенных районах — транспортных районах.

В экономике транспортная отрасль занимает специфическое положение, относясь к экономической инфраструктуре. Транспорт является частью производительных сил общества и представляет собой самостоятельную отрасль материального производства, обеспечивающую нормальную деятельность экономической системы в целом. Отсюда следует, что продукция транспорта имеет материальный характер и выражается в перемещении вещественного продукта других отраслей. *Продукция транспорта* имеет следующие особенности:

- материальный характер транспортной продукции заключается в изменении пространственного положения перевозимых товаров;
- на транспорте процессы производства и потребления продукции не разделены во времени, продукция транспорта потребляется как полезный эффект, а не вещь;
- транспортную продукцию нельзя накопить впрок, повышение спроса на перевозки потребует использования дополнительных перевозочных возможностей;
- в процессе работы транспорта не создается новой продукции, а наоборот этот процесс сопровождается потерей физических объемов грузов;
- транспортная продукция вызывает дополнительные затраты в производящих отраслях, что влечет несовпадение интересов экономики в целом и транспортной отрасли.

Принятие эффективных стратегических решений по выбору мероприятий, обеспечивающих перераспределение все возрастающих транс-

¹ Агрегирование — объединение нескольких элементов в единое целое. Результат агрегирования называют агрегатом. Агрегированные показатели представляют обобщенные, синтетические измерители, объединяющие в одном общем показателе многие частные.

портных потоков в городах средствами имеющейся транспортной инфраструктуры и механизмов управления инфраструктурой с учетом всего комплекса ограничивающих факторов, требует системного подхода и всестороннего научного обоснования. Этим определяется необходимость использования мирового опыта планирования развития транспортной инфраструктуры городских агломераций.

Постоянное поддержание транспортной инфраструктуры города в работоспособном состоянии, обоснование инвестиций в ее расширение и совершенствование требуют организации процесса принятия управленческих решений с учетом всей доступной информации о движении пассажирского и грузового транспорта и возможных тенденциях дальнейшего развития транспортных процессов. Формирование соответствующих массивов данных, их всесторонняя научно обоснованная обработка и принятие на этой основе эффективных решений о развитии транспортной инфраструктуры составляют задачу транспортного планирования.

Отсутствие системного подхода к проблеме транспортного планирования городской агломерации выражается в том, что различные виды транспорта рассматриваются только по отдельности. Такой подход к планированию может привести к тому, что многие важные взаимосвязи элементов транспортной инфраструктуры остаются вне поля зрения лиц, принимающих решения, и, вследствие этого, к неверным выводам.

Для общества условия обеспечения мобильности стали неотъемлемой частью уровня жизни. Обычно в самом широком смысле под мобильностью понимается возможность интеллектуального, профессионального, социального и пространственного обмена. С точки зрения транспорта под мобильностью понимают возможность пространственного перемещения людей. При этом повышение мобильности всегда находится в противоречии с возможностями соответствующей инфраструктуры. Еще в прошлом веке стало ясно, что повышение мобильности путем обеспечения возможности приобретения автомобилей ведет в тупик, т.к. невозможно построить адекватную транспортную сеть даже в условиях отсутствия финансовых ограничений по причине дефицита свободных площадей и экологических последствий. Основным глобальным итогом экологических последствий от широкого использования автомобилей наряду с промышленной и аграрной деятельностью стало потепление климата на нашей планете. Из-за этого уровень миро-

вого океана уже поднялся на 20 см и все чаще приходится сталкиваться с масштабными природными катаклизмами.

В связи с этим в Европе уже в конце прошлого века в транспортной политике взят курс на ограничение использования в крупных городах личного (индивидуального) транспорта и развитие общественного с высоким уровнем качества обслуживания. В этом контексте любопытно проследить основные тенденции развития общественного транспорта в нашей стране и Европе, этапы которого представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Этапы развития общественного транспорта

Период	СССР / Россия	Западная Европа
До 1970-х гг. XX в.	Планомерное развитие общественного транспорта как основного вида транспорта для населения. Административное ограничение количества личного транспорта	Бурное развитие автомобилизации. Использование общественного транспорта как вспомогательного
Конец XX в.	Почти полное прекращение финансирования общественного транспорта. Бурное развитие автомобилизации	Приватизация общественного транспорта для увеличения инвестиций в его развитие при строго регулируемом рынке услуг
Начало XXI в.	Приватизация общественного транспорта для увеличения инвестиций в его развитие при слабо регулируемом рынке услуг	Введение экономических мер ограничения использования личного транспорта

Политика развития общественного транспорта тесно связана с потребностями снижения расходов общества на поддержание требуемого уровня мобильности населения. С повышением качества жизни потребность в увеличении ресурсов не может быть компенсирована непрерывным увеличением расходов. Поэтому необходимо снижение себестоимости потребляемых ресурсов и в современных условиях, в первую очередь это относится к энергетической и транспортной отраслям.

На рисунке 1.2 на примере крупнейших городов приведено соотношение между уровнем развития общественного транспорта и затратами городского бюджета на обеспечение мобильности населения. Наглядно видно, что развитие общественного транспорта в целом экономически эффективно для общества.

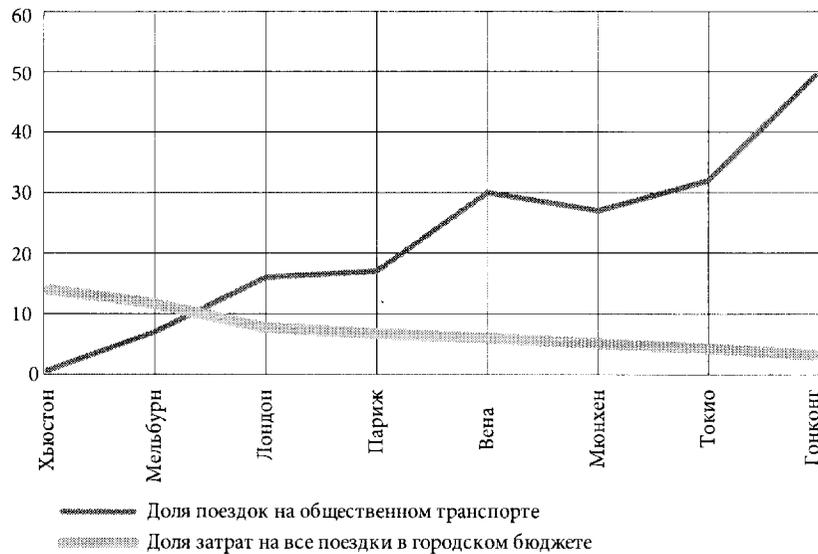


Рис. 1.2. Затраты на поддержание мобильности в зависимости от степени использования общественного транспорта

Например, в Сингапуре, по численности населения равном г. Хьюстону (США), на общественном транспорте совершается более половины всех поездок. При этом расходы бюджета на транспорт меньше на 10 млрд долларов, что составляет примерно 3 тыс. долларов на одного жителя при существенно лучшей транспортной доступности. Это реальный пример той нагрузки, которую несет общество за попытку решить проблемы мобильности только за счет личных транспортных средств, а как видно из рисунка 1.2, в г. Хьюстоне с использованием личного транспорта совершается более 95% всех поездок.

Помимо затрат на транспортную инфраструктуру население все больше времени вынуждено проводить в поездке. В таких городах, как Хьюстон или Рим, это время составляет более полутора часов в день. Из крупных городов мира лучший показатель достигнут в Копенгагене, где каждый день жители тратят на поездки не более 50 мин.

В связи с тем, что в среднем в крупнейших городах мира количество автомобильного транспорта возрастает на 10% в год (до 20% в развива-

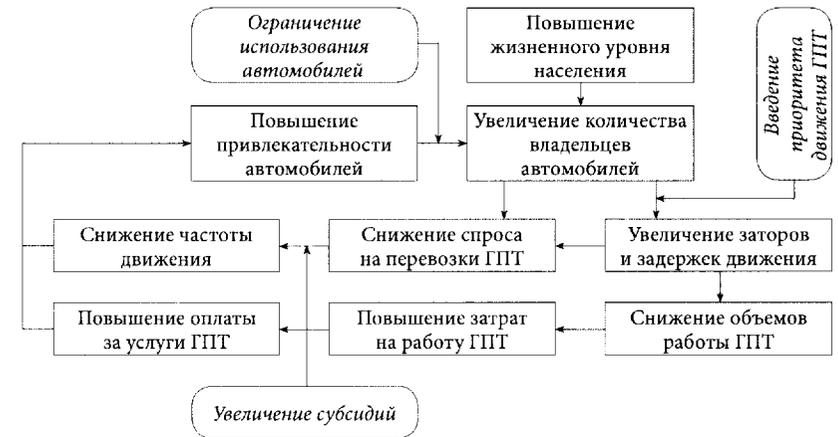


Рис. 1.3. Структурная модель увеличения использования доли личного транспорта в поездках населения

ющихся странах), можно сделать вывод, что города без развитого общественного транспорта не имеют экономической перспективы развития, т. к. все большая доля городского бюджета будет тратиться на поддержание возможности функционирования личного и грузового автомобильного транспорта¹.

Структурная модель смещения спроса на использование личных транспортных средств приведена на рисунке 1.3. Здесь же курсивом в овалных текстовых блоках перечислены основные мероприятия, которые могут замедлить негативные тенденции увеличения использования личного транспорта или даже наоборот, вызвать снижение количества транспортных средств, используемых в городе.

В связи с изменением роли общественного транспорта в достижении мобильности изменяется и оценка эффективности его работы. Если раньше основными критериями его оценки были такие показатели, связанные с оценкой объемов выполненной работы, как суммарный пробег подвижного состава, предоставленные местокилометры и т. п., то теперь в основе оценки должны лежать показатели, связанные

¹ www.uitp.com — UITP Millennium Cities Database for Sustainable Transport — Официальный сайт Международного союза общественного транспорта.

с удовлетворением потребности населения в транспортных услугах: среднее время ежедневных поездок, скорость сообщения и т. п. В этой связи возрастает значение маркетинга как основного инструмента для проектирования интегрированных транспортных систем, в наиболее полной мере удовлетворяющих потребности населения. В таких системах различные виды транспорта комплексно используются для достижения максимально качественной транспортной услуги. Например, во многих крупных аэропортах созданы экспрессные системы внеуличного транспорта для доставки пассажиров в центральные районы городов, что позволяет сократить общее время поездки пассажиров.

Таким образом, развитие общества и экономики тесно связано с развитием транспортных систем. Эта связь взаимна. Новые возможности транспортных систем позволяют повысить эффективность экономики. Так было, когда на морских судах паруса заменили двигатели, что позволило организовать массовые доставки сырьевых товаров из Африки и Азии независимо от погодных условий и способствовало росту промышленности в Европе. В той же Европе развитие специализации промышленных предприятий основывалось на появлении обширной сети скоростных дорог и большегрузного экономичного автотранспорта. С другой стороны, рост потребности экономики в сырьевых ресурсах вызвал необходимость строительства супертанкеров, требования экологии — появление гибридных и электрических транспортных средств, и таких примеров множество.

Само наличие транспортных процессов в городах обусловлено тем обстоятельством, что в современных городах всегда имеет место существенная неоднородность пространственного распределения основных видов деятельности населения. К основным видам деятельности репрезентативного жителя крупного города следует отнести:

- домашнюю деятельность;
- трудовую деятельность;
- образование;
- здравоохранение;
- досуг.

Наличие общедоступной транспортной инфраструктуры составляет важнейшую предпосылку возможности перемещения людей и грузов между функционально-пространственными областями территории агломерации. Предметом транспортного планирования крупнейших городов является вся взаимосвязанная совокупность транспорт-

ных процессов, протекающих в общедоступной транспортной инфраструктуре, рассматриваемая как целостный объект (система).

К основным аспектам транспортного планирования относят перечисленные ниже.

Прогностический аспект. Важной задачей транспортного планирования является получение выводов относительно возможных сценариев будущего развития транспортных процессов на территории агломерации. При этом достоверность прогноза должна обеспечиваться применением специально разработанных для этого научно обоснованных и апробированных на практике аналитических методов, реализованных в виде математических моделей и компьютерных программ.

Организационно-управленческий аспект. На основании прогнозных оценок формируются конкретные предложения относительно развития транспортной инфраструктуры и транспортных предприятий. Такие предложения являются основой проектных решений. При этом учитываются как собственно транспортно-технологические показатели и показатели эффективности организации движения, так и экономические, экологические, социальные и другие факторы.

Оценка последствий. На основе прогнозных оценок возможного дальнейшего развития транспортных процессов необходимо провести комплексную оценку каждого проектного решения для случая реализации каждого возможного сценария.

Координационный аспект. Каждое проектное решение оценивается с точки зрения согласованности его возможных последствий с плановыми документами, определяющими развитие смежных областей жизнедеятельности города (в городах России главным документом такого рода является Генеральный план).

Реализация плана. По результатам оценки проектных решений осуществляется подготовка этапа реализации плановых мероприятий по развитию транспортной инфраструктуры города. На этом этапе проводится детальная проверка качества принятых решений, а также их ресурсоемкости. Фактическое достижение целей принятых к реализации мероприятий должно постоянно контролироваться посредством систематически проводимых транспортных обследований.

Стратегическое планирование развития транспортной инфраструктуры города направлено на достижение следующих целей, позволяющих обеспечить:

- уровень развития транспортной инфраструктуры, соответствующий современному уровню разделения труда и учитывающий взаимосвязь различных областей человеческой деятельности;
- приемлемый уровень мобильности населения в условиях роста количества используемых транспортных средств и их скоростных возможностей с учетом ограничений пропускной способности и плотности УДС;
- удовлетворение потребностей в транспортировке товаров на территории города;
- сохранение, совершенствование и расширение транспортной сети;
- соблюдение требований экологической безопасности мероприятий по развитию транспортной инфраструктуры.

Для реализации перечисленных целей в ходе транспортного планирования решаются следующие задачи:

- прогнозирование интенсивности дорожного движения;
- оценка последствий реализации транспортных проектов;
- разработка рекомендаций по выбору приоритетных транспортных проектов;
- согласование решений;
- реализация принятых решений.

В общих чертах роль транспортного планирования заключается в обеспечении удовлетворения определенного спроса D населения в перемещении с различными целями в определенное время с использованием различных видов транспорта, предоставляемого транспортной системой с определенными провозными возможностями. Представляя движение множества объектов по транспортной сети V с пропускной способностью Q , с соответствующим набором скоростей S под управлением системой M , в самом общем виде скорость перемещения в сети может быть представлена выражением

$$S = f\{Q, V, M\}.$$

Скорость может быть принята в качестве начального наиболее общего показателя *уровня обслуживания* (*level of service* — *LOS*), обеспечиваемого транспортной системой. В более общем виде уровень обслуживания будет определяться сочетанием скоростей или затрат времени на передвижение: ожидание транспорта на остановке, пешеходное передвижение к остановке или от нее, затраты на поездку. Система управления M может включать в себя схемы управления движением,

контроль и правила регулирования каждого вида транспорта в определенном регионе. Пропускная способность системы Q зависит от системы управления M и уровня инвестиций I , вкладываемых в систему:

$$Q = f\{I, M\}.$$

Система управления также может быть использована для перераспределения транспортного предложения, таким образом, чтобы предпочтение оказывалось определенным типам пользователей по сравнению с другими, либо по эффективности использования транспортного предложения (пользователям общественного транспорта, велосипедистам), либо по соображениям экологии (электромобилям) или на основании принципов социальной справедливости (пешеходам).

Как и в случае большинства товаров и услуг, можно ожидать, что уровень спроса D зависит от уровня услуг, предоставляемых транспортной системой, а также от расположения активного спроса A в пространстве:

$$D = f\{S, A\}.$$

Объединяя выражения для S и D при фиксированном уровне деятельности (активности) в системе, можно найти множество равновесных точек между спросом и предложением на транспорте. Т.к. уровень деятельности в системе зависит от изменения уровня обслуживания во времени и пространстве, можно располагать двумя разными наборами точек равновесия: краткосрочным и долгосрочным. Задача транспортного планирования и прогнозирования в этом случае будет заключаться в управлении развитием этих точек равновесия с течением времени так, чтобы социальный эффект являлся максимальным. Эту сложную задачу невозможно решить, основываясь только на экспертном мнении. Моделирование этих точек равновесия направлено на лучшее понимание развития транспортной ситуации и выступает в качестве средства помощи при разработке и реализации стратегии управления M и инвестиций программы I .

Схема процесса транспортного планирования города представлена на рисунке 1.4.

Из рисунка 1.4 видно, что процесс транспортного планирования в целом проходит в три этапа.

На этапе анализа проблем осуществляется постановка целей (например, повышение качества транспортного обслуживания населения

города) и выявляются основные проблемы, без решения которых достижение целей невозможно (например, перегруженность транспортной инфраструктуры города, недостаток подвижного состава и т. д.). Для определения возможных путей решения проблем необходим анализ существующего положения, требующий систематизации и обработки большого количества данных о состоянии транспортной инфраструктуры города, интенсивностях пассажирских и грузовых потоков, транспортном поведении населения.

На этапе анализа альтернатив проводится разработка возможных сценариев и проектов развития транспортной инфраструктуры. Затем для каждого сценария (проекта развития) проводится расчет последствий. Определяется ряд оценочных показателей (критериев качества) проектного положения транспортной инфраструктуры города. В качестве примеров оценочных показателей можно указать:

- среднее время в пути для индивидуального транспорта;
- среднее время ожидания и пересадок для общественного транспорта;
- среднюю стоимость проезда.

На этапе принятия решения руководящий орган (департамент, комитет) осуществляет выбор оптимального варианта развития с учетом приоритетности оценочных показателей транспортной инфраструктуры города.

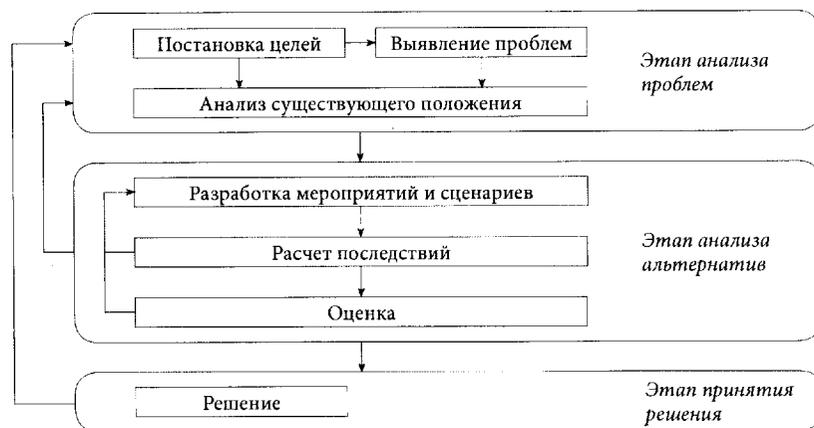


Рис. 1.4. Схема процесса транспортного планирования

1.3. Транспортные модели и особенности их применения в городах

При изучении систем различной природы исследователь сталкивается с проблемой их отображения, а также использования в познавательной и практической деятельности. Объект фиксируется терминами языка, отображается на бумаге чертежами, графиками, фотографиями, уравнениями и формулами, а также макетами, механизмами и устройствами. Впоследствии эти отображения применяются для научного исследования (например, наблюдения или эксперимента) либо для практической деятельности. Отображения объектов называются *моделями*, процесс их создания — *моделированием*, а использование — *модельным исследованием* (модельным экспериментом, численным экспериментом, модельным наблюдением) и *модельной практикой* в практической деятельности. Способы построения моделей получили название методов моделирования. Они очень разнообразны. Практически каждая наука имеет свой набор методов моделирования. В зависимости от используемых средств конкретной научной теории различают геометрическое, физическое, химическое, биологическое, экономическое, социальное, политическое, культурологическое и математическое моделирование.

Модель всегда является частичным отображением моделируемой реальности в той степени, в которой это признается удовлетворительным с точки зрения решаемой задачи. Необходимыми и достаточными признаками модели являются следующие условия:

- между моделью и оригиналом имеется отношение сходства, форма которого явно выражена и точно зафиксирована (*условие отражения*);
- модель в процессе научного познания является заместителем изучаемого объекта (*условие репрезентативности*);
- изучение модели позволяет получить информацию (сведения) об оригинале (*условие экстраполяции*).

Совокупность признаков модели обеспечивает первое, естественно возникающее требование к модели — это ее соответствие моделируемому объекту или системе. Это требование реализуется в условии изоморфизма модели и моделируемого объекта относительно изучаемых свойств. Две системы объектов с определенными для них свойствами и отношениями называются *изоморфными*, если между ними установ-

лено такое взаимно-однозначное соответствие, что каждому объекту первой системы соответствует объект второй системы, каждому набору свойств и отношений объектов первой системы соответствует определенный набор свойств и отношений второй системы и наоборот. На практике изоморфные модели не приводят к упрощению исследовательской задачи, являющемуся важнейшим стимулом для моделирования. Поэтому в исследованиях используются модели, представляющие упрощенный образ моделируемого объекта. В этом случае говорят о гомоморфизме модели. *Гомоморфизм* допускает соответствие объектов, свойств и отношений только в одном направлении: от моделируемого объекта (гомоморфного прообраза) к его модели (гомоморфному образу). При этом модель может использовать один объект для моделирования нескольких объектов и существенно как более простые, так и более сложные отношения, если это обеспечивает упрощение исследований.

Таким образом, система объектов *A* будет моделировать систему объектов *B*, если некоторый гомоморфный образ *A* и некоторый гомоморфный прообраз *B* изоморфны между собой. Согласно этому определению модель должна обладать следующими свойствами:

- *рефлексивность* — любая система есть своя собственная модель;
- *симметричность* — любая система есть модель каждой своей модели;
- *транзитивность* — модель модели есть модель исходной системы.

С точки зрения управления какой-либо системой ее модель представляет ценность не столько для получения объяснений различных явлений, сколько для предсказания поведения системы в будущем в зависимости от изменения тех или иных факторов. Процесс исследования системы с помощью ее модели можно разбить на ряд этапов:

1. Формулировка общей задачи для определения объекта исследований. Формулировка требований к исходным данным. Изучение свойств моделируемого объекта.
2. Создание модели. Результаты эмпирических исследований переводятся со специфического языка исследуемого объекта на универсальный математический язык, выбирается схема модели, вводятся основные переменные, параметры и функциональные зависимости. Для полученной модели выбираются соответствующие методы ее анализа. При необходимости производится упрощение моде-

ли. Она не должна утратить существенных специфических черт исследуемого объекта и в то же время попасть под класс структур, уже изученных математикой.

3. Математический анализ модели. Качественные выводы позволяют обнаружить неизвестные ранее свойства системы: динамику развития, устойчивость к внешним факторам и т. п. Количественные выводы позволяют получить оптимальные планы работы системы и ее объектов, прогноз изменения показателей системы.
4. Проверка полученных результатов обычно проводится на экспертном уровне или на основе анализа работы подобных систем и/или объектов.
5. Внедрение модели в систему управления требует ее реализации в удобной для использования форме. В основном это специальная компьютерная программа, интегрированная в общую информационную систему объекта управления.

Транспортная инфраструктура, наряду с другими подсистемами обеспечения жизнедеятельности города, удовлетворяя потребности экономики и населения в перемещении, требует для своего развития существенных капитальных затрат. Транспортная модель позволяет найти оптимальное соотношение затрат и эффективности, анализируя с помощью специальной программы на компьютере различные варианты строительства дорог, развязок и таких важных их параметров как количество полос, пересечений и примыканий, систем управления движением.

Транспортная модель отображает транспортную систему моделируемого региона, текущий и прогнозируемый спрос на перемещения со стороны населения и экономики. Помимо автотранспорта модель, как правило, охватывает системы общественного транспорта, пешеходного и велосипедного движения, а также внешнего транспорта, обеспечивающего связи с другими регионами. С помощью транспортных моделей исследуются зависимости между стоимостью перемещения (тарифами) и спросом для поиска баланса в использовании транспортной инфраструктуры.

В большинстве стран транспортная модель является основой для разработки органами местного самоуправления планов будущего развития населенных пунктов в регионе на ближайшие 5–10 лет или дальнейшую перспективу. Эти планы обычно охватывают развитие землепользования, экономики и социальной инфраструктуры во взаимосвязи с развитием транспортной системы.

Для крупных населенных пунктов транспортная модель позволяет определить, как наилучшим образом использовать средства, необходимые для улучшения транспортной системы. Соответствующие органы власти поддерживают транспортную модель и используют ее по мере необходимости для внесения изменений в планы транспортного обслуживания населения и экономики, исследования новых возможностей повышения эффективности транспортной системы, анализа последствий реализации строительных проектов на жизнедеятельность региона. Как правило, модели УДС, разработанные для поиска решений по удовлетворению все возрастающего использования транспортных средств, интегрируются с моделями общественного транспорта для анализа возможностей повышения роли последнего в обеспечении перевозок населения. В крупных агломерациях часто используется комплекс нескольких моделей, охватывающих разные уровни планирования, в то время как в малых городах для эффективного транспортного планирования достаточно только модели УДС.

В транспортной модели можно выделить четыре основных этапа:

1. Определение необходимости транспортировки и ее цели (генерация поездок);
2. Определение места завершения транспортировки (распределение поездок по транспортным районам);
3. Выбор способа транспортировки (вид транспорта и технология перевозок);
4. Выбор маршрута движения (распределение поездок по сети).

Эти 4 этапа составляют традиционную для транспортных исследований *четырёхшаговую процедуру определения спроса*, структура которой представлена на рисунке 1.5.

На каждом шаге в модели предусматривается ее верификация и калибровка, что подразумевает включение итерационных процедур и возврат при необходимости к предыдущим шагам. Как правило, в модели закладывается возможность прогнозирования ситуации на будущие периоды. С момента своего появления в конце 1950-х годов эта процедура постоянно совершенствуется в направлении насыщения каждого шага дополнительными функциями для учета большего количества факторов, их динамики, распределения по времени, для повышения достоверности прогноза и т. п. В связи с тем, что развитие общества

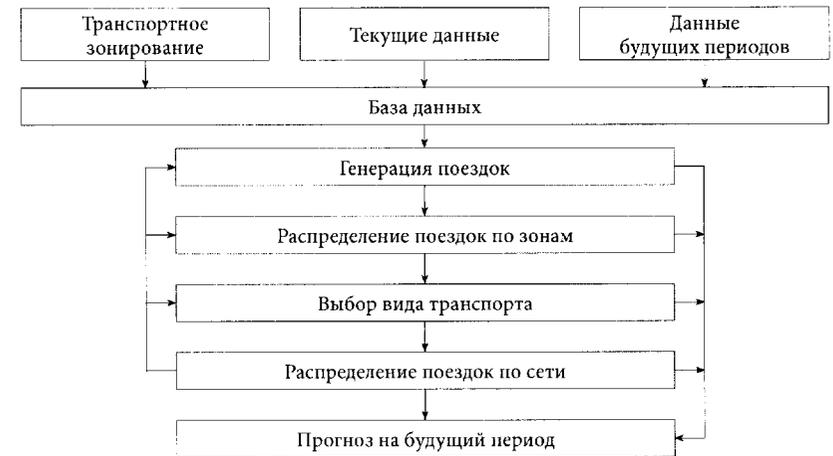


Рис. 1.5. Структура классической четырехшаговой транспортной модели

и экономики на современном этапе достаточно динамично, важным направлением работы с моделью является поддержание в актуальном состоянии ее данных. Для снижения трудоемкости этой работы все большее распространение получают методы автоматического обновления данных на основе многоуровневых ГИС-систем, распределенных баз данных и т. п.

1.4. Основы программного средства транспортного макро моделирования PTV VISUM

PTV VISUM — это программное обеспечение, которое позволяет отображать все виды индивидуального и общественного транспорта в единой мультимодальной модели. Оно дополняется системой микроскопического моделирования транспортного движения PTV VISSIM. Обе программы вместе образуют систему PTV Vision Traffic Suite. С помощью PTV VISUM можно управлять основными данными систем транспортной информации и планирования и обрабатывать их в сетевом редакторе. В отличие от простых ГИС-систем в PTV VISUM есть возможность получать информацию о сложных взаимозависимостях в пределах одной или нескольких систем транспорта и за счет этого создавать оптимальную транспортную модель.

Транспортная модель обычно состоит из модели спроса на транспорт, модели сети, создаваемой на основе PTV VISUM, и различных моделей воздействия на транспортную систему (рис. 1.6).

Модель спроса на транспорт содержит данные о спросе на транспорт. Знание спроса на транспорт в той области, для которой осуществляется транспортное планирование, является незаменимой основой для оценки транспортных сетей. Определить матрицы корреспонденций на транспорте путем сбора данных можно лишь частично. Поэтому для отображения реального соотношения спроса используются математические модели, которые рассчитывают транспортные потоки между районами области планирования на основе структурных данных и данных о том, как население пользуется транспортом, а также

данных о пространственном расположении объектов инфраструктуры и о существующем транспортном предложении.

Модель сети содержит данные транспортного предложения. Она состоит из транспортных районов (транспортных ячеек), узлов, остановок, отрезков автомобильных и рельсовых дорог, УДС и из маршрутов общественного транспорта с расписанием движения.

Данные модели сети и модели спроса на транспорт представляют собой исходные данные для *модели воздействия*. PTV VISUM предлагает на выбор различные модели воздействия для анализа и оценки транспортного предложения. Модель пользователя моделирует характер передвижения пассажиров и пары «Транспортное средство — Водитель». При этом вычисляются показатели нагрузки и параметры, относящиеся к пользователю (например, время поездки или частота пересадок). *Модель перевозчика* рассчитывает эксплуатационные показатели общественного транспорта, например, километры обслуживаемых поездок, количество единиц подвижного состава общественного транспорта, количество часов эксплуатации или эксплуатационные затраты. Исходя из данных спроса на транспорт, определяется выручка от продажи билетов, на ее основе делаются предположения о доходах от разных маршрутов, за счет этого производится оценка рентабельности маршрутов.

PTV VISUM отображает результаты расчета в графической и табличной форме и позволяет проводить разнообразные графические анализы.

Различные версии могут сравниваться с помощью сравнения версии или объединения сети. Посредством файлов трансформации модели пользователи могут обмениваться изменениями между различными моделями.

Как все модели, транспортная модель представляет собой абстракцию реального мира. Целью моделирования являются системный анализ, прогнозы воздействий и модельная подготовка решений, которые принимаются в реальном мире.

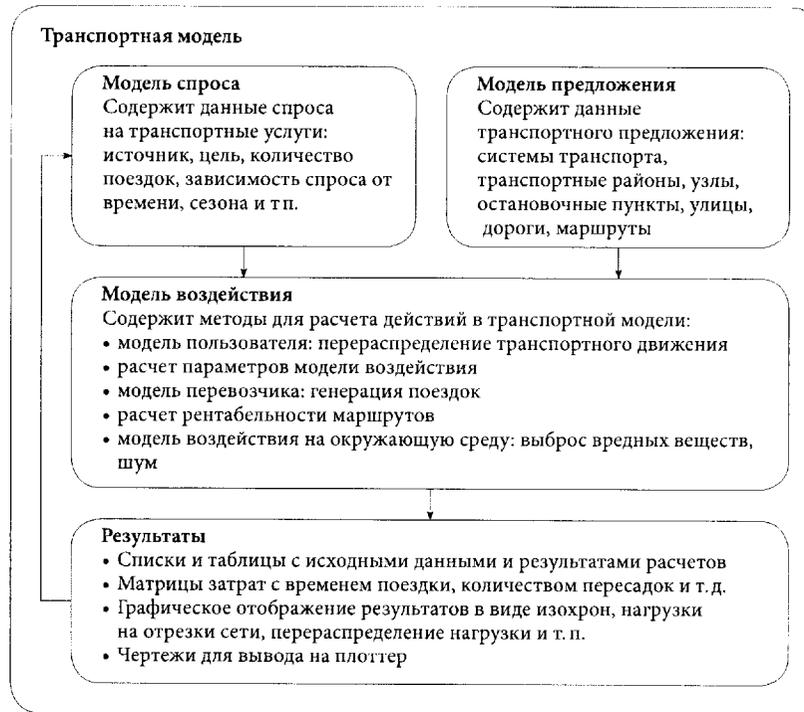


Рис. 1.6. Модель сети и модель воздействия PTV VISUM

ТРАНСПОРТНЫЕ ПОТОКИ В ГОРОДАХ

2.1. Характеристики транспортных потоков

Упорядоченное транспортной сетью движение транспортных средств называют *транспортным потоком*, перемещение пассажиров и грузов — соответственно *пассажиропотоком* и *грузопотоком*, движение пешеходов — *пешеходным потоком*.

Для характеристики транспортных потоков используются следующие основные показатели: интенсивность, скорость и плотность движения, временной интервал.

Интенсивностью движения называют количество транспортных средств, проходящих через поперечное сечение дороги в определенном направлении или направлениях в единицу времени:

$$N_a = \frac{n_a}{t}$$

Интенсивность движения, приходящаяся на одну полосу дороги, называют *удельной интенсивностью движения*. В смешанном потоке транспортные средства различного типа занимают различную площадь дороги, имеют разные динамические характеристики, поэтому для сопоставимости оценок количество транспортных средств определенного типа приводят к легковому автомобилю с помощью коэффициентов приведения. Таким образом, получают *приведенную интенсивность движения*

$$N_{пр} = \sum_{i=1}^n (N_{ai} K_{при}),$$

где: N_{ai} — интенсивность движения транспортных средств данного типа, авт./ч; $K_{при}$ — соответствующие коэффициенты приведения для данной группы транспортных средств; n — число типов транспортных средств, на которые разделены данные наблюдений.

Именно приведенное значение интенсивности движения $N_{пр}$ используется в расчетах транспортных потоков и дорог. Промежуток времени (час, сутки, год и т. п.), за который определяется интенсивность движе-

ния, зависит от цели исследования. Необходимо учитывать, что интенсивность движения характеризуется значительными колебаниями как по времени суток, дням недели и времени года, так и по участкам улично-дорожной сети.

В последние годы в связи с резким ростом автомобилизации в нашей стране, совершенствованиями в конструкции и эксплуатации транспортных средств существенно изменились закономерности колебания интенсивности движения. Например, сейчас, в отличие от прошлого века, не наблюдается существенного падения интенсивности движения в зимнее время года. Наоборот, максимальная интенсивность движения в крупных городах характерна для поздней осени и весенних месяцев. Характерные зависимости изменения интенсивностей в крупных городах приведены на рисунках 2.1–2.3.

Колебания интенсивности движения в течение года характеризуются *коэффициентом годовой неравномерности*

$$K_r = \frac{W_m}{V_r},$$

где: W_m , V_r — среднемесячная и годовая интенсивность движения соответственно.

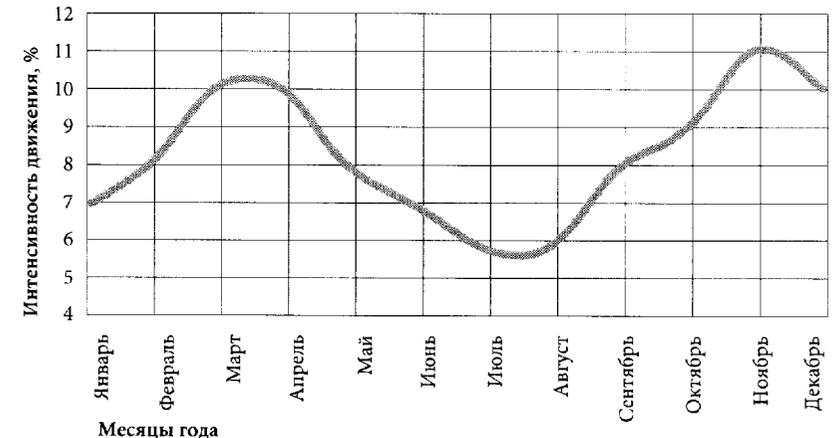


Рис. 2.1. Изменение интенсивности движения по месяцам года

Коэффициент K_r используют при расчете годового объема движения

$$W_r = \frac{N_a D_m}{K_r K_c}$$

где: N_a — измеренная интенсивность движения, авт./ч; D_m — количество дней в месяце, дн.; K_c — коэффициент суточной неравномерности движения.

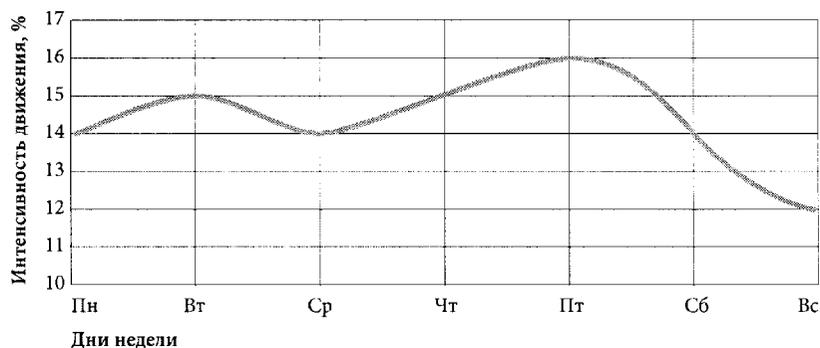


Рис. 2.2. Изменение интенсивности движения по дням недели

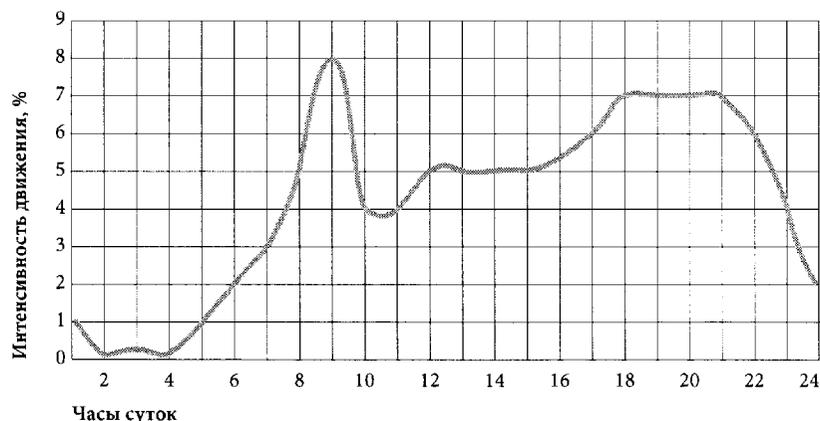


Рис. 2.3. Изменение интенсивности движения по времени суток

Для распределения интенсивности движения по дням недели характерно ее максимальное значение по пятницам, когда автомобилем пользуются наибольшее количество индивидуальных владельцев. Это значение интенсивности следует принимать в качестве расчетной.

В течение суток наибольшая интенсивность движения наблюдается в утренний час пик, после него следует небольшой спад, затем интенсивность движения плавно увеличивается до вечернего часа пик, который существенно более растянут по времени, чем утренний.

Коэффициентом загрузки дороги (полосы) называется отношение интенсивности транспортного потока к пропускной способности дороги

$$z = \frac{N_\phi}{P_\phi}$$

где: N_ϕ — существующая интенсивность движения, ед./ч; P_ϕ — пропускная способность дороги, ед./ч.

Для обеспечения бесперебойного движения необходим резерв пропускной способности, и поэтому принято считать допустимым уровнем загрузки $z = 0,85$. Если он выше, то данный участок следует считать перегруженным.

Для маршрутных пассажирских перевозок или линейных грузовых величина, обратная интенсивности движения, определяет временной интервал между транспортными средствами

$$t_n = \frac{1}{N_a}$$

Плотность транспортного потока является пространственной характеристикой, определяющей степень стесненности движения на полосе дороги. Ее измеряют числом транспортных средств, приходящихся на 1 км протяженности дороги. Предельная плотность достигается при неподвижном состоянии группы транспортных средств, расположенных вплотную друг к другу на полосе. Предельное значение q_{max} составляет 170–200 авт./км в зависимости от состава потока.

При разных значениях плотности движения могут складываться разные уровни эксплуатационных условий по степени стесненности. В зависимости от плотности потока движение по степени стесненности подразделяют на свободное, частично связанное, насыщенное и колонное.

Численные значения q_n в физических единицах (транспортных средствах), соответствующих этим состояниям потока, в значительной степени зависят от параметров дороги и в первую очередь от ее плана и профиля, коэффициента сцепления шин с дорогой, а также состава потока по типам транспортных средств, что, в свою очередь, влияет на выбираемую водителями скорость.

Скорость движения является важнейшим показателем транспортного потока, т.к. определяет эффективность транспортной сети.

Следует различать различные характеристики скорости. В зависимости от методов измерения и расчета скорости подразделяются на следующие виды:

- *Мгновенная скорость* v_n — фиксируется в отдельных типовых сечениях (точках) дороги и в значительной степени влияет на безопасность движения. Она определяет кинетическую энергию транспортного средства, т.е. его тормозной путь и время, которое есть у водителя для оценки опасной ситуации.
- *Максимальная скорость* v_m — наибольшая мгновенная скорость, которую может развить транспортное средство. Для дорожного движения большое значение имеет максимальная скорость транспортного средства, которая ниже разрешенной. Такие транспортные средства становятся препятствием для нормального движения транспортного потока.
- *Крейсерская скорость* v_k — скорость, с которой водитель стремится ехать в данных условиях. Если поток движется более медленно или более быстро, водитель испытывает дискомфорт. В зависимости от физиологических особенностей водителя он быстрее утомляется, становится невнимательным или раздражительным.
- *Разрешенная скорость* $v_{раз}$ — скорость, разрешенная на данном участке дороги нормативными документами или средствами регулирования дорожного движения.
- *Рекомендуемая скорость* $v_{рек}$ — скорость, с которой рекомендуется двигаться водителю и которая обеспечивает безопасность дорожного движения в данных условиях.
- *Безопасная скорость* $v_{б.д}$ — скорость, при которой водитель в состоянии предпринять необходимые действия при возникновении опасной ситуации. Соблюдение безопасной скорости с большой вероятностью позволяет гарантировать безопасность поездки.

- *Экономичная скорость* $v_{эки}$ — скорость, при которой затраты на движение (в основном расход топлива) минимальны.
- *Скорость сообщения* v_c — измеритель времени доставки грузов и пассажиров. Скорость сообщения определяется как отношение расстояния между точками сообщения ко времени нахождения в пути (времени сообщения). Этот же показатель применяется для характеристики скорости по отдельным участкам дорог.

Между параметрами транспортного потока существуют определенные зависимости. Характер этих зависимостей достаточно сложный, и на них влияет множество факторов, связанных не только непосредственно с транспортным потоком, но и с условиями его движения по дороге, метеословиями, временем года и суток и т.п. При исследовании транспортных потоков влияющие на них факторы могут рассматриваться как детерминированные или как вероятностные величины. Вероятностный подход более близок природе транспортного потока, но сложен для математического описания. Детерминированный подход легче реализовать в инженерных методиках, и при тщательном анализе исходных данных он дает достаточно точные для практических целей результаты.

При исследовании транспортных потоков используют два подхода. Первый предполагает исследование процессов, происходящих внутри потока, и поэтому он получил название *микроскопическое моделирование*. Микроскопическое моделирование рассматривает транспортный поток как взаимное положение следующих друг за другом автомобилей и основано на *теории следования за лидером*. Предполагается, что основное влияние на изменение параметров движения конкретного автомобиля (ведомого) оказывает изменение скорости движения находящегося перед ним автомобиля-лидера. Исследования показали, что влияние на изменение скорости ведомого автомобиля начинается, когда временной интервал между ним и ведомым автомобилем составляет на загородной дороге 9 с, а в городе — 6 с. Изменение ускорения ведомого автомобиля прямо пропорционально разности скоростей между ним и лидером и обратно пропорционально расстоянию между ними:

$$a_{(n+1)(t+\tau)} = \frac{K (v_{nt} - v_{(n+1)t})}{S_{n(n+1)t}}$$

где: $a_{(n+1)(t+\tau)}$ — ускорение ведомого автомобиля в момент времени $(t+\tau)$, м/с²; τ — время реакции водителя, с; K — коэффициент, учитывающий

максимально возможное изменение скорости лидера (обычно его значение близко максимальному замедлению для данного типа автомобиля); v_m — скорость лидера в момент времени t , м/с; $v_{(n+1)t}$ — скорость ведомого в момент времени t , м/с; $S_{n(n+1)t}$ — расстояние между автомобилями в момент времени t , м.

Представленная зависимость является простейшей линейной моделью следования за лидером. Более точные результаты можно получить, используя нелинейную модель, в которой учитывается зависимость поведения водителя от дистанции между автомобилями.

Основной областью использования микроскопического моделирования является анализ эффективности организации движения на отдельных элементах транспортной сети, проектирование режимов работы технических средств организации движения.

Второй подход к изучению транспортных потоков рассматривает его как целостный процесс, характеризуемый только внешними параметрами. При таком подходе создаются *макроскопические модели*, которые рассматривают такие характеристики потока как скорость, интенсивность, плотность и т. п. Модели такого типа появились в середине прошлого века¹ и основаны на гидродинамической аналогии, когда поток транспортных средств ассоциируется с потоком жидкости, имеющим определенные характеристики скорости и плотности. В простейшем случае макроскопическая модель описывается уравнением

$$\partial_t \rho + \partial_x (\rho v) = 0,$$

где: $\rho(x, t)$ — плотность потока, $v(x, t)$ — средняя скорость автомобилей в точке дороги с линейной координатой x в момент времени t .

Принимается, что средняя скорость потока убывает с увеличением его плотности. В таком виде модель описывает распространение нелинейных кинематических волн, и это ее свойство часто используется для описания динамики заторов. С течением времени профиль волны может становиться все более крутым, вплоть до вертикального угла наклона, при котором образуется разрывный профиль волны — «шоковые волны». В реальности распределение транспортных средств на дороге не меняется скачкообразно. Для сглаживания профиля волны в модель добавляются дополнительные компоненты, но основным не-

¹ Lighthill M. J., Whitham G. B. On kinematic waves: II. A theory of traffic on long crowded roads // Proc. Roy. Soc. London, Ser. A. 1955. V. 229. P. 317–345.

достатком моделей, основанных на гидродинамической аналогии, остается неадекватное описание динамических ситуаций при сужении дороги, на съездах с развязок и выездах с примыканий и при затрудненном движении с частыми торможениями и разгонами.

Основной областью использования макроскопического моделирования является анализ распределения транспортных потоков по сети.

Проще всего математически описывается *равномерный транспортный поток*. Между переменными, описывающими движение транспортных средств (интервал, расстояние между автомобилями, скорость), и переменными транспортного потока (интенсивность, плотность, средняя скорость потока) устанавливается однозначное соответствие. Это хорошо иллюстрирует диаграмма «Время—Расстояние между автомобилями», пример которой приведен на рисунке 2.4.

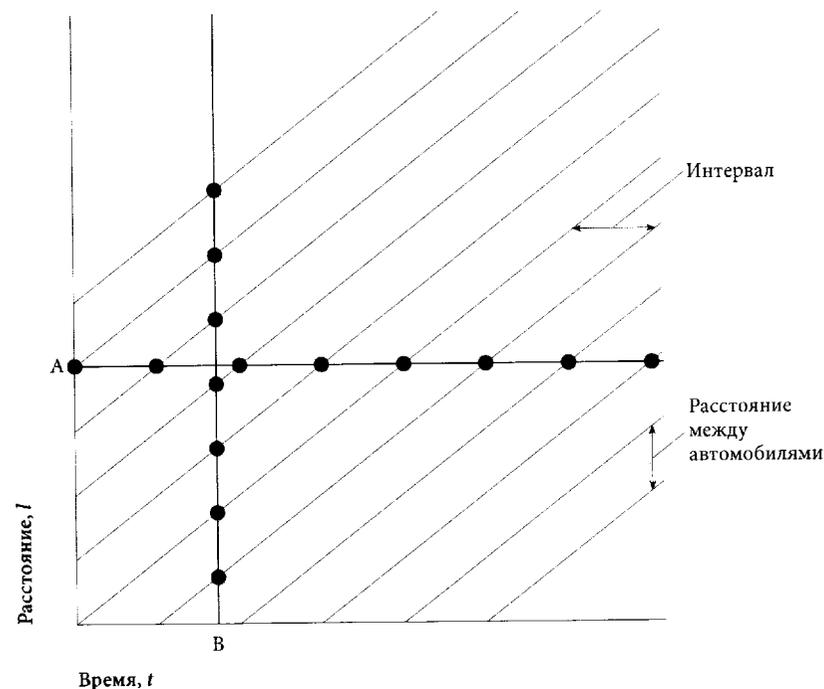


Рис. 2.4. Диаграмма «Время—Расстояние между автомобилями»

На диаграмме движение отдельного автомобиля представлено прямой линией — траекторией движения, т. к. принято, что скорость движения постоянна, тогда наклон линии соответствует скорости движения

$$v = \frac{dl}{dt}.$$

Совокупность траекторий движения отдельных автомобилей образует транспортный поток. Точки на диаграмме соответствуют положению отдельных автомобилей в соответствующий момент времени. Горизонтальная линия А, пересекаясь с траекториями движения автомобилей, представляет интервалы времени, через которые они проезжают определенное сечение дороги (мимо стационарно расположенного наблюдателя). Количество пересечений за единицу времени определяет интенсивность транспортного потока.

Вертикальная линия В, пересекаясь с траекториями движения отдельных автомобилей, представляет расстояния между ними. Количество пересечений соответствует числу автомобилей, находящихся на определенном отрезке дороги, — плотности транспортного потока.

Реальный транспортный поток редко бывает равномерным. Скорость движения отдельных транспортных средств и потока постоянно меняется, меняются и интервалы движения, поэтому траектории движения являются криволинейными.

Между скоростью движения, плотностью и интенсивностью существует зависимость

$$N_a = v_a q_a.$$

Все три величины в этом выражении находятся в сложной взаимосвязи, поэтому нельзя анализировать его, фиксируя одну из них и произвольно изменяя значение другой. Повышение скорости движения снижает плотность потока, поэтому интенсивность движения может возрастать, оставаться постоянной или снижаться в зависимости от относительной величины этих двух противодействующих факторов.

На рисунке 2.5 представлены зависимости между плотностью, скоростью и интенсивностью транспортного потока. Зависимость между скоростью и плотностью монотонно убывает в соответствии с уже упомянутой закономерностью. Зависимости между скоростью и интен-

сивностью и между интенсивностью и плотностью являются параболами и имеют точку перегиба в значении максимальной интенсивности транспортного потока, соответствующую определенным значениям скорости v_m и плотности q_m потока.

Таким образом, зависимость интенсивности транспортного потока можно представить в следующем виде:

$$N_a = q_a v_a (q_a).$$

Графически эта зависимость может быть изображена в виде так называемой *основной диаграммы транспортного потока* (рис. 2.6). Эта диаграмма строится из предположения, что в транспортном потоке соблюдается режим безопасности Б (см. табл. 2.2). Диаграмма отражает

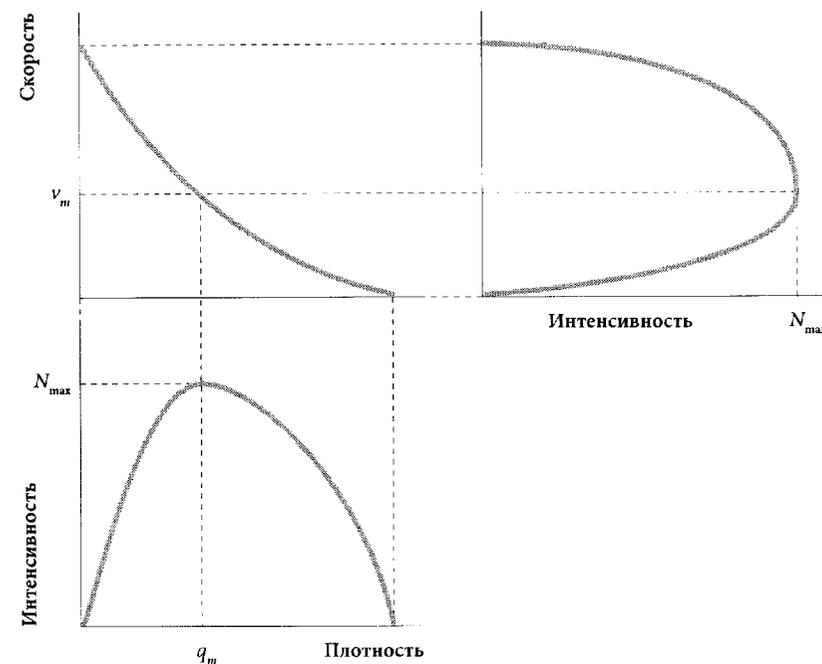


Рис. 2.5. Зависимости между плотностью, скоростью и интенсивностью транспортного потока

изменение состояния однорядного транспортного потока преимущественно легковых автомобилей в зависимости от увеличения его интенсивности и плотности.

Левая часть кривой (показана сплошной линией) отражает устойчивое состояние потока, при котором по мере увеличения плотности транспортный поток проходит фазы *свободного*, затем *частично связанного* и, наконец *связанного* движения, достигая точки максимальной возможной интенсивности, т.е. *пропускной способности* (точка $N_{a\max} = P_a$). В процессе этих изменений скорость потока падает — она характеризуется тангенсом угла наклона α радиуса-вектора, проведенного от точки 0 к любой точке кривой, характеризующей изменение N_a . Соответствующие точке $N_{a\max} = P_a$ значения плотности и скорости потока считаются оптимальными по пропускной способности ($q_{a\text{опт}}$ и $v_{a\text{опт}}$). При дальнейшем росте плотности (за точкой P_a перегиба кривой) поток становится *неустойчивым* (эта ветвь кривой показана прерывистой линией).

Переход потока в неустойчивое состояние происходит вследствие снижения плавности движения, например, при появлении препятствия на участке дороги, неблагоприятных погодных условиях и т.п. Снижение скорости лидером группы требует торможения разной интенсивности последующих автомобилей, а затем и разгонов, что создает пульсирующий, неустойчивый поток.

Дальнейшее снижение интенсивности потока до нуля при скорости потока, тоже равной нулю, соответствует максимальной плотности потока $q_{a\max}$. Интересно отметить, что если бы существовала техническая возможность синхронного движения потока в состоянии максималь-

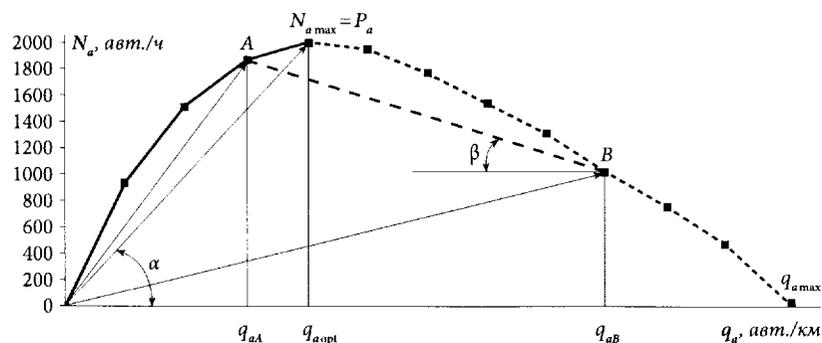


Рис. 2.6. Основная диаграмма транспортного потока

ной плотности, то диаграмма представляла бы вертикальную линию из точки $q_{a\max}$.

Резкое торможение потока (находящегося в режиме, соответствующем точке A) и переход его в результате торможений к состоянию по скорости и плотности в положение, соответствующее, например, точке B, вызывает так называемую «ударную волну» (показана пунктиром AB), распространяющуюся навстречу направлению потока со скоростью, характеризуемой тангенсом угла β (значение скорости будет отрицательным). «Ударная волна» является, в частности, источником возникновения попутных цепных столкновений, типичных для плотных транспортных потоков. В точках 0 и $q_{a\max}$ интенсивность движения $N_a = 0$, т.е. соответственно на дороге нет транспортных средств или поток находится в состоянии затора (неподвижности).

Радиус-вектор, проведенный из точки 0 в направлении любой точки на кривой (например, A или B), характеризующей N_a , определяет значение средней скорости потока

$$\bar{v}_a = \frac{N_a}{q_a} = \text{tg } \alpha.$$

Зависимость между интенсивностью и скоростью транспортного потока (см. рис. 2.3) позволяет получить комплексную оценку условий движения транспортных средств по транспортной сети при определенном уровне безопасности. Данную зависимость можно разделить на зоны, которые будут соответствовать определенным условиям движения с определенными сочетаниями значений интенсивности, скорости и плотности движения. Принцип такого выделения зон показан на рисунке 2.7, а сами зоны соответствуют определенному уровню обслуживания пользователей транспортной сети. Этот подход используется для оценки как условий движения транспортных средств, так и условий перевозки пассажиров. В США требования к уровням обслуживания определены в документе HCM-2010¹, который является основным документом при проектировании автомобильно-дорожных систем. Характеристика уровней обслуживания, принятая в США и в нашей стране для загородных дорог, приведена в таблице 2.1.

¹ Highway Capacity Manual 2010. — Transportation Research Board, National Research Council. — Washington, D.C., USA, 2010. — 1134 p.

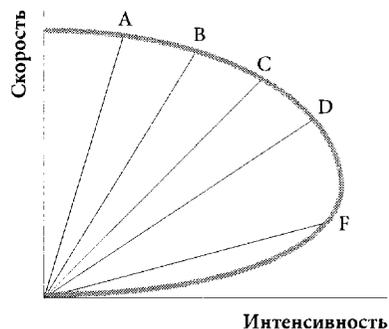


Рис. 2.7. Графическая интерпретация уровней обслуживания

Для элементов транспортной сети типа регулируемых и нерегулируемых пересечений, развязок и т. п. используются дополнительные показатели, с помощью которых формируется соответствующая оценка уровня обслуживания.

Характеристика условий движения на любых типах дорог для каждого уровня обслуживания заключается в следующем:

- Уровень обслуживания *A* — свободный поток транспортных средств может двигаться с максимальной разрешенной скоростью. Свободные условия для выполнения маневров. Задержек на регулируемых пересечениях нет или они минимальны.
- Уровень обслуживания *B* — сохраняются условия движения свободного потока при несколько большей плотности транспортных средств на дороге.
- Уровень обслуживания *C* — стабильный поток транспортных средств, но его скорость может снижаться до 50% от скорости свободного потока. Возможности маневра и задержки могут возрастать.
- Уровень обслуживания *D* — в этих условиях может значительно снижаться скорость потока и возрастать его плотность. Условия движения становятся некомфортными. Возрастают задержки движения.
- Уровень обслуживания *E* — нестабильные условия движения с резким колебанием скорости потока.
- Уровень обслуживания *F* — крайне нестабильные условия движения с длительными задержками.

Таблица 2.1. Характеристика уровней обслуживания

НСМ-2012 (США)			СП 34.13330.2012 ¹ (РФ)		
Уровень обслуживания	Максимальная интенсивность на полосу	Условия движения	Уровень удобства	Коэф. загрузки	Условия движения
A	600	Свободный поток	A	< 0,20	Свободный поток
B	990	Устойчивый поток	B	0,20–0,45	Частично связанный поток
C	1430	Устойчивый поток	B	0,45–0,70	Связанный поток
D	1910	Близкий к неустойчивому	Г-а	0,70–1,00	Насыщенный поток
E	2250	Неустойчивый поток	Г-б	≥ 1,00	Плотно насыщенный поток

Пропускная способность полосы движения оценивается по допустимому из соображений безопасности интервалу между транспортными средствами. Минимальный интервал движения между транспортными средствами должен быть таким, чтобы в случае остановки впереди идущего транспортного средства следующий за ним мог своевременно остановиться, т. е. было исключено столкновение транспортных средств.

Мгновенное значение скорости задается первой производной расстояния перемещения по времени

$$v = \frac{dl}{dt}$$

Ускорение (или замедление) определяется второй производной расстояния или первой производной скорости по времени

$$a = \frac{dv}{dt}$$

¹ Свод правил СП 34.13330.2012 «СНиП 2.05.02-85. Автомобильные дороги». Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85* (утв. приказом Министерства регионального развития РФ от 30.06.2012 г. № 266).

Применяя цепную подстановку, получаем

$$a = \frac{dv}{dt} \left(\frac{dl}{dv} \right) = \left(\frac{dv}{dl} \right) v.$$

Преобразовывая выражение, получаем

$$v \cdot dv = a \cdot dl \text{ или } \frac{v^2}{2} = a \cdot l,$$

отсюда, при постоянной величине замедления, длина тормозного пути следующего первым транспортным средством

$$l_1 = \frac{v^2}{2a_1}.$$

С учетом времени реакции водителя, следующего за первым начавшим торможение транспортным средством, длина его тормозного пути

$$l_2 = vt_p + \frac{v^2}{2a_2}.$$

С другой стороны, исходя из первоначального расстояния между транспортными средствами l , длины транспортного средства l_n и безопасного расстояния между ними после остановки l_0 , необходимая длина тормозного пути

$$l_2 = l + l_1 - l_n - l_0.$$

Отсюда, минимально необходимое расстояние между транспортными средствами

$$l_{\min} = vt_p + \frac{v^2}{2a_2} - \frac{v^2}{2a_1} + l_n + l_0,$$

где: t_p — время реакции водителя (в расчетах принимают обычно от 1 до 1,5 с), с.

Схема для понимания процесса торможения двух транспортных средств, следующих друг за другом, приведена на рисунке 2.8.

Анализируя процесс замедления, можно выделить три заслуживающих особого внимания величины, в зависимости от сочетания которых в процессе остановки двух транспортных средств выделяют 5 уровней безопасности, представленных в таблице 2.2:

- комфортное (нормальное) замедление — a_n ;
- экстренное торможение — a_3 ;
- мгновенная остановка (например, при аварии) — a_m ($a_m = \infty$).

Таблица 2.2. Уровни безопасности при движении транспортных средств

Уровень безопасности	Замедление первого транспортного средства	Замедление второго транспортного средства
А	a_m	a_n
Б	a_3	a_n
В	a_m	a_3
Г	a_n	a_n
Д	Без торможения	Без торможения

На рисунке 2.9 в качестве примера приведены зависимости, которые показывают изменение минимально необходимого расстояния между автобусами ЛиАЗ-6213 ($l_n = 18$ м, $l_0 = 1$ м) при различном значении скорости для приведенных в таблице 2.2 уровней безопасности. Значения замедления в этом примере составляют $a_n = 1,4$ м/с², $a_3 = 4$ м/с².

Очевидно, что наиболее безопасный уровень А малоприменим на практике как по причине психологических особенностей водителя, так и из соображений пропускной способности дороги, однако может

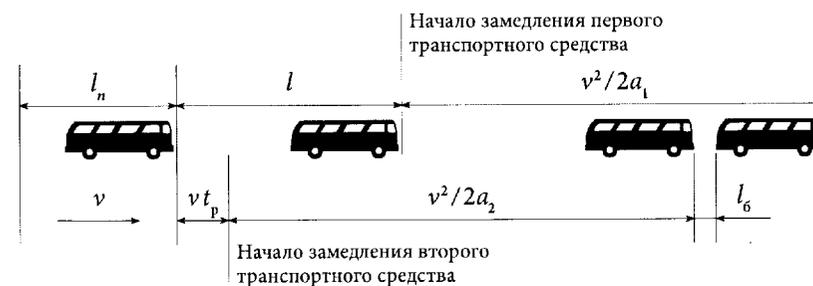


Рис. 2.8. Схема замедления двух транспортных средств

использоваться при особых режимах перевозок. Уровень безопасности B наиболее близок к практике и является минимально допустимым для обеспечения безопасности дорожного движения. Уровень D на графике приведен для сравнения, однако стоит отметить, что зачастую водители выбирают именно такое расстояние при движении даже с высокой скоростью, что и является основной причиной попутных столкновений.

Основываясь на выражении для минимально необходимого расстояния между транспортными средствами, делением на v можно определить минимально необходимый интервал между ними

$$I_{\min} = t_p + \frac{v^2}{2a_2} - \frac{v}{2a_1} + \frac{l_n + l_0}{v}$$

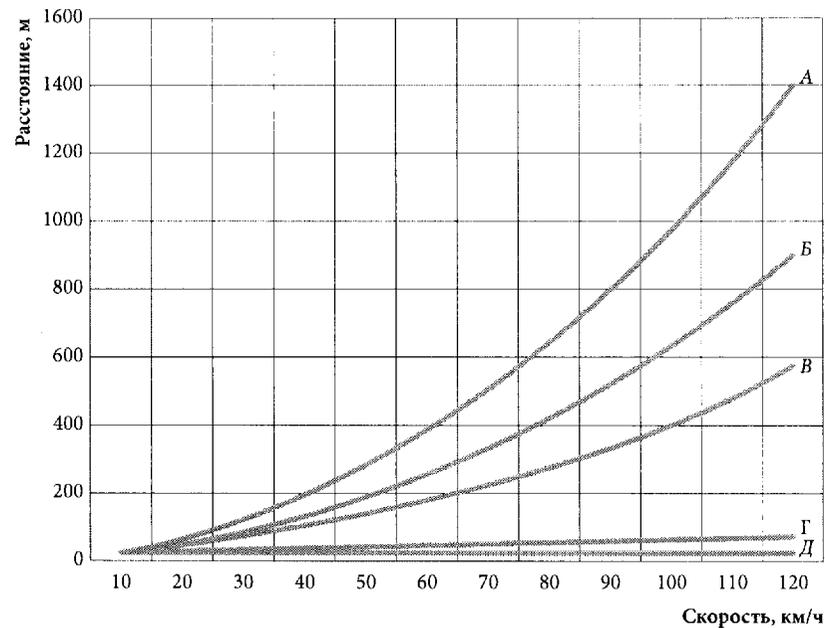


Рис. 2.9. Минимальное необходимое расстояние между транспортными средствами в зависимости от скорости движения и уровня безопасности

Для уровня безопасности $B (a_1 = \infty)$ выражение можно упростить:

$$I_{\min} = t_p + \frac{v^2}{2a_2} + \frac{l_n + l_0}{v}$$

Пропускная способность, определяемая для колонного движения транспортных средств с минимальными интервалами

$$P_m = \frac{3600}{I_{\min}} = \frac{3600}{t_p + \frac{v}{2a_2} + \frac{l_n + l_0}{v}} = \frac{3600v}{vt_p + \frac{v^2}{2a_2} + l_n + l_0}$$

Выражение показывает, что пропускная способность P_m является функцией скорости движения транспортных средств. При $v=0$ и $v=\infty$ получаем $P_m=0$. Следовательно, $P_m(v)$ имеет максимальное значение в точке, в которой производная

$$\frac{dI_{\min}}{dv} = 0.$$

Тогда значение скорости, обеспечивающей максимальную пропускную способность, составит

$$v_{\text{опт}} = [2a_2(l_n + l_0)]^{\frac{1}{2}}$$

Зависимость $P_m(v)$ показывает, что с ростом скорости транспортного потока пропускная способность полосы движения сначала монотонно возрастает, достигая максимума при $v = v_{\text{опт}}$, и при дальнейшем росте скорости падает. Это связано с тем, что с ростом скорости движения прогрессивно увеличивается интервал движения между транспортными средствами I_{\min} и транспортный поток растягивается по длине полосы.

Скорость $v_{\text{опт}}$ зависит от длины транспортного средства, величины замедления при торможении и принятого зазора безопасности между транспортными средствами. Например, для автобуса ЛиАЗ-6213 получаем

$$v_{\text{опт}} = [2 \cdot 4 \cdot (18 + 1)]^{\frac{1}{2}} = 12,3 \text{ м/с} = 44 \text{ км/ч.}$$

Соответствующая этой скорости максимальная пропускная способность полосы движения

$$P_m = \frac{3600}{1,5 + \frac{12,3}{2 \cdot 4} + \frac{18+1}{12,3}} = 784 \text{ авт./ч.}$$

Из приведенных зависимостей для расчета пропускной способности видно, что она зависит от технических параметров транспортного средства. Таким образом, при расчетах имеет большое значение, какие транспортные средства движутся по данной дороге.

Составом транспортного потока называется соотношение различных типов транспортных средств, движущихся по дороге. В расчетах все типы транспортных средств приводятся к условному легковому автомобилю. Для этого используют коэффициенты приведения, отображающие увеличение или уменьшение количества легковых автомобилей, которые могут проехать взамен данного типа транспортного средства. Коэффициенты приведения интенсивности движения назначаются для определенной группы транспортных средств, как это приведено в таблице 2.3. Для автомобильных дорог коэффициенты приведения принимаются на основании СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги»¹.

Таблица 2.3. Коэффициенты приведения интенсивности движения

Тип транспортного средства	Коэффициент приведения
1	2
Легковые автомобили	1,0
Грузовые автомобили грузоподъемностью, т	
· до 2	1,5
· 2–6	2,0
· 6–8	2,5
· 8–14	3,0
· свыше 14	3,5

¹ Положения данного СП более детально раскрыты в Руководстве по проектированию городских улиц и дорог, ЦНИИП Градостроительства. — Стройиздат, М.: 1980. Для определения интенсивности движения на автодорогах следует использовать ОДМ 218.2.032–2013 «Методические рекомендации по учету движения транспортных средств на автомобильных дорогах».

Окончание таблицы 2.3

1	2
Автопоезда грузоподъемностью, т	
· до 12	3,5
· 12–20	4,0
· 20–30	5,0
· свыше 30	6,0
Автобусы	2,5
Троллейбусы	3,0
Автобусы и троллейбусы особо большого класса	4,0
Трамваи	6,0
Мотоциклы и мопеды	0,5
Велосипеды	0,3

Таким образом, чем больше в потоке грузовых автомобилей, чем больше их грузоподъемность, тем меньше пропускная способность дороги.

В конкретных условиях отдельные группы транспортных средств могут отсутствовать или укрупняться, например, при использовании для получения данных по интенсивности движения датчиков (детекторов), которые по своим техническим возможностям не могут обеспечить детальное распознавание типа транспортного средства.

Следует отметить, что значение коэффициента приведения интенсивности движения зависит от технических параметров транспортных средств и должно периодически уточняться в соответствии с изменениями этих параметров. Помимо этого, требует дополнительных исследований само влияние параметров транспортных средств на значение коэффициента приведения. Поэтому не только у разных специалистов, но и в различных нормативных документах приводятся отличающиеся рекомендации по значениям коэффициентов приведения. Так, в Методических указаниях¹ рекомендуется для грузовых автомобилей применять коэффициенты приведения: для малой грузоподъемности — 1,4; средней — 1,7; большой — 2,3; автопоездов — 3,5 и для автобусов — 2,9.

¹ Методические указания по проектированию кольцевых пересечений автомобильных дорог, Минавтодор РСФСР. М.: Транспорт, 1980.

На дорогах с несколькими полосами для движения в одном направлении пропускная способность дороги не может определяться простым умножением пропускной способности полосы на их количество. Это объясняется сменой полосы движения водителями для поддержания выбранной скорости движения, выполнения поворотов и разворотов, остановки транспортного средства. Время выполнения маневра зависит от плотности транспортного потока. При небольшой интенсивности движения смена полосы движения практически не сказывается на пропускной способности дороги, но при значительной интенсивности движения смена полосы всегда вызывает задержку движения как на полосе, с которой перестраивается транспортное средство, так и на полосе, на которую оно перестраивается. Это объясняется необходимостью поиска достаточного интервала между транспортными средствами для перестроения. Продолжительность выполнения маневра можно оценить по формуле

$$t_m = t_{ож} + t_{сн}(n-1),$$

где: $t_{ож}$ — продолжительность ожидания возможности выполнения маневра, с; $t_{сн}$ — продолжительность выполнения маневра, с; n — количество изменяемых для движения полос.

Количество выполняемых водителями смен полос движения зависит от длины перегона, средней скорости движения, плотности потока, наличия мест транспортного притяжения, разветвлений и слияний автомобильных дорог и т. п. и должно учитываться при оценке пропускной способности многополосной дороги. Для этого можно использовать коэффициент снижения пропускной способности полосы, значение которого устанавливается опытным путем для конкретных условий движения. Для крайней правой полосы значение этого коэффициента составляет 1; для второй ориентировочное значение — 0,8; третьей — 0,6; четвертой — 0,5. С учетом суммы этих коэффициентов определяется суммарная пропускная способность проезжей части. Так, для двухполосной дороги она составит 1,8 от пропускной способности одной полосы, для трехполосной — 2,4; для четырехполосной — 2,9.

На регулируемых пересечениях пропускная способность определяется параметрами светофорного регулирования

$$P_{пр} = \frac{3600}{T_{ц}} \cdot \frac{t_3}{t_m},$$

где: $T_{ц}$ — продолжительность цикла светофорного регулирования, с; t_3 — продолжительность разрешенной фазы для рассматриваемого направления движения, с; t_m — интервал между следующими через перекресток транспортными средствами, с.

Регулируемые пересечения являются ограничивающими элементами, определяющими пропускную способность участка дороги (улицы). Пропускная способность регулируемого пересечения будет тем больше, чем больше отношение длительности разрешающего сигнала к длительности светофорного цикла.

Если принять наиболее распространенные значения переменных, то пропускная способность условного перекрестка для автобусов ЛиАЗ-6213, двигающихся по выделенной полосе, составит

$$P_{пр} = \frac{3600}{90} \cdot \frac{40}{6} = 266 \text{ авт./ч.}$$

2.2. Методы и алгоритмы сбора данных о транспортных передвижениях

Существует большое разнообразие методов получения информации о транспортных передвижениях населения городов. Для того чтобы эти методы представляли собой некую упорядоченную систему, их нужно определенным образом классифицировать. Начальным пунктом при разработке любой классификации является выбор главного классификационного признака, от которого в дальнейшем будет зависеть вся структура создаваемой классификации. Применительно к вопросу транспортных обследований населения городов таким признаком может быть способ проведения обследования, его целевое назначение, характер использования полученной информации и т. д.

В качестве основного признака для классификации выберем целевое назначение обследования, т. к. данный признак определяет объем, состав, способы получения и обработки исходной и результативной информации, а также характер ее практического использования (рис. 2.10).

По целевому назначению обследования все методы можно разделить на два крупных класса. К первому относятся те виды, которые связаны с обследованием транспортных потребностей населения, ко второму — те, которые связаны с обследованием действующей системы его транспортного обслуживания, т. е. проводимые непосредственно в существующей транспортной системе.

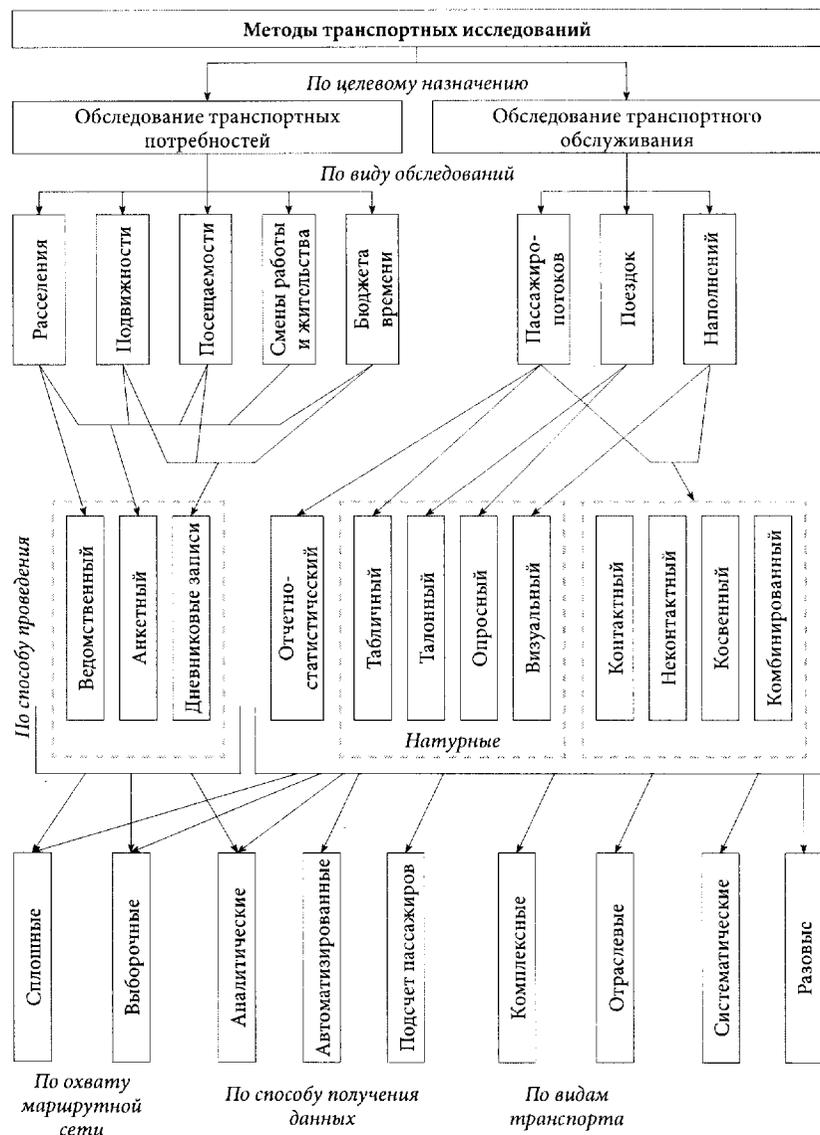


Рис. 2.10. Методы транспортных обследований городского населения

Обследования транспортных потребностей населения проводятся для получения информации о закономерностях и особенностях формирования и проявления спроса на пассажирские перевозки. К данному классу относят обследования расселения, подвижности населения, посещаемости учреждений обслуживания, причины перемены мест работы или жительства и бюджета (затрат) времени.

Обследования транспортного обслуживания населения. Ключевой целью данного типа обследований, проводимых на городском транспорте общего пользования, является получение сведений о текущем уровне удовлетворения спроса населения на пассажирские перевозки при действующей системе транспортного обслуживания.

Данный тип обследований позволяет получить информацию для решения комплекса задач, направленных на повышение качества транспортного обслуживания населения и эффективности производственной деятельности самой системы и поэтому наиболее отвечает целям работы.

Оба приведенных выше класса транспортных обследований в зависимости от структуры и объема получаемой информации можно подразделить по виду обследования. К видам обследований транспортных потребностей населения относятся: обследования расселения, подвижности, посещаемости учреждений обслуживания, причины перемены места работы или жительства и бюджета времени, а к видам обследований транспортного обслуживания — обследования поездок, пассажиропотоков и наполняемости подвижного состава.

Обследования расселения позволяют установить закономерности расселения жителей города по отношению к местам их трудовой деятельности, а также определить различные характеристики трудовых передвижений. Информация, полученная в результате данного вида обследований, применяется при разработке генеральных планов городов, комплексных схем развития пассажирского транспорта и при решении таких вопросов, как разделение времени начала и конца рабочего дня для предприятий и организаций города, улучшение транспортного обслуживания промышленных зон и отдельных крупных предприятий.

Обследования подвижности населения проводятся для определения характеристик и установления закономерностей передвижений различных групп населения по всевозможным целям с использованием транспорта и пешком. Целью этого вида обследований является оценка

транспортного спроса, а также определение текущего уровня транспортного обслуживания населения и накопление информации для последующего прогнозирования. Проведение обследований подвижности населения дает более полную информацию, чем обследование расселения, поскольку материалы, получаемые в результате этого вида обследований, включают в себя данные о трудовых передвижениях населения, а, следовательно, и о закономерностях расселения (мест проживания) относительно мест приложения труда.

Обследования посещаемости учреждений культурно-бытового назначения проводятся в случае необходимости обоснования размещения культурно-бытовых учреждений при разработке генпланов городов или проектов реконструкции отдельных районов. Такого рода обследования позволяют более подробно изучить структуру и последовательность передвижений населения с различными целями. Обследования этого вида могут проводиться непосредственно в местах посещения учреждений или по месту жительства.

Обследования причин перемены мест приложения труда (работы) или проживания (жительства) необходимы для прогнозирования закономерностей расселения при разработке генплана и комплексных схем развития пассажирского транспорта. Эти обследования позволяют выявить тенденции изменения закономерностей расселения жителей города в зависимости от их социально-демографических характеристик.

Обследования бюджета времени позволяют выявить всевозможные закономерности тяготения жителей города к учреждениям массового посещения и спрогнозировать подвижность населения по разнообразным целям.

Обследования поездок позволяют получить сведения о внутримаршрутных корреспонденциях пассажиров, величинах и направлениях пассажиропотоков на маршрутах городского пассажирского транспорта (ГПТ), пассажирооборотах остановочных пунктов и наполнении подвижного состава на транспортной сети или ее участках. Таким образом, обследования поездок включают в себя также информацию о пассажиропотоках и наполнении подвижного состава, но главное отличие их от соответствующих видов обследований состоит в получении данных о межстаночных корреспонденциях. Результаты данно-

го вида обследований используются для оценки качества транспортного обслуживания, установления рациональных показателей использования подвижного состава, анализа причин и выявления тенденций изменения различных показателей работы транспорта в зависимости от различных аспектов жизни городского населения.

Обследования пассажиропотоков во многом схожи с обследованиями поездок. Различие между ними заключается в отсутствии у первых информации о межстаночных корреспонденциях пассажиров. Поэтому эти два вида обследований часто именуют обследованиями пассажиропотоков.

Обследования пассажиропотоков предполагают более узкие цели и могут проводиться отдельно на каждом виде транспорта без выявления пересадочности.

Обследования наполняемости проводятся для получения информации об уровне использования подвижного состава на всей транспортной сети города или на ее отдельных участках. Этот способ основан на приближенных глазомерных оценках наполнений подвижного состава. Чаще всего проводятся частичные визуальные обследования. Информация, получаемая в результате данного вида обследований, используется транспортными предприятиями только в оперативных целях, поскольку она весьма ограничена по своему содержанию и объему.

Каждый вид обследования имеет определенный способ проведения. Причем для некоторых видов могут применяться одинаковые способы. Так, *по способу проведения* обследования могут быть ведомостными, анкетными, обследованиями по дневниковым записям, натурными, автоматизированными и отчетно-статистическими.

Ведомственный способ заключается в заполнении специальных листов-ведомостей, как правило, отделами кадров предприятий, в которых фиксируются адреса предприятий и мест жительства обследуемых, а в некоторых случаях и принадлежность их к той или иной социальной группе. Такой способ позволяет составить матрицу трудовых корреспонденций между различными районами города, хотя в ней и отсутствуют сведения о способах передвижения, маршрутах следования и пересадках.

Анкетный способ основан на заполнении гражданами или специальными учетчиками анкет опроса о количестве поездок, цели и способах передвижения, маршрутах следования, местах пересадки, времени пе-

редвижения и для выяснения других вопросов, в зависимости от цели проводимого обследования. Он позволяет получить информацию о трудовых передвижениях, маршруте следования и способе передвижения, пересадках, а также времени, затрачиваемом на передвижение. Анкетный метод позволяет получать наиболее обширную информацию для изучения не только пассажиропотоков, но и социальной структуры пассажиров, степени удовлетворения спроса населения на транспортные услуги, оценки качества транспортного обслуживания пассажиров, затрат населения на транспортные передвижения и иных вопросов. В зависимости от поставленных целей для получения информации используются анкеты различной формы. Опыт показывает, что для получения наиболее точной и достоверной информации следует использовать простые вопросы, не требующие выполнения опрашиваемыми арифметических действий и логических умозаключений. Форма анкет должна быть тщательно продумана и допускать возможность их автоматизированной обработки. Обследования проводятся по месту жительства или по месту работы. Попытки проведения массового опроса населения путем рассылки анкет по почте у нас в стране распространения не получили по причине малого процента возврата анкет.

Обследования по дневниковым записям проводятся для изучения отдельных аспектов подвижности небольшого количества людей различных групп населения. Дневниковые записи ведутся в течение некоторого периода времени (день, неделя или месяц, год или несколько лет). Этот способ используется при получении информации о подвижности населения, посещаемости учреждений культурно-бытового характера и обследовании бюджета времени.

Отчетно-статистический способ обследования оперирует данными билетно-учетных листков и количества проданных билетов.

Натурный способ проведения обследования заключается в непосредственном подсчете количества перевезенных пассажиров. Натурные обследования в свою очередь могут быть талонными, табличными, визуальными, силуэтными и опросными.

При *талонном* способе каждому пассажиру при входе в транспортное средство выдают специальный талон с отмеченным номером остановки посадки. При выходе талон у пассажира изымают и отмечают на нем номер остановки высадки. В случае пересадки пассажир надры-

вает соответствующую надпись на талоне. На конечных остановках учетчики сдают использованные за рейс талоны кондуктору и получают новые. Этот способ обследования один из наиболее часто проводимых в городах, однако он же является и одним из наиболее трудоемких для проведения и сложных в организационном плане. Для обследования каждой единицы подвижного состава необходимо 2–3 учетчика (в зависимости от количества дверей, используемых для посадки/высадки пассажиров), а в часы пик даже более, для отдельного подсчета входящих и выходящих пассажиров различными учетчиками. Для проведения обследования необходима предварительная подготовка, которая заключается в определении необходимого количества учетчиков и составлении программы обследования с указанием сроков его проведения. Качество получаемой информации зависит от подготовленности учетчиков и контролеров, а также осведомленности пассажиров.

При *табличном* способе в салоне автобуса возле каждой двери располагаются учетчики, которые снабжены таблицами обследования. По каждому остановочному пункту они фиксируют количество входящих и выходящих пассажиров, заполняя соответствующие графы таблиц. Кроме того, в таблицах указываются данные о типе подвижного состава, номере маршрута, номере выхода, рейсе, смене, времени отправления и наименования остановочных пунктов. Учет пассажиров ведется раздельно каждым учетчиком, а обработка полученных данных производится совместно. При этом таблицы группируют по маршрутам, выходам и сменам работы подвижного состава. Форма таблиц должна допускать возможность их дальнейшей обработки.

Визуальный способ, иначе называемый глазомерным, заключается в сборе информации на остановочных пунктах со значительным пассажирообменом. Применяется, в основном, при выборочных обследованиях. Учетчики визуально определяют наполнение транспортного средства по условной балльной системе (5, 6, 8-балльной), непосредственным указанием коэффициента наполнения или применяют набор силуэтов транспортного средства, соответствующих определенному наполнению. Эти данные заносят в таблицу соответственно марке и модели транспортного средства. Кроме того, в таблицу заносится время прибытия транспортного средства и номер маршрута. Зная вместимость транспортного средства и его наполнение, можно определить фактическое число пассажиров.

При 6-балльной системе оценки каждому баллу соответствует силуэт транспортного средства со следующими уровнями использования его вместимости:

- 6 баллов — предельная вместимость (более 5 пассажиров на 1 м² свободной площади пола транспортного средства при полностью занятых местах для сидения);
- 5 баллов — нормативная вместимость (5 пасс./м² при полностью занятых местах для сидения);
- 4 балла — около 1/2 нормативной вместимости (2–3 пасс./м² при полностью занятых местах для сидения);
- 3 балла — 100% заполнение мест для сидения (при отсутствии стоящих пассажиров);
- 2 балла — заполнение около 2/3 мест для сидения (при отсутствии стоящих пассажиров);
- 1 балл — заполнение около 1/3 мест для сидения (при отсутствии стоящих пассажиров).

Полученные в результате обследования данные используются для определения количества транспортных средств, необходимых для обслуживания конкретных маршрутов, и составления оптимальных расписаний их движения по этим маршрутам.

Опросный способ имеет сходство с табличным, но в отличие от него позволяет получить информацию о корреспонденциях пассажиров. Учетчики находятся в салоне автобуса и опрашивают входящих пассажиров о пункте назначения, выхода, пересадки, цели поездки и фиксируют эту информацию.

Проведение обследований работы городского общественного транспорта и обработка результатов являются очень трудоемкими процессами, поэтому на практике все большее распространение получают *автоматизированные методы*, обеспечивающие получение и обработку информации без участия людей. Можно выделить четыре группы методов автоматизированного обследования пассажиропотоков: контактные, неконтактные, косвенные и комбинированные.

В *контактных методах* пассажиры непосредственно воздействуют на технические устройства. Одна из реализаций такого метода состоит в том, что жители вводят информацию о потребностях в перемещении в полуавтоматические устройства, размещаемые в крупных пассажирообразующих и пассажиропоглощающих узлах.

Другой способ заключается в использовании датчиков электрических импульсов, вмонтированных в ступеньки дверей транспортного средства. При воздействии пассажиров на ступеньки с помощью них определяется направление движения пассажира и осуществляется подсчет количества вошедших и вышедших пассажиров. Недостатком такой системы является большая неточность (до 25%) работы в часы пик.

Неконтактные методы основаны на использовании фотоэлектрических приборов. При этом в дверных проемах автобусов устанавливаются фотопреобразователи, по два на каждое направление движения пассажиров. При входе или выходе пассажиры пересекают пучок световых лучей, поступающих к фотодатчикам, и при этом происходит фиксация движения пассажиров. Недостатком этого метода является высокая стоимость, а также сложность работы в условиях переполнения транспортного средства.

При *косвенном методе* учета с помощью специальных устройств взвешивают одновременно всех пассажиров автобуса. В качестве таких устройств используют тензометрические преобразователи, расположенные на подушках рессор. В дальнейшем, для получения количества пассажиров, суммарная масса делится на среднюю (70 кг). Все показания записываются на диаграммной бумаге во времени с помощью самопишущего прибора. В результате проведения обследования данные предстают в виде эпюр изменения пассажиропотока во времени. Недостатком метода является необходимость отдельной посадки и высадки пассажиров на остановочном пункте.

Комбинированный метод учета пассажиров заключается в одновременном использовании двух типов датчиков — массового и фотоэлектрического. При входе в транспортное средство пассажиры наступают на нижние, а затем на верхние контактные ступеньки. Сигналы от пары ступенек и открытия дверей поступают в блок управления, где происходит их логическая обработка, затем фиксация в памяти устройства.

Перечисленные выше методы изучения пассажиропотоков можно условно разделить на три группы в зависимости от *способа получения необходимой информации*: методы, основанные на подсчете числа перевозимых пассажиров; методы получения информации с помощью приборов (автоматизированные) и аналитические (расчетные) методы, основанные на прогнозировании вероятной величины пассажиропотоков.

По *длительности охватываемого периода* различают систематические и разовые обследования. *Систематические* обследования, как сле-

дует из названия, проводятся с определенной периодичностью, как правило, работниками службы эксплуатации предприятий общественного транспорта. *Разовые* обследования проводятся по определенной программе в зависимости от поставленных целей. При проведении разовых обследований важно объективно выбрать время их проведения для получения адекватных данных. Для выбора месяца года проведения обследований рассчитывают коэффициент сезонной неравномерности объемов перевозок для каждого месяца

$$K_{с.и.i} = \frac{Q_{mi} n_r}{Q_r n_{mi}}$$

где: Q_{mi} — объем перевозок пассажиров в i -ом месяце, пасс.; Q_r — объем перевозок пассажиров за год, пасс.; n_r — количество дней работы транспорта в году, дн.; n_{mi} — количество дней работы транспорта в i -ом месяце, дн.

Обследования проводят в месяце, для которого значение $K_{с.и.i}$ наиболее близко к 1¹. При выборе дня проведения обследования необходимо рассчитать коэффициент недельной неравномерности пассажиропотоков

$$K_{н.и.i} = \frac{n_r \sum Q_{д.и.i}}{m_j Q_{mi}}$$

где: n_{mi} — количество дней в i -ом месяце, дн.; $Q_{д.и.i}$ — объем перевозок в j -й день недели, пасс.; m_j — количество j -х дней недели в i -ом месяце, дн.; Q_{mi} — объем перевозок в i -ом месяце, пасс.

По ширине охвата транспортной сети различают сплошные и выборочные обследования. Сплошные обследования проводятся на всей транспортной сети обслуживаемого региона одновременно. Они требуют больших затрат трудовых ресурсов. По результатам обследования решаются вопросы функционирования транспортной сети, ее развития, изменения схемы маршрутов, выбора видов транспорта и координации их работы. Выборочные обследования проводятся по отдельным

¹ Методологические рекомендации по проведению обследования по определенной степени использования общественного транспорта различными категориями граждан (транспортной подвижности граждан). Утверждены Госкомстатом России 19.12.2001.

районам движения, маршрутам или конфликтным точкам с целью решения локальных, частных и более конкретных задач. При выборочном способе обследованию подвергается лишь определенная часть пассажиропотока, маршрутов и графиков движения транспортных средств, а также часть различных категорий граждан, пользующихся услугами транспорта общего пользования. При этом выбранная для обследования часть из общего объема перевозок и общей численности населения города должна носить представительский характер, т. е. быть репрезентативной, отражая все характеристики, присущие генеральной совокупности (общему объему перевозок пассажиров и общей численности населения).

Минимальный объем выборки определяется из формулы предельной ошибки выборки

$$\Delta = t \sqrt{\sigma^2/n},$$

следовательно,

$$n = t^2 \sigma^2 / \Delta^2.$$

При известном объеме генеральной совокупности объем выборки, обеспечивающий ее репрезентативность, определяется как

$$n = \frac{N t^2 \sigma^2}{N \Delta^2 + t^2 \sigma^2},$$

где: N — объем генеральной совокупности; t — критерий Стьюдента, определяющий доверительный интервал¹ оцениваемого параметра, получаемый по специальным таблицам; σ^2 — дисперсия; Δ — предельная ошибка выборки.

При расчете доверительного интервала устанавливают вероятность, с которой истинное значение параметра x будет находиться в установленных пределах от среднего значения X , — доверительный уровень:

$$P = P(X - \Delta x < X < X + \Delta x).$$

Данное выражение обозначает, что с вероятностью результат не выходит за пределы доверительного интервала от $X - \Delta x$ до $X + \Delta x$, т. е.

¹ Доверительным интервалом какого-либо параметра генеральной совокупности называется случайная область значения этого параметра, которая с вероятностью, близкой к единице, содержит истинное значение этого параметра.

2Δх. Причем чем выше надежность нахождения параметра в доверительном интервале, тем большим получается соответствующий доверительный интервал, и наоборот, чем больше задается доверительный интервал Δх, тем больше вероятность, что результаты измерений будут внутри этого интервала.

Обычно доверительный уровень устанавливается 90, 95 или 99%. Для этих значений при достаточно большом объеме выборки значения критерия Стьюдента равны соответственно 1,65; 1,96 и 2,58.

Например, если необходимо определить среднее время поездки в определенное время между двумя районами 10 тыс. человек с доверительным уровнем 90% при Δ=0,1 (10%) и известно, что σ²=25, то необходимо измерить время поездки следующего количества человек:

$$n = \frac{10000 \cdot 1,65^2 \cdot 25}{10000 \cdot 0,1^2 + 1,65^2 \cdot 25} = \frac{680625}{100 + 68} = 4051.$$

Таким образом, для оценки среднего времени поездки 10 тыс. человек достаточно произвести около 4 тыс. измерений. Как правило, для точного определения дисперсии необходимо сделать не менее 100 измерений и после этого уточнить значение *n*.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ПРЕДЛОЖЕНИЯ

3.1. Описание транспортной сети

Транспортная сеть является физическим носителем всех перемещений, имеющих место на территории моделируемого города, региона, страны. Совокупность данных о текущем состоянии транспортной сети региона, включающая значения параметров состояния автомобильных дорог и железнодорожных путей, авиа- и водных сообщений, а также информацию о структуре подвижного состава транспортных средств, с помощью которых осуществляются перевозки в сети, расписаниях движения транспорта общего пользования и режимах регулирования движения в узловых пунктах сети, формирует транспортное предложение.

В модели транспортного предложения отображаются сети всех видов транспорта:

- пешеходного движения;
- индивидуального автомобильного транспорта;
- транспорта общего пользования;
- других видов транспорта (например, водного, велосипедного, железнодорожного транспорта), если это требуется для решения задачи, при построении модели.

Модель транспортного предложения дает представление о возможностях существующей транспортной инфраструктуры планируемой территории с требуемой степенью точности. При этом требования к степени детализации данных о транспортном предложении определяются самим объектом моделирования и конкретным кругом задач транспортного планирования, для решения которых строится транспортная модель.

На выходе модель транспортного предложения формирует матрицы затрат — таблицы, содержащие оценки временных и денежных затрат, затрат на преодоление расстояния и прочих затрат на перемещение между каждой парой транспортных районов.

Транспортная сеть представляется в виде направленного графа (рис. 3.1), ребрами которого являются направленные отрезки (участки) дорог, а узлами выступают пересечения и примыкания. Для направленных отрезков, с помощью которых отображается часть дороги с движением в одном направлении, задаются следующие атрибуты:

- длина, км;
- скорость движения при свободном потоке, км/ч;
- пропускная способность, приведенные легковые единицы за интервал времени;
- количество полос движения в каждом направлении (для автомобильных дорог);
- список допустимых систем транспорта для движения по дороге;
- категория дороги.

Этот список можно расширить или сократить в зависимости от объема и специфики конкретной задачи моделирования. При большей де-



Рис. 3.1. Граф улично-дорожной сети

тализации графа увеличивается количество объектов сети, что в свою очередь может усложнять модель и, соответственно, увеличивать время расчета.

Категории автомобильных дорог следует задавать на основе данных о действительном состоянии дороги и руководствоваться «Правилами классификации автомобильных дорог в Российской Федерации и их отнесении к категориям автомобильных дорог», утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 28.09.2009 г. № 767. Классификация городских дорог осуществляется согласно СП 42.13330.2011 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений», а классификация загородных дорог — согласно СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги».

Для модельного описания состава и структуры транспортных потоков, формирующих нагрузку на транспортную сеть, а также определения списка допустимых видов транспорта для движения на отрезках транспортной сети и поворотах необходимо ввести в модель данные обо всех видах транспортных средств, посредством которых осуществляются перевозки на территории моделируемого региона. Различные виды транспорта представляются в модели с помощью систем транспорта. Каждая система транспорта связана с одним или несколькими сегментами спроса через режимы. Режимы используются для моделирования возможности перемещения с использованием нескольких систем транспорта последовательно в течение одной поездки (корреспонденции), например, участники движения одного сегмента спроса общественного транспорта имеют возможность сменить систему транспорта в рамках одной поездки с автобуса на метро, а затем опять на автобус. На рисунке 3.2 представлен пример связей между системами транспорта, режимами, сегментами спроса и матрицами корреспонденций.

Сегмент спроса используется для моделирования перемещений с использованием одной или нескольких систем транспорта (на основе связанного с ним режима) различных групп людей с отличающимися предпочтениями. Сегменты спроса связаны с матрицами корреспонденций. Каждому сегменту спроса соответствует одна матрица корреспонденций.

Кроме указанной выше информации, данные по транспортной сети должны описывать и учитывать при расчетах разрешенные маневры на перекрестках (повороты) для каждой моделируемой системы транс-

порта. При значительном влиянии режима регулирования перекрестков на транспортные потоки в области моделирования также необходимо учитывать:

- режим регулирования перекрестка (регулируемое или нерегулируемое пересечение и т. д.);
- средние базовые задержки при проезде перекрестка или поворота;
- пропускную способность перекрестка или поворота.

Граф транспортной сети должен быть связным, иными словами, должен существовать путь между любой парой узлов. Для моделирования различных видов автомобильного транспорта должен использоваться единый граф сети, позволяющий учитывать взаимное влияние нагрузки на участки автомобильных дорог различных видов транспорта (грузовой в зависимости от грузоподъемности, индивидуальный (личный легковой) и т. д.).

При необходимости учета в модели пассажиропотоков на транспорте общего пользования необходимо собрать данные по структуре сети

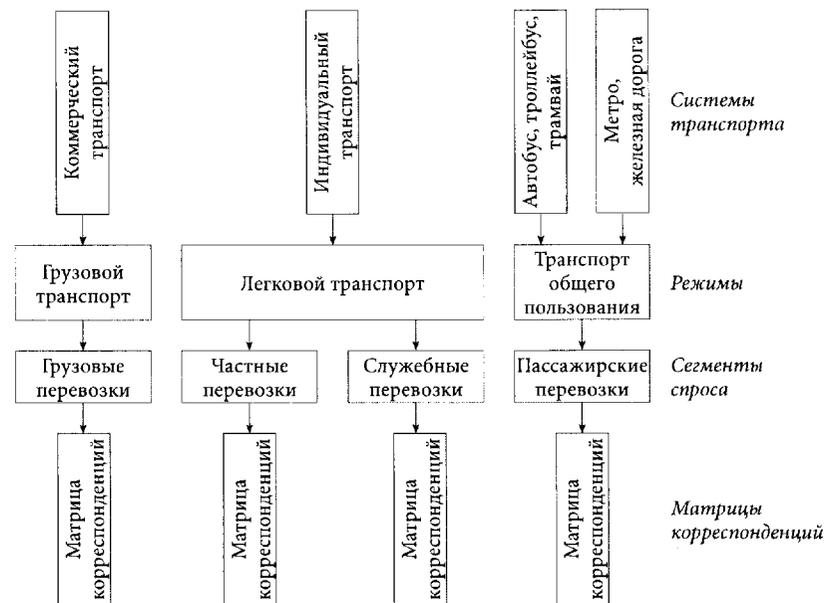


Рис. 3.2. Состав и структура транспортных потоков PTV VISUM

общественного пассажирского транспорта, что включает в себя (данный список и его детализация зависит от задач исследования):

- данные по прохождению маршрутов;
- местоположение остановочных пунктов;
- расписание / интервал движения по маршрутам;
- данные по каждому виду транспортного средства, в том числе вместимость, с привязкой к маршрутам;
- стоимость проезда.

Для учета в модели в полной мере характеристик транспортного движения по сети необходимо описать динамику движения транспортного потока. Главной характеристикой динамики транспортного потока является изменение скорости движения в зависимости от условий движения: максимальная разрешенная скорость, желаемая скорость движения для водителей при свободном потоке, пропускная способность дороги, качество покрытия, уровень загрузки и т. д. Рассматриваемые модели на макроуровне являются статическими моделями, так как показывают значение нагрузки (интенсивности) на участках транспортной сети за определенный период времени (за сутки, час). Для описания динамики транспортных потоков в таких моделях используются функции ограничения пропускной способности, часто называемые сокращенно CR-функциями¹ или VD-функциями², которые описывают аналитическую зависимость времени прохождения отрезков графа от уровня загрузки и времени при свободном потоке (при нулевом уровне загрузки). Таким образом, в качестве базовых характеристик динамики любого участка автомобильной дороги используются:

- время движения на отрезке при свободном потоке;
- пропускная способность отрезка.

Под временем движения на отрезке при свободном потоке понимается время, которое транспортное средство данного типа затрачивает на перемещение по отрезку из одного его конца в другой, двигаясь с постоянной скоростью, равной скорости движения на данном отрезке при свободном потоке

$$t_{\text{акт}} = f(z, t_0),$$

¹ CR — *capacity-restraint* — плотность движения — ограничения в движении.

² VD — *volume-delay* — объем (интенсивность) движения — задержки.

где: z — уровень загрузки участка дороги, $z = N/P$; N — расчетная интенсивность движения, ед./ч; P — пропускная способность, ед./ч; t_0 — время движения на отрезке при свободном потоке, ч.

Одной из наиболее часто используемых в практике транспортного моделирования CR-функций является так называемая BPR-функция, предложенная Bureau of Public Roads, США. Эта функция задается как

$$t = t_0 (1 + a z^b),$$

где: a и b — параметры функции.

Параметр a показывает, на сколько процентов время в пути при полном использовании пропускной способности дороги превышает время в пути при свободном потоке, параметр b определяет скорость увеличения временных затрат по мере роста загрузки (рис. 3.3).

Характер изменения функции показывает, насколько важно правильно подобрать параметры, которые будут использоваться в модели. Повысить точность подбора функции можно на основе мониторинга реальных транспортных потоков и автоматизации обработки данных

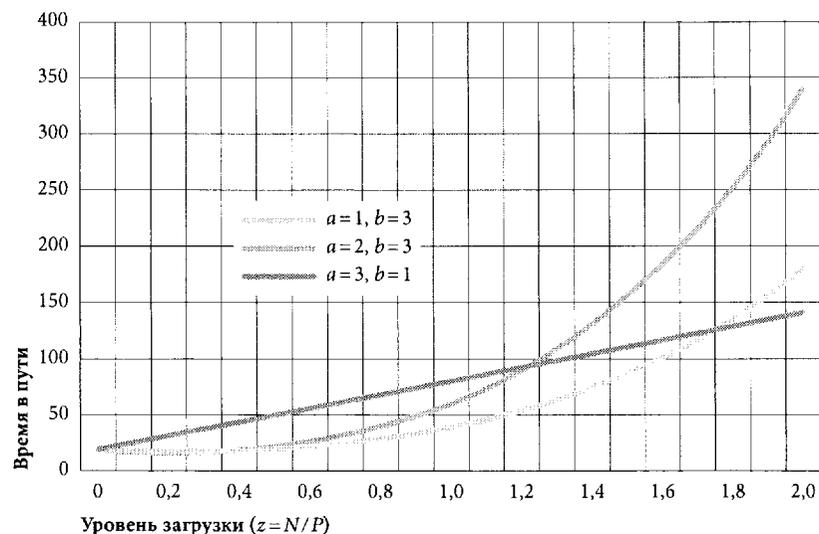


Рис. 3.3. График BPR-функции при различных значениях параметров

с соответствующих датчиков, установленных на УДС специально для мониторинга или используемых в составе систем управления дорожным движением.

3.2. Структура исходных данных для транспортного моделирования

Структура исходных данных для транспортного моделирования приведена в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Структура исходных данных

Данные	Пояснение	Формат
1	2	3
Данные улично-дорожной сети		
Граф улично-дорожной сети (УДС)	ГИС-данные по УДС для импорта в PTV VISUM в виде направленных отрезков и узлов с атрибутами по каждому направлению: название, максимальная разрешенная скорость, разрешенные виды транспорта, пропускная способность, количество полос и категория дорог (пешеходные зоны, городские дороги согласно СП 42.13330.2011 и загородные дороги согласно СП 34.13330.2012). При отсутствии возможна самостоятельная отрисовка УДС на основе фонового изображения или векторной карты OpenStreetMap	Shape (*.shp)
Организация дорожного движения (ОДД)	Разрешенные маневры по видам транспорта на перекрестках, тип регулирования на узле (неизвестно, помеха справа, знаки дорожного движения (ДД), светофорное регулирование, знак стоп, круговое движение и уступить дорогу и одностороннее движение). При отсутствии можно ОДД самостоятельно отрисовать с учетом чертежей (*.dwg), фонового изображения или спутниковых карт/панорам улиц	База данных (*.mdb)
Схемы пофазного разъезда светофорной сигнализации	Светофорные циклы с пофазными разъездами, включая пешеходные. Длительности горения сигнальных групп, длительность цикла регулирования, схема пофазного разъезда	База данных (*.mdb)
Улицы со стоянкой транспорта	Участки улиц, занятых под стоянки (парковки) автотранспорта (первая полоса, с одной стороны или с обеих сторон улицы) в виде базы данных, привязанной к УДС. При отсутствии можно использовать чертежи либо перечень улиц с указанием мест парковки	База данных (*.mdb)

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3
Данные общественного транспорта		
Маршрутная сеть городского пассажирского транспорта (ГПТ)	Маршруты движения ГПТ всех видов (социальные и несоциальные, легальные и нелегальные) в виде базы данных, привязанные к проходящим узлам, с остановочными пунктами и названиями предприятий-перевозчиков, обслуживающих маршрут. При отсутствии можно использовать чертежи либо список проходящих улиц, либо маршрутную сеть ГПТ не учитывать	База данных (*.mdb)
Остановочные пункты ГПТ	Расположение остановочных пунктов (X, Y и № привязанного направленного отрезка) с информацией о видах ГПТ, которые используют данный остановочный пункт, и среднее время остановки. При отсутствии можно использовать чертежи либо маршрутную сеть ГПТ не учитывать	База данных (*.mdb)
Расписание ГПТ	Интервал движения или расписание отправления в виде базы данных с привязкой к маршрутам ГПТ. При отсутствии можно использовать только маршрутную сеть без расписания/интервала движения	База данных (*.mdb)
Характеристика состава ГПТ	Общая вместимость подвижного состава ГПТ с привязкой к маршрутам ГПТ и количество сидячих мест. При отсутствии можно использовать только маршрутную сеть ГПТ без расписания/интервала движения	База данных (*.mdb)
Данные статистики		
Социально-экономические данные	Данные социально-экономической статистики: численность населения (по возрастным группам), трудоспособное население, количество рабочих мест (в разрезе видов экономической деятельности (разделов) согласно коду ОКВЭД), количество студентов по месту проживания, количество школьников по месту проживания, количество детей по месту проживания, количество мест в детских садах, количество учебных мест в школах, количество учебных мест в вузах, торговые площади с привязкой к номеру дома (транспортного района). При частичном отсутствии данных можно использовать только количество населения, количество рабочих мест и количество трудоспособного населения	База данных (*.mdb)
Данные грузооборота	Данные по грузообороту по отраслям с привязкой к номеру дома (транспортного района)	База данных (*.mdb)

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3
Данные обследования		
Транспортная подвижность населения	<p>Транспортная подвижность населения из социологических опросов:</p> <ul style="list-style-type: none"> · цели совершаемых перемещений, например, из дома на работу; · социально-экономические группы, совершающие перемещения с различными целями; · среднее количество совершаемых перемещений с различными целями различными социально-экономическими группами; · длительность совершаемых перемещений с различными целями различными социально-экономическими группами; · виды используемого транспорта для перемещений с различными целями различными социально-экономическими группами; · время начала перемещений с различными целями различными социально-экономическими группами; · статистическое распределение количества совершаемых жителями города и ближайшей области перемещений по различным целям и социально-экономическим группам; · статистическое распределение совершаемых жителями города и ближайшей области перемещений по длительности их совершения с разделением по целям перемещений, например, из дома на работу, видам используемого транспорта, например, легковой автомобиль или автобус и метро, и социально-экономическим группам, например, пенсионеры, студенты, занятые в экономике, с различным уровнем дохода; · статистическое распределение совершаемых жителями города и ближайшей области перемещений по видам транспорта; · статистическое распределение совершаемых жителями города и ближайшей области перемещений по времени их совершения с различными целями и различными социально-экономическими группами. <p>Для определения матриц корреспонденций необходимо количество перемещений с различными целями, совершаемых различными социально-экономическими группами с использованием различных видов транспорта между районами исследуемой области. При отсутствии данных необходимо их экспертным путем оценить и ввести в модели</p>	Таблица (*.xls)

Окончание таблицы 3.1

1	2	3
Транзитные маршруты	Основные маршруты движения транзитного транспорта (легкового и грузового) по территории города. Перечень магистралей со сложными условиями движения. Перечень магистралей или на картинке обозначение этих магистралей. При отсутствии можно не учитывать ограничения на транзитные потоки	Чертеж
Замеры интенсивности	Данные по обследованиям необходимы на перекрестках УДС (часовые пики: утро, день, вечер) и на всех вылетных магистралях (суточные замеры) с указанием количества автомобильного транспорта при маневрах в физических и приведенных единицах (легковой, грузовой с разбивкой по грузоподъемности, общественный) для калибровки модели. Данные по интенсивности транзитного транспорта, проезжающего через город	Таблица (*.xls)
Замеры пассажиропотока	Суточные данные о пассажиропотоке по маршрутам, остановочным пунктам и перегонам для калибровки модели	Таблица (*.xls)
Прогнозные данные		
Развитие УДС и ОДД	Перечень предполагаемых строящихся улиц, реконструируемых улиц, строящихся развязок и проекты организации движения с обозначениями	Чертеж
Генеральный план	Отчет и векторная карта Генерального плана с качественной и количественной информацией о развитии территории	Текст (*.doc) и Shape (*.shp)

3.3. Транспортное районирование

Для разработки транспортной модели необходимо точное и детальное описание функционально-пространственной структуры территории, которая описывается с помощью следующих объектов и данных:

- транспортное районирование: границы транспортных районов, положение центров тяжести транспортных районов;
- данные социально-экономической статистики по транспортным районам.

Под транспортным районом понимается элементарная функционально-пространственная единица области моделирования.

Транспортные районы выполняют в модели две основные функции:

- отражают структуру распределения функционально-пространственного потенциала области моделирования;
- формируют основу агрегированного описания состояния транспортной системы области моделирования.

Далее будут описаны основные принципы разделения области моделирования на транспортные районы.

При определении размера транспортных районов необходимо помнить, что при увеличении размера транспортного района возможно снижение точности модели, т. к. часть перемещений будет совершаться, с точки зрения модели, внутри транспортного района и не будет влиять на транспортную сеть. В то же время, при уменьшении размеров транспортных районов возможно увеличение подробности и точности модели одновременно с увеличением сложности калибровки и вычислений, а значит и времени расчетов.

Система районирования должна быть согласована с административным делением территории. Это обеспечивает возможность агрегировать полученные в модели результаты до уровня административных районов.

Наличие естественных и/или искусственных препятствий транспортному движению должно учитываться при формировании границ транспортных районов. Такими границами могут быть, например, естественные преграды, такие как железнодорожная магистраль, лесная полоса, река.

При проведении транспортного районирования необязательно следовать критерию равенства районов по площади или численности населения. Так, рекомендуется выделять более мелкие районы в тех областях территории, которые примыкают к наиболее загруженным и важным участкам транспортной сети.

Кроме того, важно учитывать функциональную принадлежность района, например, жилой, промышленный, деловой, культурно-исторический и торговый район.

По каждому району должны быть доступны, как минимум, следующие данные социально-экономической статистики:

- численность населения;
- численность занятого населения;
- количество мест приложения труда;

- численность студентов;
- количество мест учебы.

В моделях каждый транспортный район отображается с помощью границ района, а также центров тяжести (центроидов). Центр тяжести каждого района представляет собой, с точки зрения транспортной модели, условную географическую точку, в которой сконцентрированы все характеристики района. В реальности распределение этих характеристик по территории района, конечно, неоднородно.

Центры тяжести транспортных районов соединяются с узлами сети с помощью специальных отрезков, называемых примыканиями. Примыкания показывают существующие «выходы в сеть» из транспортных районов и характеризуют показатели затрат, которые участники движения несут для того, чтобы получить доступ к транспортной сети. В том случае, когда транспортное районирование соответствует кварталам, можно говорить о том, что примыкания являются модельным представлением путей пешеходного движения до остановочных пунктов общественного транспорта или стоянок индивидуальных транспортных средств (личных автомобилей), дворовых проездов от стоянок.

Важным аспектом при создании транспортной модели является определение области моделирования.

Область моделирования включает область исследования и ограничена кордонными районами, которые являются разновидностью транспортных районов, но не имеют пространственных границ и информации по социально-экономическим данным (т. к. не ограничены в пространстве) и показывают точки генерации и притяжения транспортных и/или пассажирских потоков на границах области моделирования.

Для определения размера и границы области моделирования рассматриваются область исследования (например, это может быть участок проектируемой дороги и ближайшая область вокруг него или исследуемый город, регион) и все потоки, которые тяготеют к области исследования. Областью тяготения является вся пространственная область, генерирующая или притягивающая транспортные и/или пассажирские потоки, формирующие нагрузку на транспортную сеть области исследования. Другими словами, область тяготения оказывает влияние на интенсивность движения в области исследования (рис. 3.4).

На основе анализа тяготеющих потоков определяются «выходы и входы» в транспортную сеть из внешних мест генерации и притяжения

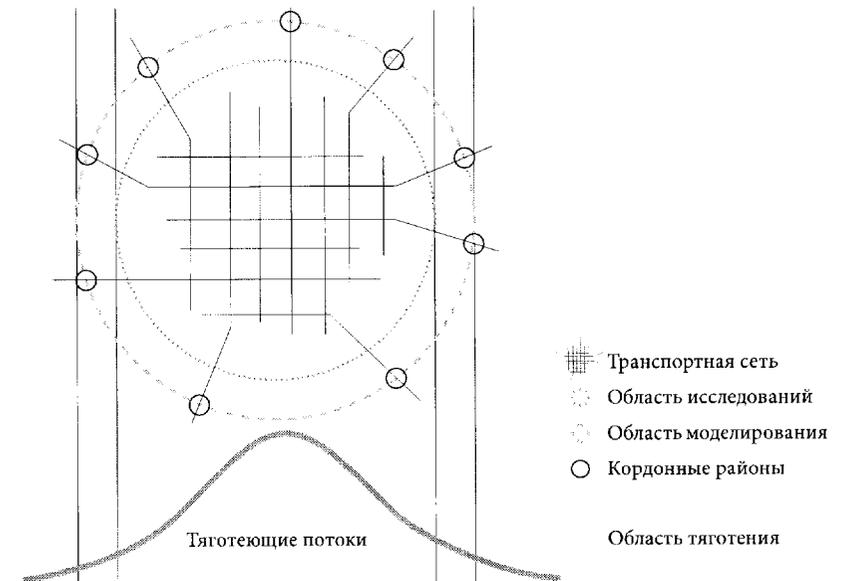


Рис. 3.4. Область транспортного моделирования

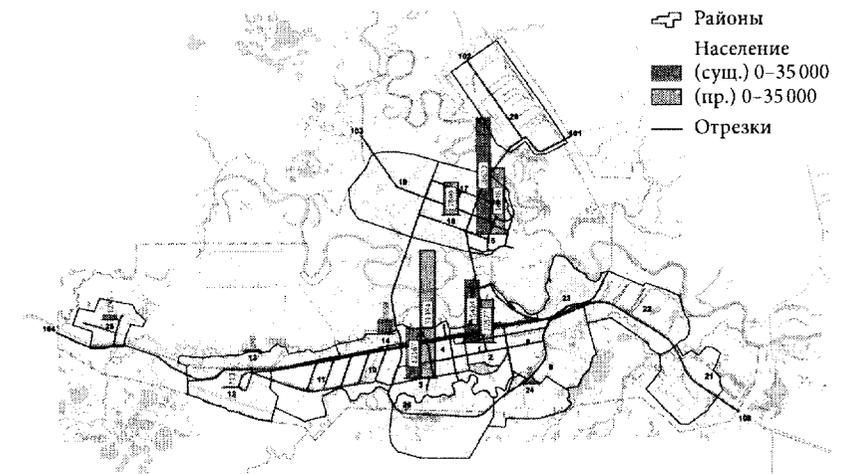


Рис. 3.5. Транспортное районирование в модели PTV VISUM

потоков, которые оказывают существенное влияние на объем транспортного и/или пассажирского потока в области исследования. В этих точках определяются кордонные районы, которые являются границами области моделирования.

Пример транспортного районирования в модели PTV VISUM показан на рисунке 3.5. Транспортные районы имеют явные границы, характеризующие их территорию и данные социально-экономической статистики.

Пример 1. Создание транспортной модели в PTV VISUM.

1. Подготовка PTV VISUM

Перед началом оцифровки транспортной сети желательно создать классификацию дорог, задав для каждого типа необходимые характеристики в соответствии с таблицей 3.1.

Задать системы транспорта (рис. 3.6). Описание систем транспорта и их взаимосвязь с режимами и сегментами спроса представлены в разделе 3.1 и на рисунке 3.2.

2. Оцифровка транспортной сети

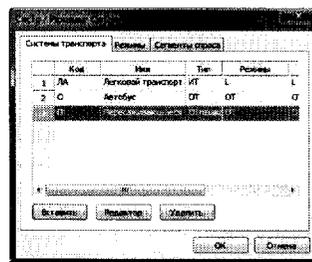


Рис. 3.6. Определение транспортных систем

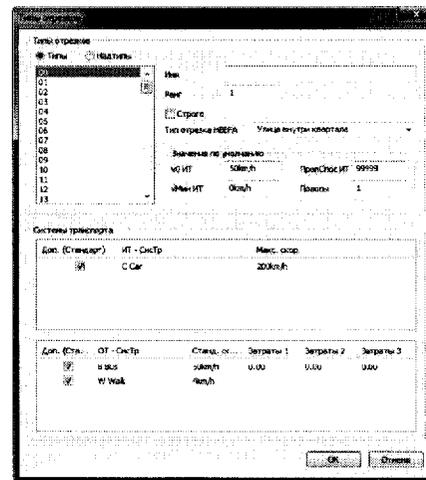


Рис. 3.7. Типы отрезков в PTV VISUM

На основе картографических данных о геометрии транспортной сети и данных об организации движения создают узлы и отрезки УДС (рис. 3.7 и 3.8).

Вставляют остановочные пункты и задают маршруты и расписание движения общественного транспорта.

3. Создание транспортных районов

Создаются пользовательские атрибуты районов для хранения данных статистики.

Последовательно создают транспортные районы, в диалоговом окне задавая параметры для каждого транспортного района (рис. 3.9).

4. Привязка транспортных районов к сети с помощью Примыканий

После создания районов выполняют привязку транспортных районов к узлам транспортной сети через *Примыкания* (определение и назначение примыканий см. в разделе 3.3).

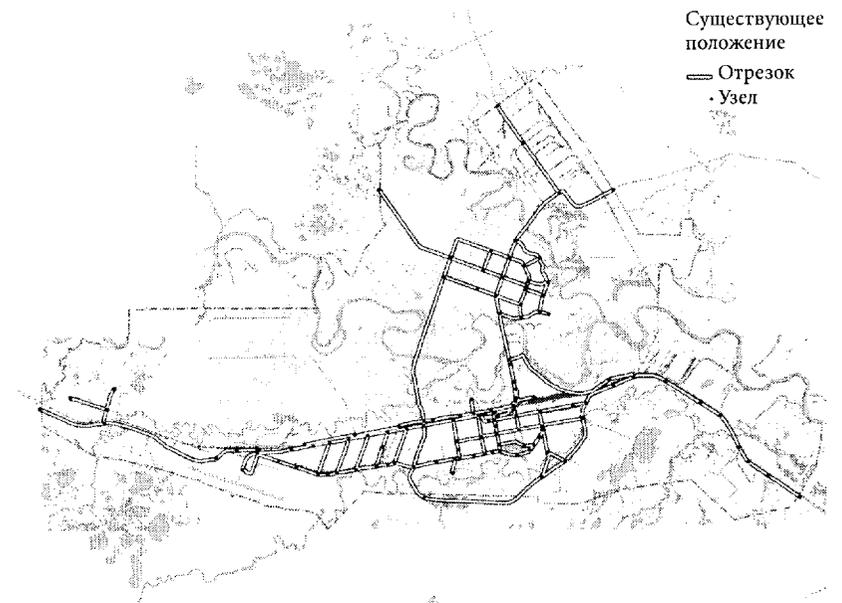


Рис. 3.8. Транспортная сеть моделируемой области

На рисунке 3.11 представлены транспортные районы и примыкания к узлам УДС.

В транспортном моделировании районы рассматриваются как точки отправления и прибытия транспортных потоков, так и геометрические границы предназначены для удобства восприятия. Таким образом, при создании примыканий необходимо связывать центры транспортных районов с узлами дорожной сети.

Для каждого примыкания выставляются параметры, основными из которых являются разрешенные системы транспорта и затраты времени (рис. 3.10).

3.4. Формирование матрицы затрат

На основе данных о геометрических параметрах сети, эксплуатационных характеристиках подвижного состава и координатах центров тяжести транспортных районов формируются специальные матрицы, содержащие данные о затратах на межрайонные поездки. Такие матрицы называются матрицами затрат.

Каждая матрица затрат имеет размеры $m \times n$, где: m — число районов-источников, а n — число районов-целей.

Элементами матриц затрат являются количественные оценки c_{ij} средних затрат на поездку из района-источника i в район-цель j .

В частности, в качестве значений переменной c_{ij} могут выступать следующие величины:

- среднее время пребывания в пути;
- средняя длина пути;
- средняя стоимость проезда.

При этом значения для каждого элемента матрицы затрат обычно усредняются на основе взвешенного среднего по объему перемещений между данной парой районов.

В более обобщенной постановке под затратами на поездку понимается взвешенное среднее значение нескольких альтернативных показателей затрат

$$c_{ij} = \sum_k w_k c_{ijk},$$

где: w_k — весовой коэффициент, определяющий вклад частного показателя затрат вида k в обобщенный показатель затрат c_{ij} ; c_{ijk} — значение

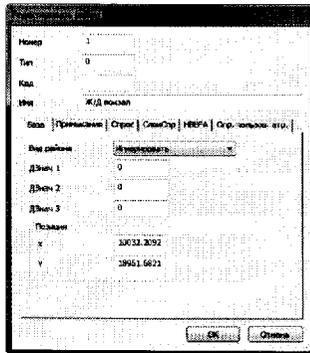


Рис. 3.9. Параметры района

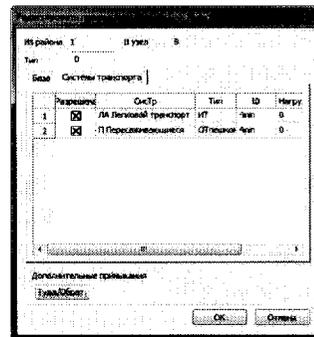


Рис.3.10. Параметры примыканий

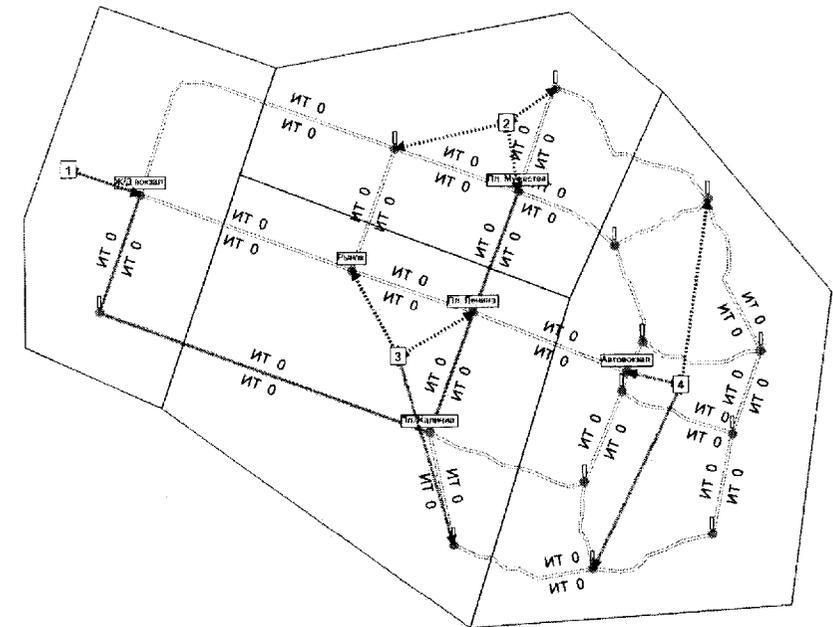


Рис. 3.11. Примыкания транспортных районов

определенного показателя затрат вида k , усредненное по всем путям между парой районов (i, j) .

Весовые коэффициенты w_k задаются с учетом информации о предпочтениях участников движения, получаемой посредством обследований транспортного поведения. В дальнейшем они могут уточняться в ходе настройки и калибровки модели.

Наиболее простой способ формирования матриц затрат основан на использовании среднего времени движения в качестве основного показателя затрат на поездку.

Среднее время движения (на индивидуальном или общественном транспорте) при поездке из района-источника i в район-цель j определяется по формуле

$$t_{ij} = \frac{\sum_r t_{ijr}}{R_{ij}},$$

где: R_{ij} — количество путей между районами i и j ; t_{ijr} — время пребывания в пути при поездке из района i в район j по пути (маршруту) r .

Средневзвешенное время движения (на индивидуальном или общественном транспорте) при поездке из района-источника i в район-цель j

$$t_{ij} = \frac{\sum_r t_{ijr} \cdot d_{ijr}}{\sum_r d_{ijr}},$$

где: d_{ijr} — транспортный спрос (объем перемещений, нагрузка) между районами i и j с использованием пути r ; t_{ijr} — время пребывания в пути при поездке из района i в район j по пути (маршруту) r .

В качестве обобщенного показателя затрат на поездку из района-источника i в район-цель j можно использовать усредненное время движения для общественного и индивидуального транспорта (т.к. в большинстве случаев оно будет различным), определяемое как

$$c_{ij}^{cp} = 0,5 \cdot c_{ij}^{ит} + 0,5 \cdot c_{ij}^{от},$$

где: $c_{ij}^{ит}$ — среднее (средневзвешенное) время пребывания в пути на индивидуальном транспорте по всем путям (маршрутам) корреспонденции (i, j) ; $c_{ij}^{от}$ — среднее (средневзвешенное) время пребывания в пути на общественном транспорте по всем путям (маршрутам) корреспонденции (i, j) .

Результативность такого упрощенного подхода существенно зависит от обеспеченности транспортных районов индивидуальным и общественным транспортом. В частности, если район не охвачен сетью общественного транспорта, времени движения на общественном транспорте автоматически присваивается бесконечно большое значение. Фактически это будет максимальное значение, которое может быть обработано используемым программным продуктом. При этом, согласно приведенной выше формуле, среднее время движения также имеет бесконечно большое значение, и район оказывается полностью отрезанным от остальной сети, даже при нормальной обеспеченности индивидуальным транспортом.

Для решения данной проблемы можно рекомендовать следующий подход, основанный на расчете относительной обеспеченности района общественным транспортом. На основе информации о количестве путей на индивидуальном и общественном транспорте между парой районов i и j рассчитывается коэффициент относительной обеспеченности корреспонденции (i, j) общественным транспортом

$$a_{ij} = \frac{R_{ij}^{от}}{R_{ij}^{от} + R_{ij}^{ит}}.$$

Этот коэффициент используется в качестве весового коэффициента для расчета среднего времени в пути

$$c_{ij}^{cp} = (1 - a_{ij}) c_{ij}^{ит} + a_{ij} \cdot c_{ij}^{от}.$$

Если какой-либо из районов (i, j) не обеспечен сетью общественного транспорта, то $a_{ij} = 0$ и большое значение $c_{ij}^{от}$ погашается.

Пример 2. Выполнение расчетов в PTV VISUM. Расчет матриц затрат.

Все действия в PTV VISUM, связанные с расчетами, производятся в окне «Последовательность процедур» (рис. 3.12).

Расчеты осуществляются последовательно путем добавления и последовательного выполнения необходимых *Расчетных процедур*. Таким образом, последовательность действий для расчетов PTV VISUM в целом соответствует алгоритму работы четырехшаговой модели.

Перед началом расчетов желательно обнулить (если таковые имеются) результаты предыдущих расчетов с использованием процедуры *Инициализации перераспределения*.

Матрицы затрат могут меняться в процессе расчетов. Чтобы отделить создание транспортного движения (как правило, оно рассчитывается только один раз), его обычно выполняют перед расчетом матриц затрат. Создание транспортного движения будет рассмотрено в главе 4.

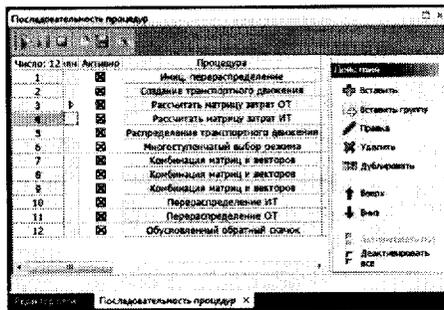


Рис. 3.12. Последовательность расчетных процедур в PTV VISUM

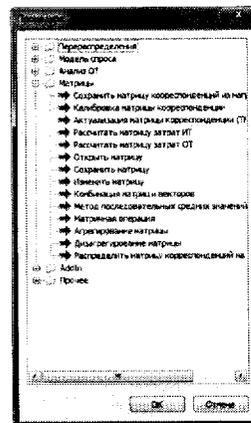
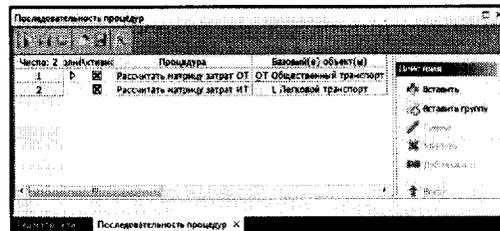


Рис. 3.13. Процедуры расчета матриц затрат

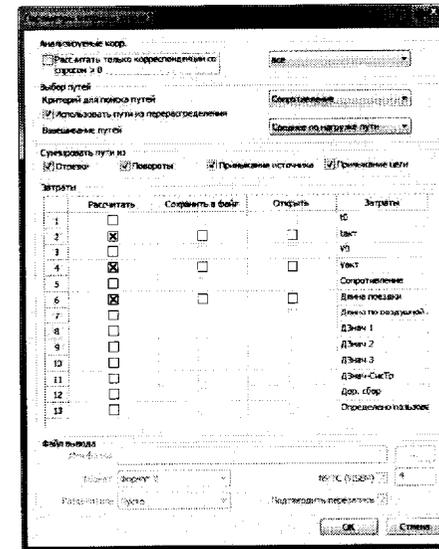


Рис. 3.14. Окно настройки процедуры «Расчет матрицы затрат ИТ»

В PTV VISUM реализовано создание матриц затрат на основе параметров сети для каждого вида транспорта, однако для небольших сетей и лучшего понимания процесса рекомендуется ряд действий (расчет генерации и расчет матриц корреспонденций) выполнить в MS EXCEL в соответствии с рекомендациями главы 3 и 4.

Создание матриц затрат в PTV VISUM осуществляется с помощью процедуры «Расчитать матрицу затрат» (рис. 3.13, 3.14).

Изменяя параметры, можно получить разные типы матриц:

- общественный транспорт (ОТ): время в пути, время до начальной остановки, время от конечной остановки;
- индивидуальный транспорт (ИТ): время в пути, длина поездки и др.

МОДЕЛИ РАСЧЕТА МАТРИЦ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ

4.1. Транспортная подвижность населения

Потребность в перемещении непосредственно связана с развитием общества, экономики и качеством жизни человека. Соответственно, задача транспорта — обеспечить потребность в перемещении с минимальными экономическими и временными затратами при требуемом уровне качества. Именно поэтому изучение закономерностей перемещения является одной из основных задач планирования развития транспорта.

В суточном бюджете времени населения на перемещения затрачивается некоторая статистически постоянная часть времени. Исходя из социально-экономических факторов, транспортной утомляемости человека, время перемещения не может составлять слишком значительную часть, иначе ухудшаются условия мобильности, снижаются коммуникативные качества среды обитания. В связи с этим в СП 42.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89) *затраты времени в городах на перемещение* от мест проживания до мест работы для 90% трудящихся в одну сторону не должны превышать значений, приведенных в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Предельные затраты времени на поездку от дома на работу

Численность населения города, тыс. чел.	Затраты времени, мин.
100 и менее	30
250	35
500	37
1000	40
2000	45
Более 2000	По специальному обоснованию

Время перемещения учитывает все затраты времени от момента выхода из дома до момента подхода к проходной предприятия и может быть выражено как

$$t_n = 2t_{\text{пеш}} + t_{\text{ож}} + t_{\text{тр}},$$

где: $t_{\text{пеш}}$ — время пешеходного перемещения, мин.; $t_{\text{ож}}$ — время ожидания транспорта, мин.; $t_{\text{тр}}$ — время перемещения в транспорте, мин.

Время пешеходного перемещения зависит от расположения остановочных пунктов общественного транспорта или мест стоянки (парковки) индивидуального (личного) транспорта.

Для расчета времени перемещения до остановочного пункта обычно исходят из предположения изотропности городского пространства, когда доступность остановочного пункта можно оценить окружностью с некоторым радиусом. Средняя величина пешеходной доступности транспортных линий может быть оценена в зависимости от их плотности по формуле А. Х. Зильберталя

$$l_{\text{п.д}} = \frac{1}{3} \varphi,$$

где φ — плотность транспортной сети.

Тогда время пешеходного перемещения можно выразить как

$$k_{\text{пеш}} = \frac{k_{\text{н.п}} k_{\text{в.о}}}{v_{\text{пеш}}} \left(\frac{1}{3} \varphi + \frac{l_{\text{пер}}}{4} \right),$$

где: $k_{\text{н.п}}$ — коэффициент учета непрямолинейности пешеходного перемещения; $k_{\text{в.о}}$ — коэффициент выбора остановочного пункта, обеспечивающего экономию общих затрат времени на перемещение по сравнению с поездкой от ближайшего остановочного пункта:

$$k_{\text{в.о}} = 1 + \frac{v_{\text{пеш}}}{v_c},$$

v_c — скорость сообщения рассматриваемого вида транспорта, км/ч; $v_{\text{пеш}}$ — скорость пешеходного перемещения, км/ч; $l_{\text{пер}}$ — среднее расстояние между остановочными пунктами по маршруту движения общественного транспорта (длина перегона), км.

Время ожидания транспортного средства на остановочном пункте обычно принимается как половина среднего интервала движения под-

вижного состава на необходимом маршруте. Если таких маршрутов несколько, то используется значение не маршрутного, а сетевого интервала. В то же время, если наблюдается существенная неравномерность движения и подвижной состав переполнен (существует вероятность необходимости ждать следующее транспортное средство), то время ожидания необходимо рассчитывать с учетом этих факторов:

$$t_{\text{ож}} = 0,5I \left(1 + \frac{\sigma^2}{I^2} + 2P_{\text{отк}} \right),$$

где: I — интервал движения, мин.; σ — среднее квадратическое отклонение фактических интервалов движения от среднего; $P_{\text{отк}}$ — вероятность отказа пассажирам в посадке из-за переполнения подвижного состава.

Например, если $I = 4$ мин., $\sigma = 3$ мин., $P_{\text{отк}} = 0,1$, то:

$$t_{\text{ож}} = 0,5 \cdot 4 \left(1 + \frac{3^2}{4^2} + 2 \cdot 0,1 \right) = 0,5 \cdot 4 \cdot 1,76 = 3,52 \text{ мин.}$$

Транспортная подвижность — характеристика подвижности населения, представляющая собой среднее количество поездок на транспорте, приходящееся в год на одного жителя. Различают *сетевую транспортную подвижность*, учитывающую число полных поездок от начального пункта до пункта назначения независимо от количества пересадок и видов транспорта, и *маршрутную транспортную подвижность*, где за целую поездку принимается поездка в транспортном средстве одного маршрута, а поездка с одной пересадкой учитывается как две поездки. Маршрутная транспортная подвижность вычисляется проще, обычно на основании проданных билетов, и поэтому обычно фигурирует в статистических данных.

Транспортная подвижность зависит от величины рассматриваемой территории, численности населения, планировки и развитости транспортных систем. Рост данной величины может быть связан с улучшением работы общественного транспорта, ростом благосостояния и культурного уровня населения, увеличением численности населения и ростом территории города, концентрацией мест приложения труда и отдыха.

Обеспечение транспортной подвижности населения является одной из важных социально-экономических задач. Именно поэтому минимальный объем транспортных услуг устанавливается в РФ на феде-

ральном законодательном уровне¹. В соответствии с ним для трудоспособного населения предусматривается 619 поездок в год, для пенсионеров — 150 и для детей — 396. Величина нормативной транспортной подвижности в рамках социальнозначимой потребности населения определенного региона в транспортных услугах будет определяться как

$$П = \frac{619 N_{\text{т.н}} + 150 N_{\text{п}} + 396 N_{\text{д}}}{N_{\text{т.н}} + N_{\text{п}} + N_{\text{д}}},$$

где: $N_{\text{т.н}}$ — численность трудоспособного населения, чел.; $N_{\text{п}}$ — численность пенсионеров, чел.; $N_{\text{д}}$ — численность детей, чел.

Подвижность населения — статистический показатель, вычисляемый как среднее число перемещений на человека в год. Транспортная подвижность учитывает только перемещения, совершаемые при помощи транспорта. Общая подвижность населения включает в себя и пешие передвижения.

На подвижность населения оказывают влияние различные факторы:

- уровень жизни и благосостояние населения;
- транспортная обеспеченность территории;
- размеры и планировка территории;
- численность населения;
- расположение центров приложения труда и мест отдыха;
- социально-психологические факторы.

При прогнозировании подвижности населения многочисленными исследованиями установлено, что наиболее тесно ее значение связано с уровнем национального дохода на душу населения.

Для целей транспортного планирования важнейшим вопросом является определение закономерностей расселения населения в зависимости от места приложения труда. Еще в 1934 году проф. Г. В. Шелейховский установил, что трудовое население города расселяется от мест постоянной работы в зависимости от наличия транспортных связей по экспоненциальному закону распределения, в котором основное значение имеет фактор времени. Для российских условий с минимальной внутригородской миграцией эта закономерность действует относительно выбора места работы. При этом, если время пешеходного пере-

¹ Федеральный закон «О потребительской корзине в целом по Российской Федерации» от 31.03.2006 № 44-ФЗ с изм. от 08.12.2010 № 332-ФЗ.

мещения до места работы меньше или сопоставимо с этим же временем при использовании транспорта, то население, как правило, будет предпочитать пешеходное перемещение. Из этих соображений строится график вероятности трудовых перемещений в зависимости от их продолжительности. На рисунке 4.1 приведены кривые вероятности перемещений в зависимости от затрат времени на перемещение. При времени перемещения меньше t_1 никто не будет использовать транспорт для перемещений. В диапазоне времени от t_1 до t_2 доля населения, которая будет использовать транспорт, возрастает. Чем больше затраты времени на перемещение, тем меньше вероятность того, что население будет перемещаться с трудовыми целями. В большинстве исследований эта зависимость выражается функцией вида

$$f(t) = \frac{a}{t^k},$$

которая часто приводится к виду

$$f(t) = \frac{1}{t^2},$$

где: a, k — эмпирические коэффициенты.

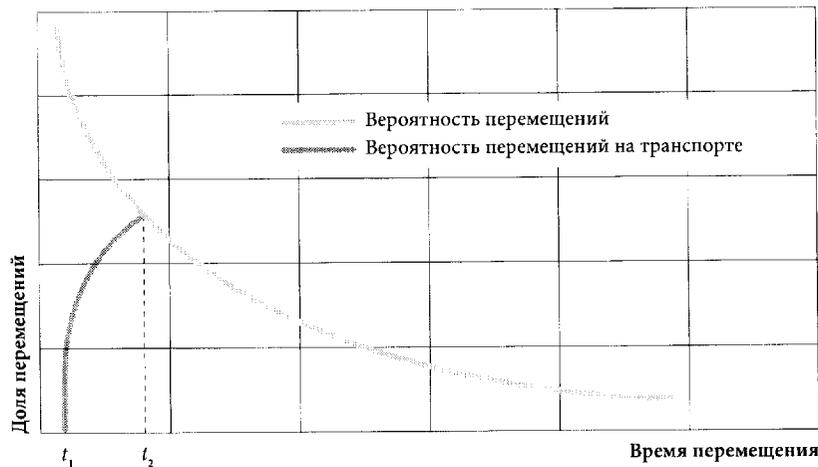


Рис. 4.1. Вероятность перемещений и пользования транспортом

На практике, ввиду особенностей градостроительной и транспортной ситуации, эта зависимость носит более сложный характер.

Площадь фигуры, ограниченная осью абсцисс и линиями двух рассмотренных зависимостей, будет определять объем потенциальных перемещений на транспорте, т. е. спрос на транспортные перемещения.

Удовлетворение спроса на транспортное обслуживание является основной целью транспортной системы. Соответствие возможностей транспортной системы и спроса на ее услуги определяется сбалансированностью спроса и мощностей транспортной системы. Условие сбалансированности будет выполняться, если для любого Θ , принадлежащего периоду t_1, t_2 , выполняется следующее условие:

$$\int_{\Theta}^t p_c(t) dt \leq \int_{\Theta}^t p_t(t) dt,$$

где: $p_c(t)$ — плотность заявок на транспортные услуги в момент t ; $p_t(t)$ — потенциал транспортной системы, обеспечивающий их удовлетворение.

В соответствии с приведенным условием спрос и возможности транспортной системы сбалансированы, если, как показано на рисунке 4.2, площадь под кривой совпадает с площадью прямоугольника ABCD и при этом отсутствуют периоды, когда транспортная система простаивает.

Естественно, это самое общее условие не позволяет избежать периодов отсутствия баланса. Например, в период t^*, t^{**} спрос будет превы-

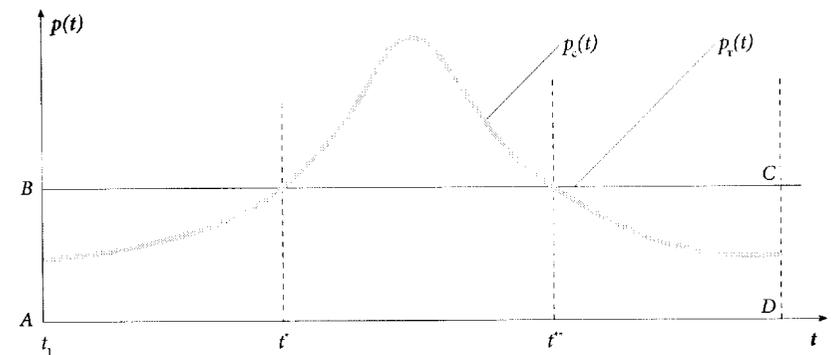


Рис. 4.2. Соотношение спроса и предложения на транспорте

шать возможности транспортной системы, что может быть ликвидировано повышением мощности транспортной системы. На практике всегда приходится решать задачу допустимости нарушения баланса по величине и времени, т. к. повышение мощности системы — это дополнительные капитальные и эксплуатационные затраты.

В связи с этим весьма актуальным является точное определение спроса на транспортные услуги, четырехшаговая модель которого упоминалась в главе 1.

4.2. Модели и методы генерации поездок

Спрос характеризуется массивом корреспонденций Q . Для того, чтобы определить корреспонденцию Q_{ij} , необходимо сформировать транспортные пары (i, j) и найти соответствующие объемы перевозок и их структуру.

В транспортном планировании для характеристики транспортных пар (i, j) различают понятия *отправление* — *прибытие* (*origin — destination*) и *зарождение* — *притяжение* (*production — attraction*) поездок. С точки зрения начала и конца поездки это идентичные понятия. Однако на стадии генерации поездок содержание этих понятий различно и может быть пояснено схемой, приведенной на рисунке 4.3.

Каждый транспортный район, выделяемый в качестве пункта отправления и прибытия поездок, имеет *резидентов* — жителей для пассажирских корреспонденций или источники грузов для грузовых и *нерезидентов* — места приложения труда, учебы или потребления грузов. На рисунке 4.3 приведен типичный пример, в котором житель района i утром едет на работу в район j , а вечером возвращается домой. Соответственно, в терминах *отправление — прибытие* совершается две поездки: утром из i в j и вечером из j в i . Эти два района попеременно являются районами отправления и прибытия. В терминах *зарождение — притяжение* поездка ассоциируется не с направлением, а с отношением потребителя поездки к ее конечной точке. Зарождение поездки относится к поездкам, которые выполняются резидентами данного района, а притяжение — нерезидентами. На рисунке 4.3 район i имеет 2 поездки зарождения, а район j — 2 поездки притяжения. Смысл такого представления поездок заключается в том, что спрос на поездки резидентами является статистически более устойчивым. Население реже меняет место жительства, чем место работы или учебы, склады и заво-

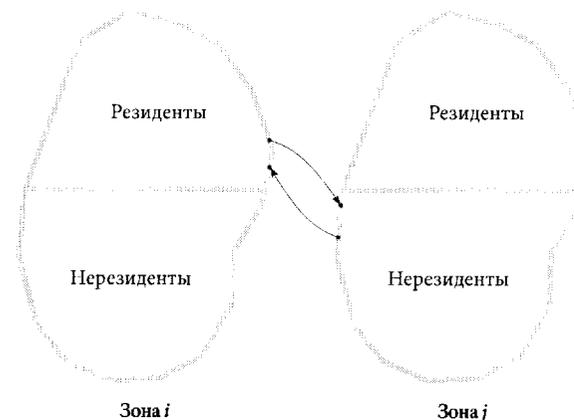


Рис. 4.3. Классификация поездок

ды также более стабильны по месту расположения, чем магазины и сервисные службы. По резидентам легче получить статистические данные, необходимые для прогнозирования количества поездок. К тому же именно такие поездки составляют основную часть транспортных передвижений, в частности формируют час пик. Необходимо отметить, что в терминах *зарождение — притяжение* не учитываются поездки, совершаемые нерезидентами между различными транспортными районами, например, с работы в магазин. Такие поездки необходимо учитывать отдельно, и обычно они составляют 15–20% от всех поездок.

Наиболее распространенной моделью генерации поездок является модель *многофакторного анализа*, в которой поездки распределяются по целям и на основе статистических исследований определяется среднее число поездок в семье в зависимости от различных факторов. В таблице 4.2 в качестве примера приведена такая модель для поездок на индивидуальном транспорте, полученная на основе обработки многолетних статистических данных в США¹.

¹ Martin W.A., McGuskin N.A. Travel Estimation Techniques for Urban Planning / National Cooperative Research Program Report 365. Transportation Research Board. National Research Council, Washington, DC. 1998.

Из приведенного в таблице 4.2 примера видно, что в модели количество поездок прямо пропорционально уровню дохода семьи и ее численности. Часто в подобных моделях учитывается также количество автомобилей в семье. Количество жителей в населенном пункте влияет на число поездок более сложным образом.

Для распределения поездок по транспортным районам они распределяются по источникам возникновения (из дома — резиденты или нет) и по целям: трудовые (на работу или учебу), деловые (по рабочим делам), бытовые (в магазины и сервисные службы), социально-культурные (кино, театр) и т. п. Также поездки следует различать по времени суток на пиковый и межпиковый периоды. Так, в пиковый период около 90% от всех поездок приходится на трудовые поездки. Для большинства магистралей и линий общественного транспорта в этот период движение наиболее интенсивно. В выходные дни из-за преобладания бытовых и социально-культурных поездок загрузка дорог может быть иная, чем в рабочие дни.

Таблица 4.2. Среднесуточное количество поездок на одну семью

Численность населения в городе, тыс. чел.	Уровень дохода	Количество человек в семье				
		1	2	3	4	5 и более
1	2	3	4	5	6	7
50–200	Низкий	3,6	6,5	9,1	11,5	13,8
	Средний	3,9	7,3	10,0	13,1	15,9
	Высокий	4,5	9,2	12,2	14,8	18,2
Средневзвешенное значение		3,7	7,6	10,6	13,6	16,6
200–500	Низкий	3,1	6,3	9,4	12,5	14,7
	Средний	4,8	7,2	10,1	13,3	15,5
	Высокий	4,9	7,7	12,5	13,8	16,7
Средневзвешенное значение		3,7	7,1	10,8	13,4	15,9
500–1000	Низкий	3,6	7,1	9,0	12,0	14,0
	Средний	4,8	7,1	9,8	12,7	14,6
	Высокий	4,8	7,8	11,5	13,6	16,6
Средневзвешенное значение		4,0	7,3	10,2	13,0	15,4

Окончание таблицы 4.2

1	2	3	4	5	6	7
> 1000	Низкий	3,7	6,3	8,1	10,0	11,8
	Средний	4,9	7,6	9,1	12,3	15,1
	Высокий	5,4	7,9	10,3	12,4	15,3
Средневзвешенное значение		4,2	7,3	9,3	12,0	14,8

Для выявления зависимости количества поездок от перечисленных факторов используют методы *регрессионного анализа*. В подавляющем большинстве случаев используются линейные модели вида

$$Q_i = a + bX_i,$$

где: a и b — коэффициенты, определяемые на основе полученных данных; X_i — значение рассматриваемого фактора (семейный доход, количество личных автомобилей и т. п.).

На основе регрессионных моделей также может выполняться прогноз искомых величин на будущий период, что является важнейшей задачей моделирования.

Наряду с регрессионным анализом на практике широко используется метод *анализа по категориям*. Этот метод основан на выявлении зависимости количества зарождений поездок с определенной целью от характеристик семьи. Для семьи каждой группы определяется среднее количество поездок за определенный период времени с определенной целью

$$q_i = \frac{Q_i}{N_i},$$

где: q_i — количество поездок семей группы i ; N_i — количество семей в группе.

Семьи разбиваются на группы в зависимости от численности, количества автомобилей в личном пользовании, дохода и т. п. Чем больше факторов необходимо учесть, тем больше будет количество групп. Поэтому метод анализа по категориям очень чувствителен к количеству семей в каждой группе и требует обширных статистических данных.

Следует отметить, что модели генерации поездок в общем виде не гарантируют равенства количества зарождений и поглощений поездок суммарно по всем районам. Для корректной работы с этими данными на последующем этапе распределения поездок по районам обычно вводят корректирующий коэффициент, с помощью которого добиваются выполнения условия

$$\Sigma Q_i = \Sigma Q_j.$$

В целом этап генерации корреспонденции в стандартном варианте четырехшаговой модели транспортного спроса описан ниже.

Группа транспортного спроса описывает перемещения, совершаемые отдельной социальной группой людей (группой однородного поведения) с единой целью (группа источник—цель). Например, группа транспортного спроса «Студенты: Дом—Учеба» может описывать перемещения, совершаемые студентами из дома в вуз.

Группа источник—цель — классификация поездок по их месту отправления и назначения (причина поездки — работа, место отправления — дом, тогда группа источник—цель: «Дом—Работа»). На рисунке 4.4 представлен пример классификации причин поездок по 10 группам источник—цель. Группы источник—цель, количество перемещений в которых незначительно (по сравнению с перемещениями по другим группам), объединяют в одну группу, например, поездки с учебы на работу, из магазина на работу и т. д., представляют одну группу «Прочее—Работа».

Источники \ Цель	Дом	Работа	Учеба	Прочее
Дом	-	DR	DU	DP
Работа	RD	RR	RP	
Учеба	UD	UR	UR	
Прочее	PD	PR	PP	

Рис. 4.4. Пример классификации причин поездок по 10 группам «Источник—цель»

Референтная группа — социально-экономическая группа людей, которая создает или притягивает перемещения с различными целями. Примером таких групп могут служить население: трудоспособное население, экономически активное население по месту работы (рабочие места), учащиеся по месту жительства, учащиеся по месту учебы (учебные места) и т. д.

Коэффициент генерации (коэффициент притяжения) — среднее число отправлений (прибытий) по каждой группе транспортного спроса в течение определенного периода (обычно за сутки), приходящееся на одного представителя референтной группы.

Коэффициенты генерации являются количественными характеристиками транспортного поведения людей в области исследования (подвижности или мобильности населения) и могут быть рассчитаны на основе информации из социологических опросов населения о совершаемых ими в течение суток перемещениях:

$$K_g = \frac{V_g}{N_g},$$

где: K_g — коэффициент генерации (притяжения); V_g — число отправлений (прибытий) для референтной группы g ; N_g — число представителей референтной группы g .

Модель групп источник—цель может быть представлена с помощью следующих соотношений, описывающих общее количество перемещений, совершаемых представителями референтных групп и начинающихся или заканчивающихся в районах моделируемой территории (формула приведена для расчета объемов прибытий и отправлений для отдельной (одной) группы транспортного спроса):

$$\begin{cases} P_i = \sum_g K_g^P \cdot N_{gi} \\ A_j = \sum_g K_g^A \cdot N_{gj} \end{cases}, \text{ при условии } \sum_i P_i = \sum_j A_j = D,$$

где: P_i — общее число отправлений из района i ; A_j — общее число прибытий в район j ; K_g^P, K_g^A — коэффициенты генерации/притяжения для референтной группы g ; N_{gi}, N_{gj} — число представителей референтной группы g в районе $i(j)$; $\sum_i P_i = \sum_j A_j$ — условие, уравнивающее объемы прибытий и отправлений в сумме по всем транспортным районам; D — общий (суммарный) объем перемещений в области исследования.

Для прогнозирования объемов грузовых перевозок используются аналогичные модели, в которых количество поездок связывается с объемом перевозок, количеством работающих, вместимостью складов и т. п.

Транспортные модели создаются для обоснования и оптимизации транспортных планов и проектов. Поэтому чрезвычайно важно учитывать все тенденции и изменения, которые могут произойти к моменту реализации проекта. Для этого необходимо, чтобы все *параметры модели были стабильны на проектируемый период*. С этой точки зрения необходимо обратить внимание на следующие факторы:

- изменения дохода и возрастной структуры семей, по которым собраны статистические данные, с учетом перехода людей из одной группы в другую (например, студент — служащий), возможных рождений и смертей;
- динамика автомобилизации общества;
- социально-экономические тенденции развития торговли, промышленности, жилищного строительства в исследуемом регионе;
- динамика стоимости жизни, стоимости топлива, что особо сказывается на количестве поездок на личном автомобиле.

Пример 3. Выполнение расчетов в PTV VISUM. Генерация поездок.

Прежде чем приступить к расчету объемов генерации поездок (создание транспортного движения), необходимо сформировать группы источник—цель (пары действий) в *Модели спроса PTV VISUM* (рис. 4.5).

Далее необходимо сформировать *слои спроса* (для пар источник—цель) и матрицы корреспонденций по слоям спроса с помощью соответствующих элементов управления диалогового окна «Модели спроса» (рис. 4.6).

Для расчета объемов генерации и поглощения в расчетные процедуры необходимо добавить процедуру «Создание транспортного движения», в параметрах которой для каждого слоя спроса следует задать коэффициенты генерации для расчета объемов создания и притяжения и параметры нормирования (уравнивания объемов создания и притяжения) (рис. 4.6).

На следующем шаге производится расчет количества поездок между транспортными районами.

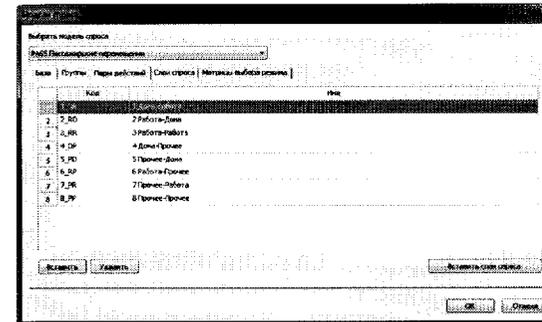


Рис. 4.5. Группы источник—цель в модели спроса PTV VISUM

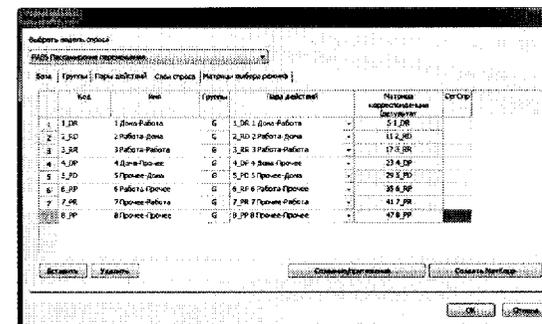


Рис. 4.6. Слои спроса и матрицы корреспонденций в PTV VISUM

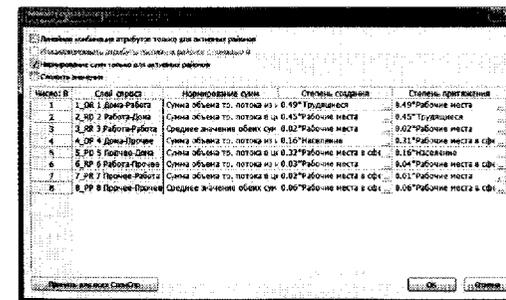


Рис. 4.7. Параметры генерации поездок

4.3. Модели и методы распределения поездок по транспортным районам

Полученные с помощью модели генерации поездок данные о зарождении и поглощении поездок в каждом транспортном районе позволяют получить данные о количестве поездок на исследуемой территории. Для оценки загрузки транспортной сети необходимо распределить поездки между транспортными районами, т. е. определить, из какого района в какой выполняется каждая поездка.

На данном этапе поездки могут быть представлены, как минимум, двумя разными способами.

Первый — это «матрица поездок», в которой поездки описываются от места отправления к месту прибытия в течение определенного периода времени. Такая матрица называется *матрица корреспонденций* (*O-D матрица*) и может быть представлена с разбивкой по группам населения или цели поездки. Матрица корреспонденций — это двумерный массив, в котором строки и столбцы представляют каждый из z транспортных районов на исследуемой территории (включая внешние районы), как это показано в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Общая форма матрицы корреспонденций

Номер района источника	Номер района цели					ΣQ_{ij}
	1	2	3	... j	...z	
1	Q_{11}	Q_{12}	Q_{13}	Q_{1j}	Q_{1z}	O_1
2	Q_{21}	Q_{22}	Q_{23}	Q_{2j}	Q_{2z}	O_2
3	Q_{31}	Q_{32}	Q_{33}	Q_{3j}	Q_{3z}	O_3
...						
i	Q_{i1}	Q_{i2}	Q_{i3}	Q_{ij}	Q_{iz}	O_i
...						
z	Q_{z1}	Q_{z2}	Q_{z3}	Q_{zj}	Q_{zz}	O_z
ΣQ_{ij}	D_1	D_2	D_3	D_j	D_z	Q

По диагонали таблицы располагаются ячейки, представляющие поездки внутри транспортного района. В общем случае Q_{ij} — количество поездок из района отправления i в район прибытия j ; Q — общее количество поездок в исследуемом регионе; O_i — общее количество поездок

из района i ; D_j — общее количество поездок в район j . На практике такие матрицы составляются отдельно по целям поездок и категориям пользователей.

Второй способ представления поездок заключается в рассмотрении факторов, которые вызывают необходимость поездки, т. е. в создании *матрицы зарождения-притяжения* (*P-A матрицы*), в которой место жительства рассматривается как зарождение поездки в определенное место назначения, а место работы, магазин и т. п. как притяжение этой поездки. Как правило, *P-A матрица* будет охватывать более длительный промежуток времени (обычно день), чем *O-D матрица*. Например, рассмотрим поездку на работу и обратно. На *O-D* основе будет генерироваться одна поездка утром от дома до работы и одна обратно во второй половине дня. На основе *P-A* будут создаваться две трудовые поездки со стороны дома, в свою очередь с другой стороны место работы генерирует две трудовые поездки в течение дня.

Картина поездок, полученная путем проведения обследований (интервью пользователей индивидуальных (личных) транспортных средств (придорожные интервью) или анкетирование пассажиров общественного транспорта), позволит получить частичные матрицы *O-D*, т. к. не все *O-D* пары можно зафиксировать в период обследований. Даже сочетание обследований и поквартирных опросов будет не в состоянии дать матрицы со всеми заполненными ячейками. В данном случае моделирование необходимо для получения полной матрицы в *P-A* или *O-D* формате.

Если достоверная информация известна по количеству отправок из всех районов O_i и количеству прибытий во все районы D_j , то считается, что модель ограничена с двух сторон. Если известна информация только по отправлениям или только по прибытиям, модель будет иметь одно ограничение.

Фактор стоимости в модели может ассоциироваться с протяженностью поездки, ее продолжительностью или стоимостью. В виде меры стоимости чаще всего используются *обобщенные затраты на поездку*, которые отображают все потери пользователя. Обычно это линейная функция от атрибутов с весовыми коэффициентами, связанными с затратами на поездку

$$C_{ij} = k_1 t_{ij}^r + k_2 t_{ij}^w + k_3 t_{ij}^l + k_4 t_{ij}^n + k_5 F_{ij} + k_6 \varphi + \delta,$$

где: t_{ij}^v — время поездки на индивидуальном ТС (автомобиле) из i в j , мин.; t_{ij}^w — время пешеходного подхода до места стоянки (парковки) транспортного средства и после прибытия на место назначения, мин.; t_{ij}^t — время ожидания заезда на стоянку или поиска свободного места в месте прибытия, мин.; t_{ij}^n — время на пересадку с одного транспортного средства на другое, если присутствует в поездке, мин.; F_{ij} — плата за проезд, если она взимается на маршруте поездки, руб.; φ_j — плата за стоянку в месте прибытия, руб.; δ — дополнительные затраты, связанные с выбранным видом транспорта, не учитываемые перечисленными факторами; k_1-k_6 — весовые коэффициенты, учитывающие значимость каждого фактора в обобщенных затратах и обеспечивающие перевод различных значений этих факторов к общей единице измерения (деньги, время и т. п.).

Модели распределения поездок по районам бывают самых разных видов — от простейших однофакторных до динамических многофакторных. Наибольшее распространение получили *гравитационные модели*, которые в общем виде могут быть представлены следующей зависимостью:

$$Q_{ij} = o_i d_j \varphi_{ij}$$

Первая математическая модель гравитационного типа для расчета корреспонденции между двумя транспортными районами появилась более 100 лет тому назад, когда австрийский инженер фон Лилль исследовал железнодорожные пассажирские перевозки на направлении Вена—Брюнн—Прага и вывел математическую зависимость, которая впоследствии получила широкое распространение при расчетах транспортных потоков.

Модель получила название гравитационной потому, что корреспонденция Q_{ij} (сила связи между районами (точками)) пропорциональна произведению o_i и d_j , характеризующих «потенциал» этих районов, и некоторой функции взаимного притяжения этих районов φ_{ij} . Величины o_i и d_j обычно связаны с объемом отправок и прибытий между районами, а функция φ_{ij} в простейшем случае может быть принята в следующем виде:

$$\varphi_{ij} = \frac{a}{C_{ij}^k}$$

где: a — некоторая константа; k — коэффициент, учитывающий трудность транспортных связей между районами (в различных исследова-

ниях изменяет свое значение от 0,6 до 3,5, но обычно принимается равным 2); C_{ij} — расстояние между i и j или иной показатель, например, затраты времени или стоимость поездки¹.

Для сбалансированности модели необходимо, чтобы все поездки из района отправления были равны сумме поездок из этого района в район прибытия, т. е. выполнялось следующее условие:

$$o_i = \sum_x Q_{ix} = a o_i \sum_x \frac{d_x}{C_{ix}^k}$$

где: x — количество районов прибытия поездок.

Из последнего выражения можно получить значение константы a , обеспечивающее сбалансированность генерируемых поездок

$$a = \left(\sum_x \frac{d_x}{C_{ix}^k} \right)^{-1}$$

С учетом этого выражения получаем *классическую форму гравитационной модели*

$$Q_{ij} = o_i \frac{d_j / C_{ij}^k}{\sum_x (d_x / C_{ix}^k)}$$

Для иллюстрации использования гравитационной модели необходимо рассмотреть следующий пример. Исследуемая область разбита на 4 транспортных района (ТР). В таблице 4.4 приведены прогнозируемые объемы поездок по районам, а в таблице 4.5 — расстояния между районами.

Таблица 4.4. Характеристика транспортных районов

ТР	Количество поездок отправления	Коэффициент притяжения
1	2	3
1	1500	0
2	0	3

¹ Этот показатель часто называют сопротивлением транспортным связям между зонами, или трудностью сообщения, т. к. он обратно пропорционально влияет на количество корреспонденций.

Окончание таблицы 4.4

1	2	3
3	2600	2
4	0	5

Необходимо выполнить расчеты количества корреспонденций между районами в таблице 4.6 для районов с наличием резидентов. Значение коэффициента k принимается равным 2.

Таблица 4.5. Расстояния между районами с учетом внутрирайонных перемещений

Районы отправления поездок i	Районы прибытия поездок j			
	1	2	3	4
1	5	10	15	20
2	10	5	10	15
3	15	10	5	10
4	20	15	10	5

Для практического использования гравитационная модель нуждается в калибровке, которая заключается в определении значения коэффициента k . По сути, этот коэффициент определяет зависимость между фактором затрат времени на поездки и трудностью сообщения между районами.

Фактором затрат времени называется величина, которая определяется из выражения

$$F_{ij} = \frac{1}{C_{ij}^k}$$

Для калибровки модели данное выражение используется в логарифмическом виде, в котором коэффициент k определяет наклон линии, выражающей зависимость между логарифмами фактора затрат времени и трудности сообщения:

$$\ln F = -k \ln C.$$

Таблица 4.6. Результаты расчетов

j	d_j	C_j^k	d_j / C_j^k	Q_j
$i = 1, o_i = 1500$				
1	0	25	0,0000	0
2	3	100	0,0300	891
3	2	225	0,0080	238
4	5	400	0,0125	371
Сумма	—	—	0,0505	1500
$i = 3, o_i = 2600$				
1	0	225	0,0000	0
2	3	100	0,0300	488
3	2	25	0,0800	1300
4	5	100	0,0500	812
Сумма	—	—	0,1600	2600

Процедура калибровки носит итерационный характер, в ходе которой добиваются приемлемого соответствия результатов расчетов и реальных объемов поездок между районами, полученных на основе наблюдений.

В связи с тем, что на практике параметр классической гравитационной модели, отображающий затраты на перемещения между районами C_{ij}^k , имеет более сложный характер, модель принимает вид

$$Q_{ij} = a O_i D_j f(c_{ij}).$$

Функция $f(c_{ij})$ представляет собой обобщенные затраты на перемещения, зависящие от расстояния, времени или стоимости поездки, с одним или несколькими параметрами для калибровки. Наиболее часто эта функция записывается в следующих видах:

$$f(c_{ij}) = \exp(-\beta c_{ij});$$

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^{-n};$$

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^n \exp(-\beta c_{ij}).$$

Энтропийные модели представляются в форме нелинейной оптимизационной задачи математического программирования, причем целевая функция носит не технико-экономический, а «термодинамический» характер и включает вероятностные характеристики коллективного поведения. Вероятность появления корреспонденции можно оценить в соответствии с формулой

$$P_{ij} = \frac{t_{ij}}{\sum t_{ij}}, \text{ при } \sum P_{ij} = 1.$$

Мера неопределенности возникновения той или иной корреспонденции определяется величиной энтропии

$$H = -\sum P_{ij} \log P_{ij}.$$

Энтропийная модель позволяет взамен средних величин характеристик передвижения учесть формирование корреспонденций, которое произойдет при отсутствии ограничений в транспортной системе за счет задания априорных условий. Априорные условия задаются в виде матрицы вероятностей X_{ij} , в которой можно учесть предпочтения для перемещений из района i в район j , предпочтения по выбору вида транспорта и т. п. Это означает, что отыскиваются не просто сбалансированные значения Q_{ij} , но и наиболее близкие по вероятности к тем, которые сложились в реальной транспортной системе, т. е. соответствующие максимуму энтропии. Энтропийная модель этого вида может быть определена следующим образом:

$$\sum_{ij} Q_{ij} \ln \frac{x_{ij}}{Q_{ij}} \rightarrow \max;$$

$$\sum_j Q_{ij} = O_i, \sum_i Q_{ij} = D_j, Q_{ij} \geq 0.$$

Любая транспортная система имеет определенные ресурсные ограничения. Поэтому в ограничениях модели необходимо учесть дополнительное условие

$$\sum_{ij} R_{ij}^k = R^k,$$

где: R^k — определяет ресурс системы k -го типа.

Пример 4. Выполнение расчетов в PTV VISUM. Распределение транспортных потоков по корреспонденциям

Распределение сгенерированных на предыдущем шаге транспортных потоков по корреспонденциям осуществляется на основе описанной выше гравитационной модели с использованием матриц затрат и оценочных функций.

Используется процедура «Распределение транспортного движения». В ее параметрах необходимо указать матрицы затрат и параметры функции оценки.

В приведенном примере на рисунке 4.8 используется функция *Logit* с параметром $c = -0,07$.

Коэффициенты к матрицам затрат в определении полезности назначаются по слоям спроса в соответствии с выявленным в результате социологического исследования разделением по видам транспорта.

График функции с такими параметрами представлен на рисунке 4.9 и доступен для просмотра в настройках функции.

4.4. Модели и методы выбора вида транспорта

Третьим этапом определения спроса на транспортные услуги является выбор пользователем способа поездки (перевозки груза). Необходимо сразу отметить существенное влияние на этот выбор общих закономерностей индивидуальных предпочтений или субъективных факторов. В первую очередь на выбор влияют качественные характе-

Число В	Слой спроса	Определяемая полезность	Исп. функции	а	б	в	г	Параметры распределения	Величина фактора
1	1_ОД 1 Дома-Работа	0.5*Mat(6 TTC (L. Личный транспорт)) + 0.5*Mat(2 JRT (C. Такси))	BoxCox	0	2	-0.01		Объем транспортного потока	51_ОД
2	2_ОД 2 Работа-Дом	0.5*Mat(6 TTC (L. Личный транспорт)) + 0.5*Mat(2 JRT (C. Такси))	BoxCox	0	2	-0.01		Объем транспортного потока	11_2_ОД
3	3_РР 3 Работа-Работа	0.5*Mat(6 TTC (L. Личный транспорт)) + 0.5*Mat(2 JRT (C. Такси))	BoxCox	0	2	-0.01		Объем транспортного потока	17_3_РР
4	4_ОД 4 Дома-Прочие	0.5*Mat(6 TTC (L. Личный транспорт)) + 0.5*Mat(2 JRT (C. Такси))	BoxCox	0	2	-0.01		Объем транспортного потока	23_4_ОД
5	5_РД 5 Прочие-Дом	0.5*Mat(6 TTC (L. Личный транспорт)) + 0.5*Mat(2 JRT (C. Такси))	BoxCox	0	2	-0.01		Объем транспортного потока	18_5_РД
6	6_РР 6 Работа-Прочие	0.5*Mat(6 TTC (L. Личный транспорт)) + 0.5*Mat(2 JRT (C. Такси))	BoxCox	0	2	-0.01		Объем транспортного потока	25_6_РР
7	7_РР 7 Прочие-Работа	0.5*Mat(6 TTC (L. Личный транспорт)) + 0.5*Mat(2 JRT (C. Такси))	BoxCox	0	2	-0.01		Объем транспортного потока	41_7_РР
8	8_РР 8 Прочие-Прочие	0.5*Mat(6 TTC (L. Личный транспорт)) + 0.5*Mat(2 JRT (C. Такси))	BoxCox	0	2	-0.01		Объем транспортного потока	47_8_РР

Рис. 4.8. Параметры распределения транспортного движения

ристики данного способа поездки. Разные способы перемещения часто выбираются в зависимости от цели поездки. Например, часто для поездок на работу люди выбирают общественный транспорт, а для поездок с социальными целями — индивидуальный транспорт (личный автомобиль). В процессе поездки выбор пользователя может измениться в зависимости от ситуации или изменившихся обстоятельств, не зависящих от поездки. На выбор способа поездки также влияют изменения стоимости стоянки (парковки), топлива, самочувствие человека, погодные условия и т. п. Нельзя исключать из рассмотрения и варианты мультимодальных поездок, когда одна поездка разделяется между несколькими видами транспорта, в том числе и по системе «Park and Ride».

В дополнение к перечисленным факторам при выборе способа совершения поездки необходимо учитывать социально-экономические характеристики групп населения. Основные из них — это: возрастная группа, уровень дохода, количество автомобилей в семье и т. п.

Таким образом, факторы, влияющие на выбор пользователем способа поездки, можно разделить на три группы:

- характеристики данного вида транспорта (в первую очередь скорость сообщения, надежность выполнения графика движения, дальность пешеходных подходов, продолжительность ожидания, связанного с необходимостью пересадки, стоимость поездки, а также уровень комфорта, безопасность, возможность телефонных разговоров во время поездки, доступ к *Internet* и т. п.);

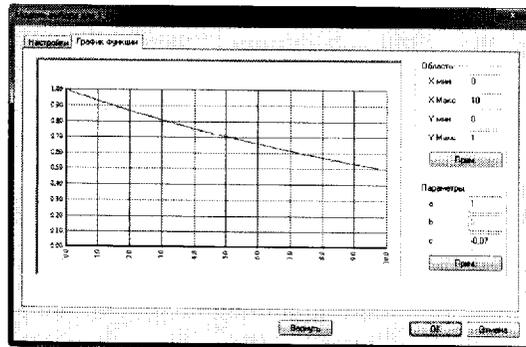


Рис. 4.9. График функции оценки в PTV VISUM

- социально-экономический статус населения (наличие личного автомобиля, уровень дохода, состав семьи, деловые или социальные задачи, требующие использования автомобиля до, после или в рабочее время, и т. п.);
- характеристики поездки (цель поездки, время ее выполнения, наличие стоянки и ее стоимость в пункте назначения, наличие попутчиков и их количество и т. п.).

Факторы в модели выбора способа поездки, включенные в эти три группы, будут входить как независимые переменные и будут формировать долю населения, пользующуюся тем или иным видом транспорта.

Наиболее простые модели выбора способа поездки используют эмпирические модели, разделяющие спрос между видами транспорта по наиболее представительному фактору, как это показано на рисунке 4.10. В этом примере определяется, какой вид транспорта будет выбран для поездки (личный или общественный (ГПТ)), на основании разницы по времени поездки.

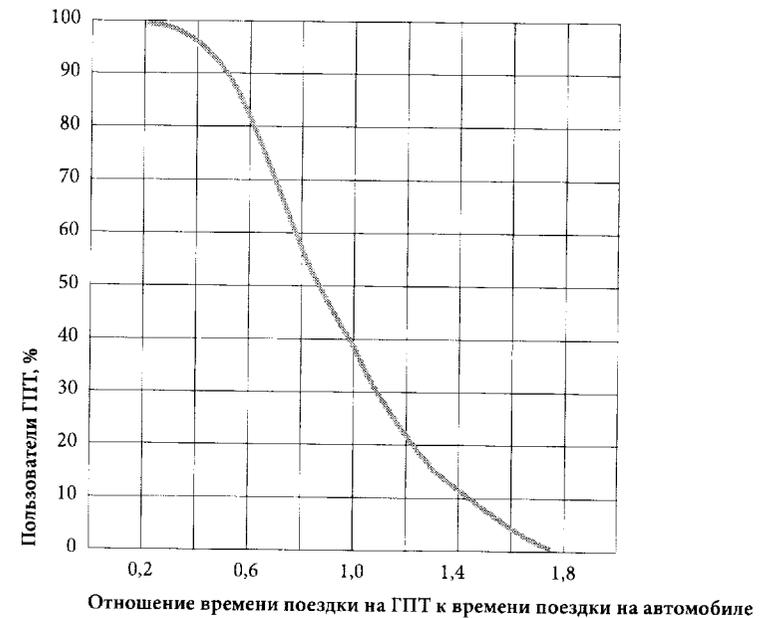


Рис. 4.10. Простейшая модель деления спроса по видам поездок

Более сложные эмпирические модели учитывают социально-экономический статус населения, характеристики способа передвижения и маршрута поездки. Например, проф. А. С. Михайлов предложил критерий выбора способа передвижения, основанный на следующей функции:

$$K_i = a_{1i} + a_{2i}L + \frac{a_{3i}L + a_{4i}}{D},$$

где: a_{1i} — затраты времени, не зависящие от расстояния перемещения, мин.; a_{2i} — затраты времени на единицу расстояния перемещения, мин.; a_{3i} — издержки на единицу расстояния перемещения, мин.; a_{4i} — издержки, не зависящие от расстояния перемещения, мин.; L — расстояние перемещения, км; D — душевой доход субъекта перемещения, руб.; i — номер альтернативы выбора (пешее перемещение, на ГПТ, индивидуальном (личном) транспорте и т. п.).

В настоящее время эмпирические модели заменяются моделями, основанными на вероятностном дискретном выборе. В качестве критерия выбора используется максимизация полезности для пользователя или минимизация его затрат. В модели дискретного выбора пользователь i , выбирающий способ поездки K , приобретает случайную полезность U_{ik} . Следовательно, предполагается, что пользователь i максимизирует свою полезность, выбирая K таким образом, что U_{ik} была наибольшей из всех U_{ir} , где $r = 1, \dots, K$. Вероятность того, что пользователь i выбирает K , можно вычислить, если известны распределения, лежащие в основе функции полезности. Для вычисления этой вероятности на транспорте наиболее широко используются логит-модели, так как они позволяют представить функцию полезности в наиболее простом линейном виде.

Логит-модель — это регрессионная модель оценки вероятности принятия биномиальной зависимой переменной одного из значений в диапазоне от 0 до 1. Термин «логит» был введен американским исследователем Джозефом Берксоном в 1944 г., т. к. в основе модели лежит использование логистической функции вида

$$F(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}},$$

где: z — линейная регрессия $z = a + a_1x_1 + \dots + a_kx_k$.

Вид этой функции приведен на рисунке 4.11.

Логистическая функция имеет следующие свойства, которые составляют основное преимущество перед линейными моделями:

1. Как видно из графика, вероятность положительного исхода в модели принимает значения $[0; 1]$.
2. Предельный эффект переменной z не постоянен на всей протяженности функции и изменяется с изменением значения z .
3. Переменная z может принимать любые значения на множестве $(-\infty; +\infty)$.

Мультиномиальная логит-модель вычисляет вероятность выбора пользователем способа поездки K , если этот выбор происходит в соответствии со следующей зависимостью:

$$P(K) = \frac{e^{U_i}}{\sum_k e^{U_i}}.$$

Рассмотрим применение логит-модели на практическом примере для определения количества поездок на индивидуальном (личном)

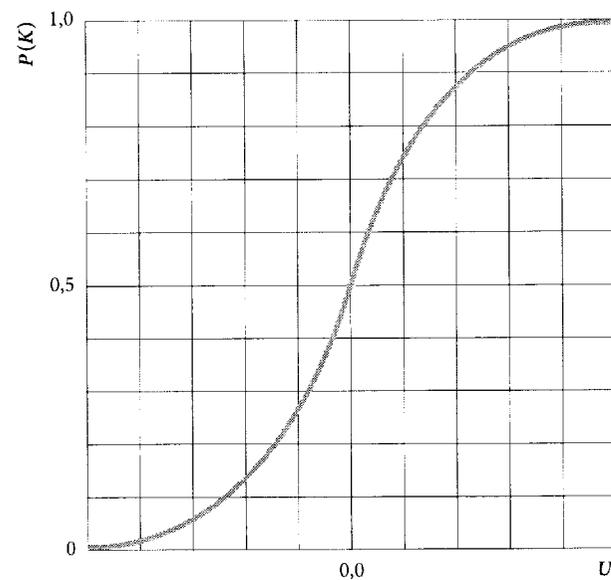


Рис. 4.11. Логистическая функция

и общественном транспорте. Исследования показали, что функция полезности при выборе способа поездки имеет следующий вид:

$$U_k = a_k - 0,025 X_1 - 0,032 X_2 - 0,015 X_3 - 0,002 X_4.$$

Для горизонта прогноза при общем числе поездок 5000 в день исходные данные будут соответствовать значениям, приведенным в таблице 4.7.

Таблица 4.7. Исходные данные для логит-модели

Способ поездки	Доступность X_1 , мин.	Время ожидания X_2 , мин.	Время поездки X_3 , мин.	Затраты X_4 , руб.
ИТ	5	0	20	100
ОТ	10	15	40	50

Калибровка модели показывает, что постоянная составляющая функции полезности — коэффициент a для индивидуального транспорта будет равен 0, а для автобусного составит 0,1. Тогда результаты расчета можно представить в виде таблицы 4.8.

Таблица 4.8. Результаты расчетов

Показатель	Способ поездки	
	ИТ	ОТ
Значение функции полезности U_k	-0,625	-1,530
Вероятность выбора $P(K)$	0,710	0,290
Число поездок в день	3550	1450

В этом примере функция полезности имеет отрицательное значение, т. к. в качестве исходных данных фигурируют затратные компоненты. Чем выше их значение, тем меньше желания у пользователя использовать этот способ поездки.

Подход, продемонстрированный в этом примере, позволяет не только спрогнозировать спрос на поездки, но и исследовать последствия принятия различных мер транспортной политики: повышение стоимости проезда, сокращение времени поездки и т. д.

Если исследуется развитая транспортная сеть, то используется *вложенная логит-модель*. Эта модель позволяет использовать дерево выбора различных альтернатив. Например, на первом уровне выбор может осуществляться между личным автомобилем и ГПТ, а на следующем уровне между автобусом и трамваем.

Пример 5. Выполнение расчетов в PTV VISUM. Распределение по видам транспорта.

Распределение спроса на поездки по видам транспорта в PTV VISUM осуществляется в модели «Выбор режима» (рис. 4.12).

Корреспонденции между транспортными районами по сегментам спроса распределяются на разные виды транспорта (режимы) с помощью матрицы затрат и оценочных функций (рис. 4.13).

Вложенная логит-модель (дерево решений) реализуется при помощи процедуры «Многоступенчатый выбор режима» (рис. 4.14).

4.5. Методы прогнозирования поездок

К моделям этого класса в первую очередь относятся модели формирования транспортных связей, определяющие перспективный объем перевозок на основе прогнозирования роста существующего. Разновидности таких моделей приведены в таблице 4.9.

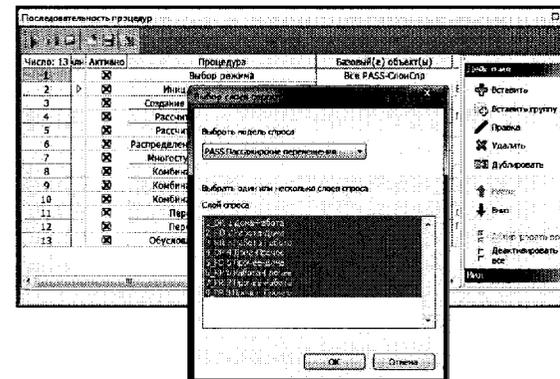


Рис. 4.12. Выбор режима

Рис. 4.13. Параметры выбора режима

Рис. 4.14. Параметры многоступенчатого выбора режима

В модели общего фактора роста в качестве исходной информации используются фактические величины корреспонденций между транспортными районами города и прогноз их роста. Но в связи с тем, что он не учитывает динамику развития соотношений между отдельными параметрами города и, соответственно, приводит к грубым ошибкам, на практике он используется редко. В основном — только для приближенных оценок возможных транспортных потоков в условиях проектирования отдельных элементов города на ближайшую перспективу.

Таблица 4.9. Динамические модели прогнозирования перевозок

Наименование модели	Выражение для определения перспективных корреспонденций
Модель общего фактора роста	$Q_{ij}^n = F Q_{ij}$
Модель среднего арифметического фактора роста	$Q_{ij}^n = 0,5(F_i + F_j) Q_{ij}$
Детройтский метод (модель среднего геометрического фактора роста)	$Q_{ij}^n = \frac{F_i F_j}{F} Q_{ij}$
Метод Фратара	$Q_{ij}^n = 0,5 F_i F_j (L_i + L_j) Q_{ij}$, при $L_i = \frac{\sum Q_{ij}}{\sum t_{ij} F_j}$, $L_j = \frac{\sum Q_{ij}}{\sum t_{ij} F_i}$, где: t_{ij} — время поездки из i в j (трудность сообщения)

Модель среднего арифметического фактора роста, как и предыдущая модель, основывается на материалах обследования существующих корреспонденций между районами. Для расчетов используются средние коэффициенты роста для каждого из транспортных районов, которые рассчитываются на основании фактического и прогнозируемого потоков для этих районов. Хотя средний коэффициент роста и учитывает различные темпы развития тех или иных районов города, однако при значительном росте подвижности населения, появлении новых жилых массивов или крупных промышленных зон он приводит к большим погрешностям, а потому в проектной практике почти не применяется.

Детройтский метод, впервые примененный при проектировании системы магистралей г. Детройта (США) в 1953 г., в отличие от предыдущей модели, помимо коэффициентов роста отдельных районов учитывает также и коэффициент роста для всего города. Он не является сложным для расчетов, но позволяет получить более высокую точность прогноза, чем в предыдущем методе. Однако и он имеет недостатки, в частности, его прогноз может значительно отличаться от итоговых корреспонденций. И это отличие будет тем больше, чем больше отличаются темпы роста отдельного района от города в целом.

Метод Фратара был разработан в начале 1950-х годов в США проф. Томасом Дж. Фратаром. В нем используется итерационный процесс приближения к итоговому решению. Причем результаты расчета каждого промежуточного шага являются исходными данными для последующего. Этот процесс ведется до тех пор, пока не будет достигнуто равенство между заранее определенной величиной транспортного оборота района и суммой корреспонденций, полученной в результате расчета для этого района. Метод Фратара получил наибольшее распространение среди всех экстраполяционных методов формирования матрицы корреспонденций. Все трудоемкие расчеты этого метода выполняются при помощи компьютера.

МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕЗДОК ПО СЕТИ

5.1. Модели распределения поездок на индивидуальном транспорте

Последний, *четвертый этап* четырехшаговой процедуры определения спроса на транспортные услуги заключается в *распределении поездок по сети*. На этом этапе прогнозируется, каким путем пользователь будет перемещаться между транспортными районами, и тем самым формируются различного вида транспортные потоки по сети. Решение задачи на этом этапе можно представить себе, как *равновесную модель* между спросом на поездки, которые сформировались на предыдущих этапах процедуры, и возможностями путей сообщения с соответствующим уровнем обслуживания. Таким образом, на этом этапе необходимо исследовать возможности транспортной сети по пропуску транспортных потоков.

Количество возможных путей между какими-либо парами транспортных районов зависит от способа выполнения поездки. При поездке на индивидуальном транспорте (личном автомобиле) у водителя имеется выбор между несколькими вариантами маршрута передвижения. К тому же этот маршрут может быть изменен в процессе поездки. В свою очередь поездка на общественном транспорте может быть выполнена по ограниченному или даже по единственному возможному маршруту.

Перед распределением поездок по сети рассматривают различия между поездкой пользователя и поездкой, выполняемой транспортным средством. В этом случае необходимо учитывать *количество пользователей, перемещающихся в одном транспортном средстве*. Для индивидуального транспорта количество его пользователей существенно зависит от цели поездки. Как правило, минимальные значения характерны для деловых поездок, а максимальные — для рекреационных. Обычно вопрос количества пользователей в транспортном средстве решается на стадии выбора способа выполнения поездки путем использования вложенных логит-моделей, в которых на определенном

подуровне прогнозируется количество поездок с одним водителем, водителем и одним пассажиром, водителем и двумя пассажирами и т. п.

При распределении потоков на сети необходимо определить их изменение в течение суток. Обычно выполняют 3 отдельных распределения для утреннего часа пик, вечернего часа пик и остального периода с учетом суточного баланса поездок. Естественно, наиболее значимым для пропускной способности транспортной сети является период утреннего часа пик. В этот период поездки осуществляются от районов-источников к районам-целям, тогда как в вечерний период времени направление перемещения изменяется на противоположное. В связи с этим на данном этапе матрицы зарождения-поглощения заменяются матрицами отправления-прибытия.

Обычно критерием распределения поездок по сети является время поездки, которое ассоциируется с затратами пользователя. В развитых моделях в качестве критерия используется понятие общих затрат, которые учитывают время поездки, затраты топлива, плату за проезд по дорогам, среднюю скорость, количество остановок и т. п.

С учетом закономерностей транспортных потоков, рассмотренных в главе 2, можно проследить четкую зависимость условий движения от величины транспортного потока. С ростом интенсивности транспортного потока снижается его средняя скорость, начинают возникать заторы. Следовательно, возрастают продолжительность поездки и все связанные с этим затраты. Можно записать, что затраты на поездку по определенной транспортной связи зависят от проходящего по ней транспортного потока и характеристик самой связи

$$C_a = C_a(N_a).$$

Можно ожидать, что зависимость будет возрастающей с увеличением интенсивности транспортного потока за исключением очень низкой интенсивности, когда продолжительность поездки не будет возрастать при незначительном росте интенсивности.

Ключом распределения транспортных потоков по сети служит выявление закономерностей поведения пользователей. В 1952 г. проф. Вардроп предложил два независимых принципа выбора маршрута движения. Первый принцип заключается в том, что пользователи выбирают маршрут, сводя к минимуму собственное время поездки, — пользова-

тельское распределение. Рассмотрим его на простом примере. Между районами отправления и прибытия существуют два альтернативных маршрута. Для маршрута через центр города установлена следующая зависимость времени сообщения в зависимости от интенсивности транспортного потока:

$$t_1 = 10 + 0,02 N_1.$$

Для маршрута в обход центра города продолжительность поездки больше, но зависит от интенсивности транспортного потока в меньшей степени:

$$t_2 = 15 + 0,005 N_2.$$

С помощью этих зависимостей можно получить в этом простейшем случае прямое решение для первого принципа Вардроба как функции интенсивности общего потока $N = N_1 + N_2$:

$$15 + 0,005 N_2 = 10 + 0,02 (N - N_2),$$

$$N_2 = 0,08 N - 200.$$

В связи с тем, что значение интенсивности транспортного потока может иметь только положительную величину, значение N может быть равно или больше $200,0/0,8 = 250,0$. Таким образом, если $N < 250$, продолжительность поездки через центр будет меньше, чем в обход, — все водители поедут по маршруту через центр города. При $N > 250$ будут использоваться оба маршрута. Например, при $N = 2000$ значение $N_1 = 600$ и $N_2 = 1400$, а продолжительность поездки по одному и второму маршруту составит 22 мин.

Согласно второму принципу Вардроба пользователи распределяются по сети таким образом, чтобы среднее или общее время поездки всех пользователей было минимальным, — социальное или нормативное распределение. Второй принцип Вардроба обеспечивает минимальные затраты на обеспечение поездок. Позднее был сформулирован третий принцип распределения поездок — случайное распределение, который исходит из того, что пользователь имеет неполную информацию о маршруте, обеспечивающем минимальное время поездки, и таким образом выбирает маршрут не до, а в процессе поездки, который не объективно, а только с его точки зрения является самым быстрым.

Необходимо обратить внимание, что только второй и третий принципы Вардропы обеспечивают распределение поездок по всей транспортной сети, тогда как первый принцип распределяет поездки только по маршрутам с минимальным временем поездки от пункта отправления до пункта назначения.

Из трех принципов распределения поездок следует, что в любом случае в их основе лежит построение дерева кратчайших расстояний. На следующем шаге на дуги (отрезки) сети, входящие в дерево кратчайших расстояний, необходимо распределить поездки. В данном случае используется несколько подходов.

Первый подход получил название «все или ничего» и заключается в том, что все поездки между транспортными районами распределяются на отрезки, входящие в дерево кратчайших расстояний. Таким образом, все пользователи для поездки выбирают одни и те же маршруты, так как не учитывается фактор перегрузки дорог. Этот подход не представляет практического интереса при транспортном планировании, однако он может наглядно показать, какие транспортные связи желательно развивать с точки зрения интересов пользователей. Данный принцип также является базовым для более развитых методов распределения поездок. Рассмотрим использование принципа «все или ничего» на примере.

Матрица поездок приведена в таблице 5.1.

Схема транспортной сети и распределение поездок по ней приведены на рисунке 5.1.

Таблица 5.1. Матрица поездок

Районы отправления	Районы прибытия	
	C	D
A	400	200
B	300	100

Очевидно, что из района A до района C кратчайший путь будет отображаться следующей последовательностью узлов: 1–2–3–4–8. Соответствующий поток по всем звеньям (отрезкам) составит 400 единиц. Из района A до района D кратчайший путь: 1–2–6–7–10–12–13. Поток составит 200 единиц.

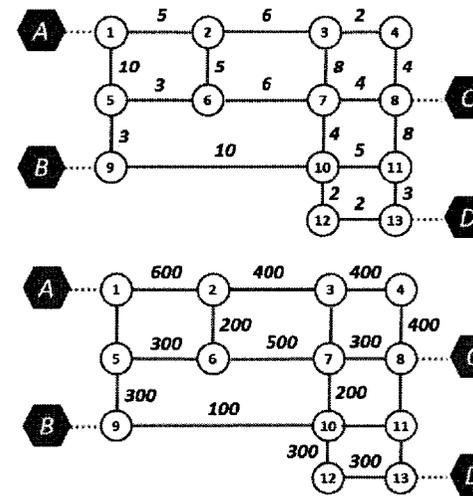


Рис. 5.1. Схема транспортной сети и результат распределения поездок по принципу «все или ничего»

Из района B до района C кратчайший путь: 9–5–6–7–8. Поток составит 300 единиц. Из района B до района D кратчайший путь: 9–10–11–12–13. Поток составит 100 единиц.

Решение получается суммированием потоков по соответствующим отрезкам транспортной сети.

Лучше отражает действительность второй подход, при котором поездки распределяются по нескольким путям в порядке возрастания трудности сообщения. Вероятность выбора того или иного пути может быть определена из следующего соотношения:

$$P(r) = \frac{W_{ijr}^{-1}}{\sum_x W_{ijx}^{-1}}$$

где: W_{ijr} — трудность сообщения от i до j по маршруту r ; x — количество возможных маршрутов.

На практике два описанных подхода не могут быть использованы в чистом виде, т.к. возникает противоречие между стремлением распределить возможно большее количество поездок по наиболее коротким маршрутам для сокращения времени их выполнения и снижением

скорости транспортного потока при повышении его интенсивности. Поэтому необходимо не допускать слишком высокой интенсивности поездок по отрезкам сети. В качестве ограничения распределения поездок на отдельную дугу используется метод, когда трудность сообщения корректируется в зависимости от количества поездок, распределенных на данный маршрут. Для этого может использоваться следующая зависимость для трудности сообщения в зависимости от интенсивности движения по данному пути:¹

$$W = W_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{N}{N_{\max}} \right)^\beta \right],$$

где: W_0 — трудность сообщения без учета интенсивности движения; N — интенсивность движения по данному пути, ед./ч; N_{\max} — предельная интенсивность движения установившегося потока, ед./ч.

Значения параметров α и β зависят от типа дороги, ограничения скоростного режима, используемых технических средств регулирования движения и т. п. Например, для скоростной дороги непрерывного движения при ограничении скорости 110 км/ч $\alpha = 0,83$ и $\beta = 5,5$. Для многополосной городской дороги $\alpha = 0,71$ и $\beta = 2,1$.

В Великобритании для оценки потерь пользователя при выборе маршрута поездки используются следующие зависимости:²

$$W = \begin{cases} \frac{L}{v_0} & N < N_0 \\ \frac{L}{v_0 + \frac{v_0 - v_{\max}}{N_0 - N_{\max}} N_0 - \frac{v_0 - v_{\max}}{N_0 - N_{\max}} N} & N_0 < N < N_{\max} \\ \frac{L}{v_{\max}} + \frac{N/N_{\max} - 1}{8} & N > N_{\max} \end{cases}$$

где: L — протяженность поездки, км; v_0 — скорость свободного потока, км/ч; N_0 — интенсивность движения при свободном потоке, ед./ч; v_{\max} — скорость потока при интенсивности движения N_{\max} , когда условия свободного потока остаются преобладающими, км/ч.

¹ Traffic Assignment Manual // Bureau of Public Roads. Urban Planning Division, US Department of Commerce, Washington. 1964.

² Traffic Appraisal Manual // Department of Transport. HSMO, London. 1985.

Типовые значения, используемые в этой зависимости, приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Типовые значения скорости транспортного потока и его интенсивности по одной полосе дороги, используемые в Великобритании

Тип дороги	v_0 , км/ч	v_{\max} , км/ч	N_0 , ед./ч	N_{\max} , ед./ч
Однополосная загородная	63	55	400	1400
Двухполосная загородная	79	70	1600	2400
Однополосная городская	45	25	500	1000

Результаты, наиболее приближенные к практике, дают модели, в которых учитывается психология поведения водителей. Исследования показали, что водители при выборе маршрута пытаются найти компромисс между длиной маршрута и временем поездки. В общем виде такая оценка может быть представлена в следующем виде:

$$C = aL + bT,$$

где: a и b — весовые коэффициенты предпочтения пользователей; T — время поездки, мин.

Пример 6. Выполнение расчетов в PTV VISUM. Распределение поездок по сети — индивидуальный транспорт.

Перед распределением поездок по сети необходимо просуммировать полученные на предыдущем шаге матрицы по слоям спроса, для получения единой матрицы корреспонденций на определенном виде транспорта с помощью процедуры *Комбинация матриц и векторов*, предварительно создав итоговые матрицы корреспонденций и привязав их к сегментам спроса (рис. 5.2).

Для определения загруженности сети индивидуальным транспортом (легковым или грузовым) необходимо создать процедуру *Перераспределение ИТ*, указав виды транспорта, для которых будет выполнено перераспределение (рис. 5.3).

Результат перераспределения будет представлен в окне *Редактор сети* (рис. 5.4, 5.5).

В PTV VISUM может применяться несколько типов перераспределения поездок по сети.

5.2. Модели распределения поездок на общественном транспорте

Моделирование выбора пользователем поездки на общественном транспорте (транспорте общего пользования) является во многом более трудной задачей, чем распределение поездок индивидуальных транспортных средств (автомобилей) по сети по следующим причинам:

- Транспортная сеть общественного транспорта (ОТ) помимо автомобильных дорог может включать внеуличные отрезки путей рельсового транспорта. По некоторым улицам могут проходить выделенные полосы для движения ОТ, движение подвижного состава осуществляется между остановочными пунктами, и поэтому сеть общественного транспорта более сложна для моделирования.
- На общественном транспорте моделируется движение пассажиров, а не транспортных средств. Пассажир должен прийти до остановки, выбрать вид транспорта и маршрут для достижения цели поездки. Задача существенно усложняется, если пассажир имеет возможность выбора между несколькими маршрутами и видами ОТ для достижения одного и того же пункта. Вблизи остановки он может зайти в магазин или кафе и только потом воспользоваться общественным транспортом. Все это требует наличия в модели дополнительных моделирующих поведение пользователя алгоритмов.
- Прямые затраты владельца индивидуального транспорта в целом прямо пропорциональны расстоянию поездки. Это не может быть распространено на пассажира ОТ и зависит от тарифной системы, используемого способа оплаты проезда (разовый билет на поездку, на определенное время или количество дней, или на несколько поездок).

Количество пассажиров, перемещающихся в единице подвижного состава общественного транспорта, определяется коэффициентом наполняемости, который может принимать различные значения в зависимости от типа ОТ, интервала движения, дня недели, времени суток и т. п. Также необходимо учесть, что коэффициент наполняемости может дать разные значения числа пассажиров для ОТ в зависимости от нормы наполняемости, которая в различной документации на подвижной состав может принимать значение от 3 до 8 чел./м².

При выборе пользователем способа поездки на общественном транспорте его *затраты* могут быть представлены следующим выражением:

$$C = a_1 t_d + a_2 t_n + a_3 t_{ож} + a_4 t_{пер} + a_5 t_3 + a_6 c_r,$$

где: t_d — время поездки на ОТ между требуемыми остановками, мин.; t_n — время пешего передвижения (подхода) до остановочного пункта отправления и от остановочного пункта прибытия, мин.; $t_{ож}$ — время ожидания прибытия подвижного состава ОТ, мин.; $t_{пер}$ — время пересадки между маршрутами или видами ОТ, мин.; t_3 — среднее время случайной задержки, мин.; c_r — величина оплаты проезда; $a_1 - a_6$ — весовые коэффициенты для указанных составляющих затрат.

Задачу выбора оптимальной стратегии поездки от i до j можно описать следующей линейной функцией, минимизирующей сумму переменных, отображающих затраты, связанные с продолжительностью поездки и ожидания пассажиров:

$$\text{Min} = \left\{ \sum_s Q_k t_d + \sum_{ij} \tau_{ож} \right\};$$

$$\tau_{ож} = \frac{Q_{ij}}{\sum_{k \in s_j} n_k},$$

где: Q_k — количество пассажиров на участке маршрута k , прилегающем к узлу i , чел.; s — массив участков, прилегающих к узлу i и входящих в возможный маршрут от i до j ; $\tau_{ож}$ — величина, отображающая затраты пассажиров на ожидание транспорта, мин.; Q_{ij} — количество пассажиров, желающих воспользоваться маршрутным транспортом от i до j , чел.; n_k — интенсивность отправления пассажиров (частота движения) по участку маршрута k .

Учитывая, что количество пассажиров, которые могут воспользоваться участком маршрута k , равно сумме прибывающих в узел i пассажиров по всем участкам, можно выразить ограничение для количества пассажиров, которые могут воспользоваться участком k :

$$Q_k \leq n_k \tau_{ож}.$$

Тогда стратегию выбора можно представить следующей гиперболической функцией:

$$\text{Min} \left\{ \sum_{ij} \frac{Q_{ij} \left(\sum_s t_d n_k + 1 \right)}{\sum_{k \in s_j} n_k} \right\}.$$

Данная стратегия реализована, например, в программном комплексе *EMME/2* канадской компании *INRO Consultants Inc.*, предназначенном для перспективного планирования городского транспорта.

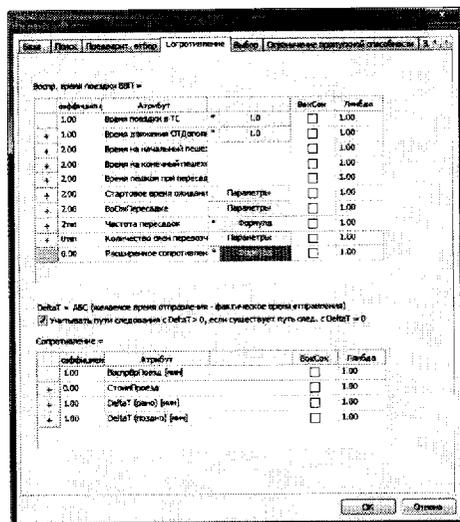


Рис. 5.6. Определение затрат на поездки с использованием общественного транспорта для перераспределения

Пример 7. Выполнение расчетов в PTV VISUM. Распределение поездок по сети — общественный транспорт.

Учитывая специфику перераспределения поездок на общественном транспорте, в PTV VISUM используется процедура *Перераспределение ОТ*.

В зависимости от исходных данных и требований к результатам расчетов может использоваться перераспределение с использованием данных о расписании (или интервалах) движения подвижного состава ОТ или только коридоры передвижения ОТ (аналогично перераспределению индивидуального транспорта).

Составляющие *затрат* настраиваются в параметрах процедуры (рис. 5.6).

5.3. Модели распределения поездок на грузовом транспорте

Для *оптимизации* грузового движения используется традиционный четырехшаговый подход, учитывающий характерные особенности перевозки грузов.

На стадиях генерации и распределения поездок по транспортным районам учитывают следующие факторы:

- *Местоположение* оказывает непосредственное влияние на объем и состав грузов, т. к. грузовые перевозки непосредственно связаны с экономикой и конечными потребителями продукции.
- *Номенклатура перевозимых грузов* значительна по количеству видов и чрезвычайно разнообразна, что превосходит даже детальную группировку пользователей и целей поездок на индивидуальном транспорте. Это может быть причиной необходимости разработки большого количества матриц корреспонденций вследствие существенных отличий в условиях перевозок по маршрутам, типам подвижного состава и т. п.
- *Подвижной состав* грузового транспорта варьируется от «развозных фургонов» на базе легковых автомобилей до тягачей с прицепами для перевозки тяжеловесных и негабаритных грузов, очень разнообразен по своим габаритным и тягово-скоростным характеристикам. Таким образом, в модели необходимо учитывать большое число групп подвижного состава.
- *Операторы грузовых перевозок* представляют собой как крупные транспортные компании, так и небольшие фирмы, включая индивидуальных владельцев. Это предопределяет использование разнообразных стратегий и технологий перевозок.
- Существенные *колебания объемов перевозок*, связанные с сезонностью, например, перевозки сельхозпродукции, строительством крупных объектов и т. п.
- *Стоимость* грузовых перевозок, в отличие от пассажирских, в основном является закрытой информацией, т. к. зависит от условий договоров между бизнес-партнерами, объемов перевозок и т. п.

Непосредственный анализ географии и объемов по большинству грузовых потоков может быть выполнен по отдельным видам грузов на основании исследования статистики работы различных отраслей промышленности. Это дает надежные результаты для междугородных перевозок, но плохо подходит для исследования перевозок грузов в городе.

Хорошие результаты могут быть получены на основе анализа статистики по объемам производства и потребления продукции в исследуемом регионе.

Для прогноза изменения грузопотоков могут использоваться традиционные методы, в том числе рассмотренные выше.

Для оценки потребности в грузовых перевозках широко используются линейные регрессионные зависимости, по которым определяют соотношение между численностью и социальным составом жителей и объемом потребления товаров, вывоза бытовых отходов и т. п. Также при этом могут учитываться такие показатели как емкость складов, площади торговых центров и зон отдыха.

Для распределения грузовых перевозок по транспортным районам традиционная гравитационная модель используется в следующей форме:

$$Q_{ij} = A_i B_j O_i D_j \exp(-\beta C_{ij}),$$

где: A_i, B_j — факторы, величина которых определяется для районов отправления и прибытия при балансировке модели; O_i — объем отправления грузов, т; D_j — объем прибытия грузов, т; β — коэффициент калибровки модели; C_{ij} — затраты на перемещение единицы продукции между транспортными районами.

В связи с тем, что коэффициент использования пробега, как правило, имеет значение около 0,5, т. е. на каждую езду с грузом приходится одна холостая, это необходимо учитывать при планировании загрузки транспортной сети. Обычно в простейшем случае холостые ездки учитываются как некоторая доля от ездки с грузом, но в обратном направлении. Тогда суммарное количество поездок между транспортными районами составит

$$z_{ij} = \frac{1}{q_\phi} (Q_{ij} + k Q_{ji}),$$

где: q_ϕ — фактическая грузоподъемность транспортного средства, т; k — коэффициент, определяемый опытным путем как функция от объема перевозок и расстояния между транспортными районами.

Задача распределения по районам решается отдельно для каждого типа груза по укрупненной номенклатуре.

Затраты на доставку грузов принято определять по следующей зависимости, хотя, если имеются точные данные их использование предпочтительнее:

$$C_{ij} = c_{ij} + b_1 t_{ij} + b_2 \sigma t_{ij} + b_4 p_{ij},$$

где: c_{ij} — стоимость перевозки для заказчика услуги из района i в район j , руб.; t_{ij} — продолжительность перевозки, ч; σt_{ij} — отклонение времени доставки, ч; p_{ij} — вероятность повреждения или потери груза во время перевозки; $b_1 - b_4$ — весовые коэффициенты для используемых факторов.

Анализируя форму гравитационной модели для грузовых перевозок, легко заметить, что если значение коэффициента β стремится к 0, то стоимость перевозки не влияет на предпочтения заказчиков. Если значение β достаточно велико, то стоимость становится решающим фактором и проблема сводится к распределительной задаче линейного программирования

$$\text{Min} \left\{ \sum_{ij} Q_{ij} C_{ij} \right\} \text{ при } \sum_i Q_{ij} = D_j; \sum_j Q_{ij} = O_i.$$

Распределение перевозок по сети выполняется в зависимости от возможности проезда грузовых транспортных средств по дорожной сети отдельно по группам грузоподъемности.

КАЛИБРОВКА МОДЕЛЕЙ

6.1. Понятие и цели калибровки

Валидация — сравнение данных, полученных из натуральных наблюдений, с данными из модели. С помощью стандартных статистических показателей (коэффициент корреляции, коэффициент детерминации, среднее квадратическое отклонение, средняя относительная ошибка и т. д.) определяется качество результатов расчетов транспортной модели.

Верификация — проверка соответствия формы модели условиям исследуемого объекта, т. е. это процесс проверки правильности структуры (логики) модели.

Калибровка — процесс настройки (изменения параметров процедур расчета транспортного спроса и/или настройка транспортного предложения) показаний выходной величины (результатов транспортного моделирования) до достижения согласования между эталонной величиной на входе (наблюдаемые значения) и результатом на выходе (с учетом оговоренной точности).

Действия при калибровке — настройка параметров функций и моделей, корректировка данных (примыкания, характеристики отрезков и т. д.).

Транспортная модель является упрощенным представлением реальной транспортной ситуации. После ввода исходных данных и расчета транспортного спроса проводится проверка модели и определяется, насколько точно модель совпадает с реальной ситуацией. Данный процесс называется процессом валидации модели. При отклонении заранее определенных показателей от допустимой нормы проводится ряд изменений в модели с последующим перерасчетом — калибровка.

Для проверки адекватности модели определяются значения ряда показателей на основе сравнения расчетных значений интенсивностей движения из модели и данных натуральных обследований.

Если показатели качества модели выходят за допустимые границы, необходимо проводить калибровку модели. В процессе калибровки

проводится серия вычислительных экспериментов с моделью. При этом меняются определенные характеристики или параметры модели с целью достижения максимально возможного уровня соответствия данных натуральных обследований расчетным значениям интенсивности.

Для оценки адекватности и качества транспортных моделей используются 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.

Средняя абсолютная ошибка — среднее отклонение абсолютных значений (разница между наблюдаемым и рассчитанным значением)

$$(\delta_a) = \frac{1}{N} \sum \text{abs}(Z_i - U_i),$$

где: Z — наблюдаемое значение, U — значение, полученное из модели, N — количество точек наблюдения.

Средняя относительная ошибка — среднее отклонение абсолютных значений

$$(\delta_p) = \frac{\sum \text{abs}(Z_i - U_i)}{\sum Z_i} 100\%,$$

где: Z — наблюдаемое значение, U — значение, полученное из модели, N — количество точек наблюдения.

Абсолютное значение *RMSE* (*root of mean squared error*) — среднее квадратическое отклонение

$$(\vartheta_a) = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Z_i - U_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}},$$

где: Z — наблюдаемое значение, U — значение, полученное из модели, N — количество точек наблюдения.

Относительное значение *RMSE* (*root of mean squared error*) — относительное среднеквадратическое отклонение

$$(\vartheta_3) = \frac{\vartheta_a}{\sum Z_i / N} = \frac{\sqrt{\sum (Z_i - U)^2 / (N-1)}}{\sum Z_i / N},$$

где: *Z* — наблюдаемое значение, *U* — значение, полученное из модели, *N* — количество точек наблюдения.

Коэффициент корреляции

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

$$\bar{Z} = \frac{1}{N} \cdot \sum Z_i, \bar{U} = \frac{1}{N} \cdot \sum U_i,$$

где: *Z* — наблюдаемое значение, *U* — значение, полученное из модели, *N* — количество точек наблюдения.

6.2. Основные методы калибровки транспортных моделей

Процесс калибровки стоит начинать с более глобальных параметров, затем переходя к локальным. Первыми калибруются все расчетные функции и их параметры, а потом, при необходимости, возможна калибровка параметров транспортного предложения.

Для наглядности действий на этапе калибровки необходимо изменять только один параметр за один раз и проверять его влияние на результаты расчета модели. Если при калибровке на один и тот же объект оказывают влияние несколько параметров, необходимо проводить несколько испытаний и выбрать оптимальный набор значений параметров.

В процессе калибровки проводится серия вычислительных экспериментов с моделью, при этом корректируются определенные характеристики или параметры модели с целью достижения максимально возможного уровня соответствия данных из натуральных обследований расчетным значениям интенсивности.

Общие параметры, используемые при калибровке транспортной модели, представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1. Объекты калибровки транспортной модели

Место	Параметр	Действие	Местное	Глобальное
1	2	3	4	5
Кордонные транспортные районы	Вид моделирования	Насколько сложно интегрированы потоки из/в кордонных районов (отдельные матрицы, отдельный расчет спроса на транспорт, количество слоев). С учетом кордонных районов/окрестности/расширенной окрестности	x	x
	Процедуры	Количество итерации		x
Примыкания	Затраты по видам транспорта	Затраты на примыканиях (например, время в пути) представляют собой средние затраты доступа из любого дома в сеть. Можно регулировать общее значение затрат или локально улучшить/ухудшить привлекательность отдельных транспортных районов	x	x
	Распределения потоков по нескольким примыканиям одного транспортного района	Для более точного распределения потоков выходящих/входящих через несколько примыканий в один транспортный район возможно определить доли потоков через примыкания по видам транспорта	x	
	Количество примыканий	Чем больше примыканий одного транспортного района, тем более равномерно распределяются потоки в сети	x	
	Выбор примыкающего узла	Узел, из которого начинается примыкание, будет обязательно иметь потоки (если транспортный район генерирует или притягивает потоки). Но потоки внутри узла не будут реальными, т. к. они, например, входят на отрезок/узел, а потом выходят из него через виртуальный отрезок (примыкание)	x	
	Формула сопротивления	Для учета затрат на примыкании возможно использовать комбинацию нескольких затрат (например, сумма постоянного значения и времени в пути) или затраты на примыканиях не учитывать		x

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5
Примыкания	CR-функция	Возможно использовать CR-функции для учета уровня загрузки на примыканиях		x
	Закрытие видов транспорта	Возможно для отдельных видов транспорта закрыть примыкание	x	
Отрезки	Затраты по видам транспорта	На отрезках определяется скорость свободного движения, из которой рассчитывается время в пути (при свободном движении) на основе длины отрезка. Время в пути необходимо для расчета кратчайшего пути при расчете матриц затрат и перераспределения. Возможна калибровка по скорости движения определенных видов транспорта, чтобы улучшить/ухудшить привлекательность отрезка	x	
	Формула сопротивления	Для учета затрат на отрезках возможно использовать комбинацию нескольких затрат (например, время в пути) или затраты на отрезках не учитывать		x
	CR-функция	Возможно использовать CR-функции для учета уровней загрузки на отрезках. Множество разновидностей для разных условий, например, городских без застройки, вне города и т. д.		x
	Количество полос/Учет запаркованных автомобилей на отрезках	Пропускная способность отрезка может быть меньше, чем определяется через количество полос, т. к. одна или несколько полос возможно частично заняты припаркованными транспортными средствами	x	
	Закрытие видов транспорта	Возможно для отдельных видов транспорта закрыть отрезок	x	
	Пропускная способность	Величина пропускной способности представляет собой пропускную способность отрезка (сумма из всех полос) в определенный временной интервал (обычно суток или часов). Величина пропускной способности должна быть согласована с параметрами CR-функции	x	
	Типы отрезков (ранг)	В случае равных затрат по нескольким путям одной корреспонденции модель требует дополнительную информацию о значимости отрезка, в том числе для определения главной дороги. Это моделируется с помощью типа отрезков/ранг	x	

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5
Узлы	Закрытие видов транспорта для поворота	Возможно для отдельных видов транспорта закрыть отдельные повороты	x	
	Пропускная способность поворота	Возможно использовать узел более подробно с учетом времени проезда. Тогда необходимо определить пропускную способность, которая представляет собой пропускную способность поворота в промежуток времени (обычно сутки или час). Величина пропускной способности должна быть согласована с параметрами CR-функции	x	(x)
	Затраты на поворот по видам транспорта	На поворотах определяется время в пути свободного движения. Время в пути необходимо для расчета кратчайшего пути при расчете матриц затрат и перераспределения. Возможно калибровать это время в пути по видам транспорта свободного движения, чтобы улучшить/ухудшить привлекательность поворота	x	
	CR-функция	Возможно использование CR-функции для учета уровней загрузки на поворотах. Множество вариантов для различных условий, например, со сигнальной светофорной установкой, пересечение с круговым движением и т. д.		x
Транспортные районы	Площадь/Размер	Площадь транспортного района напрямую не влияет на расчет спроса, но ее определение и размеры должны быть выполнены однородно		x
	Однородность	Внутри одного транспортного района не должно быть разных структур (одновременно жилой район и промышленный район)		x
	Правильность данных статистики	Данные статистики по транспортным районам внутри одной модели должны соответствовать друг другу. Даже если абсолютное значение неверное, но источник данных статистики однороден, существует возможность прогнозировать тенденции		x
	Место-положение центра тяжести	К центру тяжести привязываются примыкания (и определяются затраты на примыкание). Он должен быть расположен приблизительно в области нахождения настоящего центра тяжести всех данных статистики		x

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5
Создание транспортного движения	Количество слоев спроса	Чем больше слоев спроса, тем подробнее модель, но требует больше исходных данных и внимания при калибровке. Если исходных данных немного, лучше использовать меньше слоев спроса, чтобы избежать неопределенности		x
	Привязка данных статистики к слоям спроса	Каждый слой спроса обязательно привязан к одним или нескольким данным статистики. При определении слоев спроса необходимо это учитывать		x
	Степени создания и притяжения	Степени создания и притяжения по слоям спроса определяются опросом, и четко привязаны к определенным данным статистики. Изменение их значения уменьшает/увеличивает общее количество генерированного потока по слоям спроса		x
	Нормирование граничных сумм потока внутри одного транспортного района	Сгенерированный поток, который выходит из одного транспортного района, должен быть приблизительно равным входящим потокам этого транспортного района, т.к. предполагается, что все люди возвращаются домой вечером. Неравновесие можно регулировать с помощью степени создания и притяжения таких слоев спроса, как «Прочее-Прочее», т.к. они являются самыми неизвестными слоями		x
Оценка	Выбор затрат	Существует множество затрат (временные, расстояния, денежные, скорости и производные), которые можно вычислить по видам транспорта. Выбор затрат должен представлять те затраты, которые в основном определяют выбор путей		x
	Комбинация затрат	Выбор производится обычно не только на основе одного вида затрат, например, для ОТ (время в пути и денежные затраты). Количественное отношение между ними необходимо калибровать		x
	Функция оценки	Существует множество разных видов функций оценки (BoxCox, Kirchoff, EVA и т.д.). Каждая из них имеет свои области применения и ограничения, которые необходимо соблюдать		x
	Параметры функции оценки	Параметры функции оценки определяют поведение людей при выборе цели и вида транспорта. Соответственно можно калибровать распределение дальности/времени пути поездки по видам транспорта и распределения потоков между видами транспорта		x

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5
Оценка	Параметры поиска путей	Рассчитаются кратчайшие пути и затраты на них. С помощью параметров поиска путей можно регулировать эти пути, учитывая в расчетах затраты		x
	Нормирование между направлениями	Для более быстрого нахождения равновесия рекомендуется затраты, которые используются для оценки, нормировать между направлениями		x
Распределение транспортного движения	Расчетная модель	Существует ряд моделей для распределения транспортного движения. Расчетная модель должна быть согласована с исходными данными		x
	Нормирование	Более продвинутые модели распределения транспортного движения требуют для алгоритма решения определение условий нормирования контрольных сумм		x
	Оценка	Оценка в расчете распределения транспортного движения прямо влияет на дальность/время пути поездки		x
Выбор вида транспорта	Расчетная модель	Существует ряд моделей для выбора вида транспорта. Расчетная модель должна быть согласована с исходными данными		x
	Оценка	Оценка в расчете выбора вида транспорта по дальности/времени в пути прямо влияет на распределение между видами транспорта		x
Перераспределение ИТ	Основная нагрузка от ТС ОТ	В моделях городов влияние общественного транспорта на общую загрузку сети играет значительную роль. В таких случаях необходимо его учитывать как основную нагрузку		x
	Коэффициенты приведения для грузовых автомобилей	Каждый тип транспортного средства загружает сеть по-разному. Для сравнения необходимо привести все к единой единице измерения. Обычно переводится все к легковым единицам		x
	Модель обратного затора	На загруженной сети необходимо учитывать затор, который образуется на предыдущих элементах сети, например, сигнальной светофорной установки влияет не только на узел, но и на предыдущий отрезок		x
	Учет пешеходов как нагрузка ИТ	В случае моделирования пешеходных потоков необходимо иметь в виду, что пешеходные потоки не влияют как системы транспорта ИТ на уровень загрузки ИТ		x

1	2	3	4	5
Перераспределение ИТ	Учет единицы матриц	Необходимо перевести матрицы корреспонденций из расчета спроса с единицы пользователя (человека) на единицу транспортного средства (автомобиль) соответственно среднему уровню наполнения		x
	Модель перераспределения	Существует множество различных моделей перераспределения: постепенное перераспределение, равновесное перераспределение, обучающая процедура, стохастическое перераспределение, динамическое равновесное перераспределение, динамическое стохастическое перераспределение и т. д. Каждое перераспределение имеет свои особенности, которые необходимо изучать и правильно применять		x
	Критерии конвергенции	Перераспределение является итерационным процессом. Для нахождения точки равновесия используются критерии конвергенции, которые необходимо правильно определить		x
	Мульти-перераспределение	Продвинутое перераспределение может одновременно загрузить сеть несколькими видами транспорта, так же как это происходит в реальности		x
Перераспределение ГПТ	Загрты для выбора пути	Существует множество затрат (временные, расстояния, денежные, скорости и производные), которые можно вычислить. Выбор затрат должен включать те затраты, которые в основном определяют выбор путей		x
	Критерии конвергенции	Перераспределение является итерационным процессом. Для нахождения точки равновесия используются критерии конвергенции, которые необходимо правильно определить		x
	Модель перераспределения (гипотеза о знании расписания)	Продвинутые модели перераспределения для ГПТ располагают возможностью учитывать разные уровни знания расписания, например, 100%, только расписание и прохождение на остановочном пункте отправления, знание интервала и т. д.		x
	Учет дискомфорта из-за наполненности	При большой наполняемости подвижного состава ГПТ необходимо использовать функцию, которая учитывает дискомфорт пассажира при большой наполняемости		x

ТРАНСПОРТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

7.1. Прогнозирование социально-экономических показателей развития региона

В основе транспортной модели лежат данные социально-экономической статистики, которые «генерируют» транспортные потоки на основе параметров транспортного поведения населения. Таким образом, для расчета прогнозных значений интенсивностей движения необходимо определить развитие демографической ситуации на перспективу.

Основными факторами, влияющими на транспортные потоки, являются:

- изменение в данных социально-экономической статистики — численность населения, изменение численности работников и т. д.;
- изменение уровня автомобилизации населения;
- использование альтернативных видов транспорта, например, замещение общественного транспорта индивидуальным (легковыми автомобилями) и наоборот;
- изменения в УДС, сети автомобильных и железных дорог;
- изменение в оценке стоимости времени.

Эти факторы должны формироваться на основе анализа прогнозов и программ развития транспортного комплекса Российской Федерации, анализа градостроительных планов и стратегий развития территорий, входящих в зону тяготения исследуемого объекта, а также других документов, содержащих информацию о прогнозах развития территорий в области тяготения.

Все перечисленные факторы прямо или косвенно влияют на транспортную подвижность (мобильность) населения, что в свою очередь приводит к увеличению общего числа поездок, их частоте и дальности. На основе прогноза указанных показателей строятся прогнозные значения социально-экономической статистики для каждого транспортного района.

Для получения прогнозных оценок численности населения транспортных районов целесообразно использовать *трендовые модели*. При

этом следует различать два понятия, связанных с прогнозированием, — предсказание и собственно прогнозирование. Под *предсказанием* понимают суждение о будущем состоянии процесса, основанное на субъективной оценке большого числа факторов качественного и количественного характера. *Прогнозирование* — это исследовательский процесс, в результате которого получают прогноз о состоянии объекта. Прогноз является вероятностным суждением о возможном состоянии объекта или об альтернативных путях его достижения. Известно большое количество методов, методик и способов прогнозирования. Все они основаны на двух различных подходах: эвристическом и математическом.

Эвристические методы базируются на использовании явлений или процессов, неподдающихся формализации.

Для *математических методов* прогнозирования характерен подбор и обоснование математической модели исследуемого процесса, а также способов определения ее неизвестных параметров. Задача прогнозирования при этом сводится к решению уравнений, описывающих данную модель для заданного момента времени. Среди математических методов прогнозирования в особую группу выделяются методы экстраполяции, которые отличаются простотой, наглядностью и легко реализуются на ЭВМ. Методологическая предпосылка экстраполяции состоит в признании преимущественной связи между прошлым, настоящим и будущим. При этом развитие экономических явлений наиболее полно находит свое отражение во временных рядах, которые представляют собой упорядоченные во времени наборы измерений каких-либо характеристик исследуемого объекта, процесса. Поэтому независимая переменная для временного ряда — это календарные равные отрезки времени (год, квартал, месяц и т.д.). Основной особенностью, выделяющей временные ряды среди других видов статистических данных, является существенность порядка, в котором производятся наблюдения.

В ходе решения задачи прогнозирования пользуются информацией об одномерном временном ряде конечной длины. При этом в экономике исследуются дискретные временные ряды, наблюдаемые в дискретные моменты времени. Дискретный временной ряд можно рассматривать как последовательность значений $y_1, y_2 \dots y_n$ в моменты времени

$t - y_t$ при $t = 1, 2 \dots n$. Временной ряд может быть представлен в следующем виде:

$$y_t = x_t + \varepsilon_t,$$

где: x_t — детерминированный фактор процесса; ε_t — стохастический фактор процесса.

Детерминированная компонента (тренд) x_t характеризует существующую динамику процесса в целом, основную длительную тенденцию изменения изучаемого показателя. Стохастическая компонента ε_t отражает случайные колебания или шумы процесса. Задача прогнозирования состоит в определении вида экстраполирующих функций x_t и ε_t на основе исходных эмпирических данных.

Наиболее часто используемые функции представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1. Наиболее часто используемые функции

Название	Функция
Линейная	$y(t) = a + bt$
Квадратичная	$y(t) = a + bt + ct^2$
Степенная	$y(t) = a + bt^b$
Экспоненциальная	$y(t) = a \exp(bt)$
Гиперболическая	$y(t) = a + \frac{b}{c+t}$
Логистическая	$y(t) = \frac{a}{1 + b + \exp(-t)}$

При выборе вида аппроксимирующей функции прибегают к графическому способу подбора. Выбирают ту функцию для прогноза, арифметическая средняя для разностного ряда которой будет равна нулю или близка к нулю по абсолютной величине. Окончательное решение о виде аппроксимирующей функции может быть принято после определения ее параметров и верификации прогноза по ретроспективному ряду. Поэтому для прогнозирования используют несколько подходящих аппроксимирующих функций, с тем чтобы после оценки точности выбрать наиболее подходящую.

Отрезок времени от момента времени t , для которого имеются последние статистические данные об изучаемом процессе, до момента,

к которому относится прогноз, называется периодом упреждения (периодом прогноза). Чем меньше период прогноза, тем более надежным будет его результат.

При отсутствии модели социально-экономического развития региона на перспективную интенсивность движения определяют как¹

$$N_t = N_0(1+B)^t,$$

где: N_0 — исходная интенсивность движения, ед./ч; B — среднегодовой прирост интенсивности движения; t — перспективный период прогнозирования, лет.

Среднегодовой прирост интенсивности движения следует принимать на основе анализа изменения интенсивности движения за несколько последних лет.

При разработке мероприятий по организации дорожного движения в связи с реконструкцией дороги с повышением ее технической категории следует учитывать более высокий темп увеличения интенсивности в первые 6 лет эксплуатации. В этом случае прогнозируемая интенсивность движения рассчитывается как

$$N_t = \begin{cases} N_0(1+B_k)^{t-6}, & \text{при } t \leq 6 \\ N_0(1+B_k)^6 \cdot (1+B)^{t-6}, & \text{при } t > 6 \end{cases},$$

где: B_k — прирост интенсивности движения в первые 6 лет эксплуатации объекта реконструкции ($B_k = 1,07 - 1,08$ для дороги категории Ia и $1,04 - 1,05$ для дороги категории Ib).

Еще одним подходом может стать прогнозирование численности населения в регионе с помощью регрессионной модели, анализируя зависимость темпа роста численности населения в регионе от темпа роста численности населения Российской Федерации в целом.

Достоверность и надежность социально-экономических прогнозов зависит от используемой методологии прогнозирования, учета всего многообразия факторов. Прогнозирование должно носить непрерывный характер, обеспечивать преемственность и согласованность про-

¹ Руководство по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах. Утверждено распоряжением Минтранса России от 19.06.2003 № ОС-555-р.

гнозных оценок, как по разным горизонтам, так и при различной степени агрегации.

При разработке прогнозов следует учитывать, что в зависимости от степени агрегации и периода прогнозов изменяются приоритеты целей прогнозирования и факторов развития, а также характера исходной информации, методов ее обработки и анализа.

7.2. Формирование сценариев прогноза

На основе прогнозных параметров, полученных на предыдущем этапе, а также требований проекта необходимо составить различные сценарии для моделирования. Целесообразно учитывать следующие факторы при разработке списка сценариев:

- временной горизонт: на ближайшую перспективу — до 10 лет и расчетный срок — 20 лет;
- варианты развития социально-экономической ситуации: пессимистичный и наиболее вероятный сценарии;
- варианты развития перспективной сети — строительство новых магистралей, мостов и т. д.;
- возможное изменение стоимости времени;
- различные уровни тарифа — от минимального до максимального (для платных объектов).

Целесообразно выбирать наиболее вероятные сценарии для сокращения общего числа расчетов.

7.3. Учет влияния индуцированного транспортного спроса в моделях прогнозных лет

Одним из допущений стандартной четырехшаговой модели в классическом ее понимании является отсутствие учета индуцированного транспортного спроса в полной мере и, как следствие, влияния индуцированного (отложенного) транспортного движения. В широком смысле «индуцированность» означает неявную зависимость одного обстоятельства от другого. Применительно к транспортному моделированию это означает, что улучшение в транспортной инфраструктуре (особенно увеличение пропускной способности автомобильной дороги) влечет увеличение интенсивности движения на ней. Существует большое количество исследований, подтверждающих этот факт. Феномен индуцированного транспортного спроса полностью отражает «за-

кон спроса» в экономической теории, который гласит, что потребление товара возрастает с уменьшением цены (обобщенных затрат в приложении к транспортному моделированию).

В основе роста интенсивности движения за счет индуцированного спроса лежит множество причин, среди которых можно выделить наиболее значимые:

- перераспределение общего количества перемещений между районами;
- отток части спроса с других режимов (способов передвижения);
- увеличение привлекательности данного пути по сравнению с альтернативными за счет снизившихся значений обобщенных затрат;
- увеличение интенсивности движения, напрямую связанное с ростом количества перемещений из/в транспортный район, находящийся в непосредственной близости с модифицированным (улучшенным) участком сети.

Первые три пункта находят отражение в четырехшаговой модели. Действительно, с изменением обобщенных затрат меняются результаты второго шага: распределение общего объема транспортного спроса каждого транспортного района происходит с учетом «привлекательности» других районов. Отток части спроса с других способов передвижения учитывается на третьем шаге процедуры. Увеличение привлекательности пути, проходящего через реконструированный или вновь построенный участок, учитывается на этапе перераспределения (четвертый шаг).

Вместе с тем, существует еще четвертая причина, которая не отражена при стандартном подходе, — это возможное увеличение частоты поездов с улучшением транспортной инфраструктуры. Кроме того, для создания эффективных долгосрочных прогнозов целесообразно дополнительно принять к рассмотрению возможные изменения в структуре землепользования области моделирования, которая в свою очередь зависит от изменения обобщенных затрат. Т.к. данные о населении и числе занятых в различных сферах деятельности являются экзогенными параметрами для транспортной модели, изменение обобщенных затрат не оказывает влияния на структуру землепользования. Результаты моделирования можно улучшить, устранив указанные допущения, при использовании дополнительной процедуры оценки индуцированного транспортного спроса.

Несмотря на сложность выявления эффекта индуцированного движения, существуют исследования, предлагающие количественную оценку этого явления. Например, согласно исследованиям, проведенным организацией SACTRA (Постоянный консультативный комитет по оценке автомагистралей) в Великобритании, прогнозы на основе транспортных моделей без учета индуцированного спроса в среднем занижали интенсивность движения на 10–20%. Таким образом, недооценка этого феномена при создании транспортной модели может оказать большое влияние на получаемые результаты и приводить к неточностям при оценке экономической эффективности проекта и, в том числе, при определении оптимального уровня тарифов на платном участке дороги.

Для учета индуцированного спроса в полном объеме рекомендуется производить дополнительную корректировку результатов четырехшаговой процедуры. В основе идеи лежит сравнение обобщенных затрат на перемещение между каждой парой районов в модели прогнозного года (модель 2), в которой были внесены изменения в транспортную сеть, с соответствующими значениями для модели без изменений (модель 1). В роли модели 1 обычно выступает модель базового года. В случае обнаружения значительных уменьшений необходимо провести корректировку отдельных элементов матрицы корреспонденций. Для проведения этих операций необходимо:

1. Осуществить стандартные четыре шага процедуры создания модели 2, повторяя этапы создания, распределения, выбора транспорта и распределения по сети циклично до момента обнаружения сходимости.
2. Сравнить значения обобщенных затрат C_{ij}^2 на перемещение между всеми парами транспортных районов в модели 2 с соответствующими значениями C_{ij}^1 для модели 1. Если C_{ij}^1 превосходит C_{ij}^2 более чем на 5%, увеличить значение для элемента с индексом (ij) в матрице корреспонденций в соответствии с относительным изменением обобщенных затрат.
3. После изменений в матрице корреспонденций провести заново третий и четвертый шаги стандартной процедуры.

Стоит отметить, что на практике наблюдается и обратный процесс: количество поездов может уменьшаться при увеличении расходов на их осуществление. Поэтому, если после достижения сходимости в моде-

ТРАНСПОРТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В УПРАВЛЕНИИ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМОЙ

8.1. Система показателей качества проекта

Существуют различные подходы к оценке эффективности реализации транспортных проектов с использованием моделей. Можно выделить основные два подхода: социально-экономическая эффективность и KPI (*Key Performance Indicators* — сбалансированная система показателей качества проекта).

Одним из наиболее комплексных показателей целесообразности и необходимости развития транспортной инфраструктуры по выбранному сценарию является оценка общественной (социально-экономической) эффективности транспортного инвестиционного проекта, которая включает в себя оценку влияния проекта на различные социальные ценности в денежном выражении — сокращение времени в пути населения и грузов, улучшение экологической ситуации, повышение безопасности дорожного движения и т. д.

Для всесторонней социально-экономической оценки эффективности необходимо учитывать все эффекты от реализации проекта. Учет большинства эффектов затруднен, ввиду сложности их прогноза, а также их взаимного влияния друг на друга. Во многом упростить эту задачу могут модели транспортных потоков.

В качестве основных эффектов для рассмотрения, при анализе проектов по развитию транспортной инфраструктуры, можно выделить следующие:

- изменение времени пребывания в пути пассажиров и грузов;
- изменение эксплуатационных расходов пассажиров и грузоперевозчиков и расходов на оплату проезда;
- изменение расходов (эксплуатационных и прочих) перевозчиков и операторов транспортных услуг;
- изменение доходов перевозчиков и операторов транспортных услуг;

- изменение в степени обеспечения безопасности дорожного движения, например, изменение количества ДТП;
- изменение объемов выбросов вредных веществ в окружающую среду;
- изменение уровня шума.

Основные принципы оценки эффективности любых типов инвестиционных проектов независимо от их технических, технологических, финансовых, отраслевых или региональных особенностей изложены в Методике оценки эффективности¹, которая предусматривает:

- рассмотрение проекта на протяжении всего его жизненного цикла (расчетного периода), от проведения прединвестиционных исследований до завершения проекта;
- моделирование денежных потоков, включающих все связанные с осуществлением проекта денежные поступления и расходы за расчетный период с учетом возможности использования различных валют;
- сопоставимость условий сравнения различных проектов (вариантов проекта);
- использование принципа положительности и максимума эффекта — для того, чтобы инвестиционный проект был признан эффективным, необходимо, чтобы эффект реализации порождающего его проекта был положительным; при сравнении альтернативных инвестиционных проектов предпочтение должно отдаваться проекту с наибольшим значением эффекта;
- учет фактора времени — при оценке эффективности проекта должны учитываться различные аспекты фактора времени, в том числе: динамичность (изменение во времени) параметров проекта и его экономического окружения; разрывы во времени (временные лаги) между производством продукции или поступлением ресурсов и их оплатой; неравноценность разновременных затрат и/или результатов (предпочтительность более ранних результатов и более поздних затрат);

¹ Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. Вторая ред. Утверждены Минэкономки, Минфином и Госкомитетом по строительной, архитектурной и жилищной политике РФ № ВК 477 от 21.06.1999.

- учет только предстоящих затрат и поступлений;
- принцип сравнения «с проектом» и «без проекта» — оценка эффективности инвестиционного проекта должна производиться сопоставлением ситуаций не «до проекта и после проекта», а «без проекта и с проектом»;
- учет всех наиболее существенных последствий проекта — при определении эффективности инвестиционного проекта должны учитываться все последствия его реализации, как непосредственно экономические, так и внеэкономические (внешние эффекты); в тех случаях, когда их влияние на эффективность допускает количественную оценку, ее следует произвести; в других случаях учет этого влияния должен осуществляться экспертно;
- учет наличия разных участников проекта, несовпадения их интересов и различных оценок стоимости капитала, выражающихся в индивидуальных значениях нормы дисконта;
- многоэтапность оценки — на различных стадиях разработки и осуществления проекта (обоснование инвестиций, ТЭО, выбор схемы финансирования, экономический мониторинг) его эффективность определяется заново, с различной глубиной проработки;
- учет влияния на эффективность инвестиционного проекта потребности в оборотном капитале, необходимом для функционирования создаваемых в ходе реализации проекта производственных фондов;
- учет влияния инфляции (учет изменения цен на различные виды продукции и ресурсов в период реализации проекта) и возможности использования при реализации проекта нескольких валют;
- учет (в количественной форме) влияния неопределенностей и рисков, сопровождающих реализацию проекта.

В качестве основных показателей эффективности рекомендуется использовать следующие показатели:

Чистый доход (NV — *net value*) — это накопленный эффект (сальдо денежного потока) за расчетный период

$$NV = \sum F_n = \sum B_n - \sum C_n,$$

где: F — величина денежного потока; B — инвестиционные и операционные денежные потоки, включающие приток денежных средств или результаты; C — инвестиционные и операционные денежные потоки, включающие отток или затраты.

В формуле суммирование распространяется на все шаги n расчетного периода.

Чистый дисконтированный доход (NPV — *net present value*) — это накопленный дисконтированный эффект за расчетный период

$$NPV = \sum (F_n \alpha_n) = \sum \frac{F_n}{(1+E)^n},$$

где: α_n — коэффициент дисконтирования; E — норма дисконта, выражаемая в долях единицы или процентах в год.

Чистый доход и чистый дисконтированный доход характеризуют превышение суммарных денежных поступлений над суммарными затратами для данного проекта соответственно без учета и с учетом неравномерности эффектов, затрат и результатов, относящихся к различным моментам времени.

Норма дисконта является основным экономическим нормативом, используемым при дисконтировании, для оценки эффективности инвестиционных проектов. Значение нормы дисконта может быть различным при оценке различных составляющих эффективности (социальной, бюджетной, коммерческой и т. п.).

Проект считается эффективным, если NPV положителен; при сравнении альтернативных проектов предпочтение отдается проекту с большим значением NPV .

Внутренняя норма доходности (IRR — *internal rate of return*) — такое единственное положительное число IRR , когда при норме дисконта $E = IRR$ чистый дисконтированный доход проекта равен 0. IRR рассчитывается из уравнения

$$\sum \frac{F_n}{(1+IRR)^n} = 0.$$

В общем случае, чем выше величина IRR , тем более эффективным считается проект. Для принятия решений значение IRR сравнивается с нормативной ставкой, отражающей требуемую доходность.

Сроком окупаемости с учетом дисконтирования (PBP — *payback period*) называется продолжительность периода до момента окупаемости — наиболее раннего момента времени в расчетном периоде, после которого чистый дисконтированный доход (NPV) становится равным нулю и в дальнейшем остается неотрицательным.

Индекс доходности дисконтированных затрат или соотношение выгоды-затраты (*BCR — benefit-cost ratio*) — отношение суммы дисконтированных денежных притоков (результатов) к сумме дисконтированных денежных оттоков (затрат)

$$BCR = \frac{\sum(B_n \alpha_n)}{\sum(C_n \alpha_n)}$$

При расчетах целесообразно учитывать рекомендации различных отечественных и зарубежных методик, в том числе:

- ВСН 21–83 «Указания по определению экономической эффективности капитальных вложений в строительство и реконструкцию автомобильных дорог»;
- рекомендации Всемирного банка (*Notes on the Economic Evaluation of Transport Projects, The World Bank, Washington, DC, 2005*);
- Рекомендации по анализу транспортных проектов Великобритании (*Transport Analysis Guidance — WebTAG, Department for Transport, UK, 2003–2011*);
- рекомендации по анализу инвестиционных проектов Европейского Союза (*Guide to cost-benefit analysis of investment projects, European Commission, Directorate General Regional Policy, 2008*).

Показатели для оценки эффективности могут отличаться в каждом проекте и должны учитывать индивидуальные особенности каждого проекта. Например, могут быть выбраны следующие показатели:

- показатели транспортной доступности (изохроны пешеходной доступности остановочных пунктов ОТ и станций метрополитена и доступности в целом на ОТ);
- средняя пешеходная доступность ближайшего остановочного пункта ОТ;
- процент населения, проживающий или работающий в пешеходной доступности 300–500 м до остановочного пункта ОТ, от общей численности населения обслуживаемой территории;
- доля объема перевезенных пассажиров на общественном транспорте или на индивидуальном автомобильном транспорте;
- показатели производительности: общий объем пассажирских перевозок относительно численности населения, транспортная работа (в целом и по системам транспорта), распределение объемов

пассажиров между отдельными видами транспорта (железная дорога, метрополитен, трамвай, троллейбус, автобус и т. п.);

- показатели качества: среднее время ожидания транспорта, среднее время в пути, среднее время в пути на работу, регулярность (интервалы движения), количество пересадок в маршрутной сети, удельная вместимость на одно транспортное средство.

В зависимости от особенностей проекта могут использоваться и другие показатели. В итоге на основе таких показателей может быть рассчитан интегральный показатель качества или сформированы различные диаграммы и балльные показатели, наглядно показывающие влияние проекта на различные области транспортного обслуживания.

8.2. Использование транспортной модели в структуре управления городом

Транспортная модель, используемая при различных уровнях детализации и в различном масштабе, охватывает весь моделируемый регион, достигая на нижнем уровне каждого конкретного перекрестка. Иерархия транспортной модели региона представлена на рисунке 8.1¹.

Схема, приведенная на рисунке 8.1, наглядно показывает, что в иерархии транспортного моделирования единое информационное пространство обмена данными между различными уровнями модели обеспечивает единую стратегию управления транспортной системой.

Стратегический уровень модели охватывает весь регион моделирования с внешними связями. Его главная задача — отображение и прогнозирование баланса между спросом на транспортные услуги и возможностями его удовлетворения различными видами транспорта. Данные об экономическом и социально-экономическом развитии региона позволяют прогнозировать возможное изменение качества транспортного обслуживания бизнеса и населения и на этом основании принимать стратегические решения о развитии тех или иных видов транспорта, транспортных терминалов и реализации крупных строительных проектов в жилищной и промышленной сферах.

Моделирование на уровне района на тактическом уровне обеспечивает обоснованное принятие решений о совершенствовании транспорт-

¹ Traffic Modeling Guidelines. TfL Traffic Manager and Network Performance Best Practice / Transport for London, 2010.

ной сети, последствиях закрытия отдельных участков для выполнения различных ремонтных работ.

Микромоделирование позволяет выполнять имитационное моделирование движения отдельных транспортных средств по сети в соответствии с заложенным в модель поведением водителей. На этом уровне отслеживаются возможные проблемы, вызванные колебаниями интенсивности транспортного потока, спроса на стоянку (парковку), авариями и т. п.

На *локальном уровне* моделируется дорожное движение на ограниченном участке УДС, который может включать отдельное пересечение или несколько перекрестков. На этом уровне основное внимание уделяется детальному анализу пропускной способности отдельной транспортной связи и перекресткам, а также взаимовлиянию режимов управления движением на этих пересечениях. Система автоматизированного проектирования (САПР) перекрестка должна использоваться синхронно с системой оптимизации режимов светофорного регулирования для оперативного учета изменения геометрических параметров дороги в модели.

Системы управления дорожным движением в режиме реального времени обычно не относятся к системам моделирования, однако



Рис. 8.1. Иерархия транспортной модели

принцип их работы аналогичен. Такие системы управления как *SCOOT* оптимизируют режимы работы светофоров на основе модели, которая получает данные с УДС в режиме реального времени (онлайн). Модель системы использует те же методы оптимизации, что и программы, используемые в транспортной модели на локальном уровне.

Для согласованных расчетов информация для всех уровней модели должна быть общей, хотя в ряде случаев это приходится обеспечивать вручную за счет копирования и переформатирования данных.

Уровни детализации и точности модели должны соответствовать цели, для которой модель предназначена. Цель проекта будет напрямую влиять на тип и цель всей последовательности действий при моделировании. Для определенных проектов модель может пройти через несколько этапов развития, и на каждом последующем этапе необходимый уровень детализации и точности обеспечивает соблюдение предъявляемых при моделировании требований. В общем случае стадии развития модели могут быть отображены как фаза исследования объекта моделирования, анализ исходной информации внешних и внутренних факторов, тестирование при необходимости, разработки предпочтительных вариантов и окончательного проекта. Следует отметить, что не все проекты могут быть разработаны до окончательной стадии в случае получения отрицательных результатов по каким-либо критериям.

Основная задача транспортного моделирования заключается в прогнозировании последствий при реализации каких-либо сценариев развития региона и его элементов. Естественно, сначала необходимо смоделировать текущую ситуацию и по выбранным критериям убедиться в ее адекватности. Только после этого можно быть уверенным в правильных результатах прогнозирования.

Рассматриваемые при транспортном моделировании проекты оказывают влияние на условия дорожного движения в гораздо более обширном районе, чем границы их физической реализации. Вследствие этого границы моделирования должны устанавливаться по зоне влияния на условия дорожного движения предложений, планируемых к реализации в проекте.

Сложность определения границ транспортного моделирования возрастает при увеличении степени ее взаимодействия с другими системами, например, в крупных городах. На рисунке 8.2 схематично показано

взаимодействие транспортной системы крупного города с другими системами. При решении определенных задач управления результат может быть достигнут только при комплексном рассмотрении нескольких систем и их постоянной координации. Так, транспортная система города не сможет успешно развиваться, если в план развития города не будут заложены соответствующие территориальные ресурсы. Сокращение среднего времени поездки пассажиров общественного транспорта невозможно без выделения полос для обособленного движения наземного транспорта, строительства транспортно-пересадочных узлов на станциях скоростного транспорта и т. п.



Рис. 8.2. Взаимодействие транспортной системы крупного города с другими системами

Таким образом, городская транспортная система может успешно функционировать только в условиях тесной координации с другими городскими системами. В реальности эта координация усложняется выбором критериев работы отдельных систем, которые слабо увязаны с результатами функционирования смежных систем. Эти положения должны отображаться транспортной моделью за счет взаимодействия с информационными системами градостроительного, экономического, социального и других направлений развития региона.

Рассмотрим опыт использования транспортного моделирования в проектах развития городов на примере Германии¹.

Городские управляющие органы и транспортные общественные организации отслеживают и предоставляют данные по транспортному предложению: изменения в транспортной городской автодорожной сети, изменения прохождения сети общественного транспорта (рис. 8.3). Внешние проектные организации проводят опросы населения и сбор других необходимых данных, расчет транспортного спроса и, на этой основе, создают интегрированную транспортную модель общественного и индивидуального транспорта. Используя разработанную транспортную модель, разрабатывают план транспортного развития города, просчитывают различные сценарии развития городской инфраструктуры и дают рекомендации.

Процесс использования и развития транспортной модели циклический. Происходит постоянное сотрудничество между государственными структурами, частными перевозчиками, общественными транспортными объединениями и внешними проектными организациями, на основе которого модель постоянно обновляется и дополняется.

Организационная структура стратегического транспортного планирования в немецких городах представлена в таблице 8.1.

Администрация г. Берлина с 1990-х годов использует модель УДС и модель спроса, разработанную проф. Куттером в Техническом университете Берлина. В 1991 году модели индивидуального (ИТ) и общественного (ОТ) транспорта были успешно преобразованы из цифровой городской модели ГИС в технологию PTV VISUM. При этом транс-

¹ К. Бётгер. Концептуальные исследования для стратегического транспортного планирования в Санкт-Петербурге и других городах РФ // Транспорт Российской Федерации. 2007, № 8. С. 36–38.

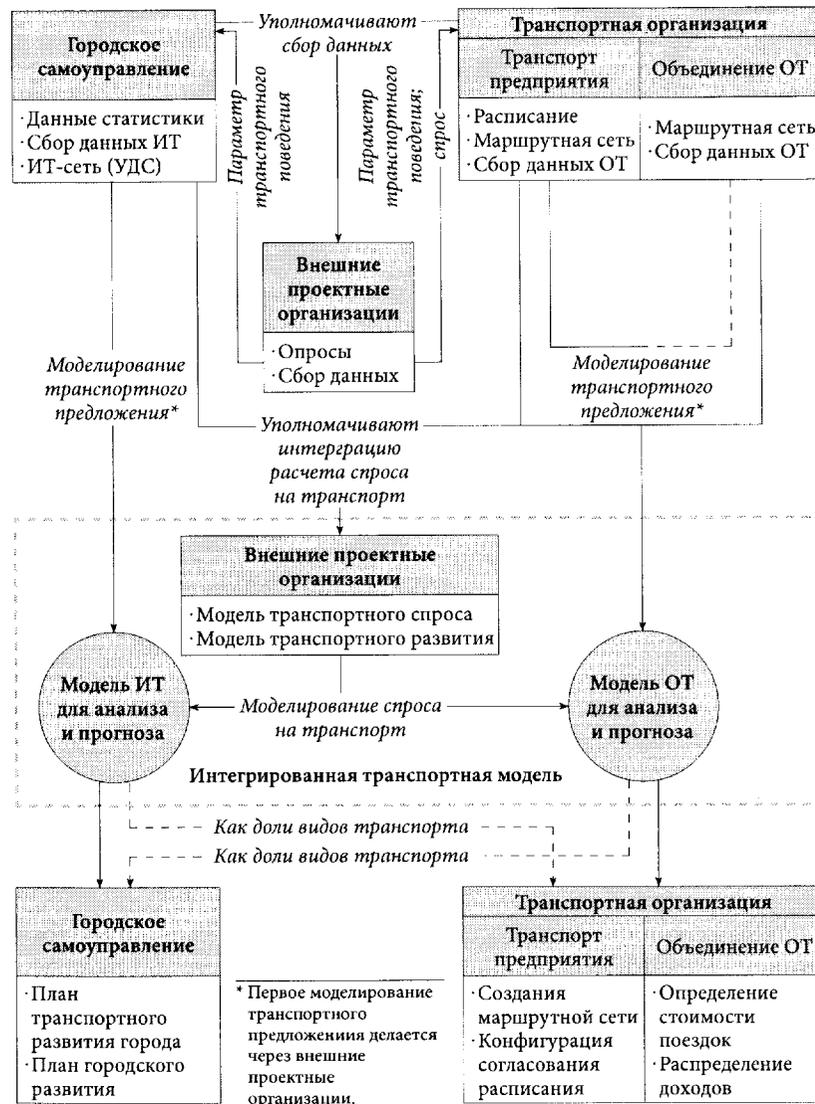


Рис. 8.3. Схема использования транспортной модели в государственных органах на примере Германии

портная модель была дополнена данными по УДС, такими как число полос, пропускная способность, возможность поворотов, вместимость автостоянок. Модель сети насчитывает почти 1000 транспортных районов (3,39 млн жителей), а с учетом окрестностей федеральной земли Бранденбург (2,57 млн жителей) почти 1100 транспортных районов для изображения входящих и выходящих потоков г. Берлина. Такие данные, как расписание, маршруты, устройство перехватывающих стоянок, непрерывно вводятся в модель ОТ. Для наилучшего отображения поездов по остановкам используется модель ОТ на 2300 транспортных районов.

Обе части модели используются, например, для долгосрочных транспортных прогнозов, чтобы оценить транспортные строительные проекты, определить транспортный эффект от инвестиций, а также правильно расставить приоритеты реализации проектов.

Таблица 8.1. Типовые подходы к транспортному планированию в городах Германии

Параметр	Берлин	Мюнхен	Дрезден
1	2	3	4
Первые шаги	С 1991 г.	Начало 1990-х гг.	С 1994 г.
Транспортные районы (ТР) города	881 ТР для ИТ, 3000 ТР для ОТ	450 ТР	480 ТР
ТР пригорода	123 ТР	150 ТР	300 ТР
Число жителей	Ок. 3,5 млн жителей, включая ок. 1,5 млн жителей в области с важной транспортной функцией	Ок. 1,3 млн жителей, включая 1,0 млн жителей в области с важной транспортной функцией	Ок. 0,5 млн жителей, включая 0,7 млн жителей в области с важной транспортной функцией
Площадь, км ²	891,75	310,43	328,30
Модели ОТ и ИТ	Отдельные модели ИТ (управление сената) и ОТ (транспортные предприятия)	Базовая модель, обрабатываемая индивидуально для ИТ (муниципалитет) и ОТ (транспортные предприятия)	Базовая модель, обрабатываемая индивидуально для ИТ (муниципалитет) и ОТ (транспортные предприятия)

Окончание таблицы 8.1

1	2	3	4
Интегрированные планы маршрутной сети с расписаниями (пригородное сообщение, ж/д пригородное сообщение, поезда дальнего следования, аэропорты)	Только план маршрутной сети и расписание стандартных интервалов для метро, трамваев, автобусов и городских электричек, а также 3 аэропорта и логистических центра	Полная маршрутная сеть, расписание для пассажиров и служебное расписание для метро, трамваев, автобусов, городских электричек и поездов дальнего следования, а также аэропорта и логистических центров	Полная маршрутная сеть, расписание для пассажиров и служебное расписание для трамваев, автобусов, городских электричек, паромов, фуникулеров и поездов дальнего следования, а также аэропорта и логистических центров
Центр управления транспортом ИТ / ОТ	Система компьютеризированного операционного управления для ОТ	Общий центр управления транспортом для ИТ и ОТ	Центры управления транспортом отдельно для ИТ и ОТ
Контроль в режиме реального времени	Только ОТ	Нагрузка сети главных улиц в реальном времени, информация доступна в интернете	27 устройств видеонаблюдения за транспортной обстановкой, а также состоянием заторов в реальном времени
Стационарные счетчики	Ок. 270	Ок. 250	Ок. 20
Подсчеты, опросы	Система подсчета подвижности в Германии (MiD) с учетом специфических особенностей г. Берлина, а также опросы Берлинского транспортного предприятия и транспортной ассоциации Берлин-Бранденбург	Система подсчета подвижности в Германии (MiD) с учетом специфических особенностей г. Мюнхена, а также опросы Мюнхенского транспортного общества и Мюнхенской транспортной и тарифной ассоциации	Система репрезентативных транспортных опросов (SrV) и опросы транспортного объединения Верхняя Эльба

8.3. Транспортная модель как инструмент устойчивого развития

В ближайшей перспективе транспортные перевозки будут основным фактором, обуславливающим повышение мирового спроса на энергоносители. Транспортные системы являются крупнейшим конечным потребителем энергоносителей в развитых странах, и именно этот сектор растет опережающими темпами в большинстве развивающихся стран. Кроме того, оптимальные по протяженности, эффективные и рациональные транспортные системы играют важную роль с точки зрения доступа к рынкам, рабочим местам, учебным заведениям и социальным учреждениям. Современные транспортные системы в подавляющем большинстве случаев не являются энергоэффективными, способствуют развитию экологических проблем и имеют негативные последствия для здоровья населения.

В связи с этим большое значение имеют меры по разработке комплексных стратегий и планов развития транспорта, принятия соответствующих норм и расширения партнерств на национальном уровне для развития транспортной инфраструктуры, поддержки и поощрения использования немоторизованного транспорта и создания принципиально новых систем общественного транспорта. Это направление развития транспортных систем получило название «устойчивый транспорт» (*sustainable transport* — транспорт, удовлетворяющий требованиям, удобный, поддерживающий развитие). Схема формирования понятия «устойчивое развитие» приведена на рисунке 8.4.

В документе Европейского Комитета министров транспорта ЕКМТ СЕМТ/СМ(2001)12 «Реализация устойчивой городской транспортной



Рис. 8.4. Формирование понятия «устойчивое развитие»

политики» отмечено, что, хотя определения и критерии «устойчивости» транспортной деятельности, используемые в различных странах и городах, различаются в деталях и зачастую остаются достаточно нечеткими, в большинстве из них «устойчивая» работа транспорта связана с улучшением качества жизни городского населения (включая обеспечение транспортной доступности городских территорий, высокого качества транспортных услуг, чистоты воздуха, дружелюбной городской среды и экономического процветания, без нанесения ущерба здоровью людей и окружающей среде и без истощения невозобновляемых природных ресурсов). По определению ЕКМТ, устойчивая транспортная система:

- обеспечивает доступность и удовлетворение потребностей отдельных лиц, компаний и общества надежным передвижением, не нанося вреда здоровью человека и экосистеме, и способствует установлению принципа справедливости как внутри социальных групп и поколений, так и между ними;
- является доступной по средствам, работает четко и эффективно, предлагает виды транспорта на выбор, поддерживает конкурентоспособность экономики, а также сбалансированность регионального развития;
- минимизирует выбросы и отходы на уровне возможности природы поглощать их, использует возобновляемые ресурсы на уровне или ниже темпа их восстановления, использует невозобновляемые ресурсы на уровне или ниже темпов развития возобновляемых заменителей, сводит к минимуму воздействие на занимаемую землю, заботится о снижении шума.

Одно из основных направлений повышения устойчивости транспортной системы — замена использования автомобилей (личного автомобильного транспорта) немоторизованным и общественным транспортом. Меры по ограничению использования автомобилей не только позволяют снизить уровень загрузки УДС, но также влияют на состояние окружающей среды и уровень безопасности дорожного движения. Кроме того, различные типы фискальных ограничений позволяют получить дополнительные доходы в городской бюджет. Эти поступления могут быть использованы для совершенствования работы общественного пассажирского транспорта, улучшения организации движения,

развития дорожной инфраструктуры и т. д. На рисунке 8.5 приведена классификация методов ограничения использования автомобилей.

Ограничительные меры могут принимать вид административного запрета на въезд и парковку автомобильных транспортных средств, на отдельные территории и/или объекты дорожной инфраструктуры (постоянного или действующего в определенные дни недели и часы суток), а также форму сбора платы за въезд и парковку (размер платы также может зависеть от типа транспортного средства, времени суток и т. п.). Мировой опыт применения подобных ограничений показывает, что если они принимаются в системе мероприятий эффективной организации транспорта, то представляют собой быстродействующее и эффективное средство решения проблемы перегруженности УДС. Так, в г. Лондоне внедрение системы сбора платы за въезд в городской центр привело к снижению интенсивности транспортных потоков в зоне действия ограничений на 20–30% и к росту скорости сообщения на 14%. Недостатками ограничительных мер являются их крайняя непопулярность у населения, снижение эффективности с течением времени, не-

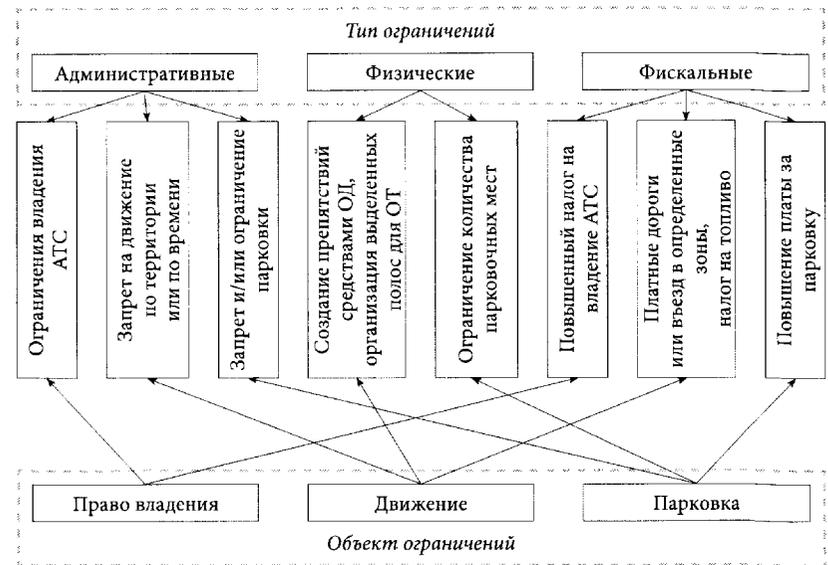


Рис. 8.5. Классификация ограничений на пользование личным транспортом

обходимость сложных технических средств для контроля за соблюдением ограничений, а также возможность того, что их введение может привести не к снижению интенсивности использования личного транспорта, а к простому перераспределению транспортных потоков по дорожной сети, в результате чего перегруженной окажется инфраструктура на границах зоны действия ограничений. Эффективность введения ограничений на движение автотранспорта в значительной мере определяется пакетом сопутствующих дополнительных мер, таких как совершенствование работы общественного транспорта, перераспределение дорожного пространства между различными категориями пользователей, совершенствование политики в области градостроительства и землепользования и т. д.

Как показывает зарубежный и отечественный опыт, проблема перегруженности УДС в городах не может быть успешно решена за счет применения отдельных частных решений по одному или нескольким из указанных выше направлений. Городская УДС, работающая в режиме перегрузки, может быть приведена в режим «нормального» функционирования (т. е. в режим, обеспечивающий некоторые заданные показатели качества дорожного движения, такие, например, как скорость сообщения, гарантированность доставки и др.) только при условии согласованного применения некоторого пакета мер по всем перечисленным направлениям:

- совершенствование градостроительного планирования и повышение эффективности градостроительной политики;
- строительство и реконструкция дорожной инфраструктуры, улучшение качества ее ремонта и содержания;
- совершенствование логистики и организации перевозок на грузовом автотранспорте;
- совершенствование работы общественного пассажирского транспорта;
- обеспечение соблюдения Правил дорожного движения;
- совершенствование организации дорожного движения;
- реализация парковочной политики;
- введение ограничений на движение автотранспорта.

Организация скоординированной работы по этим направлениям требует разработки единых городских транспортных планов. Разработка и реализация подобных планов должна предусматривать тесное взаимодействие и координацию действий различных органов власти,

осуществляющих государственное регулирование, контроль и надзор в соответствующих сферах.

Таким образом, речь идет о формировании и реализации на федеральном уровне соответствующей государственной политики в данной сфере, которая, безусловно, является частью государственной политики в транспортной отрасли, находящейся в компетенции Министерства транспорта Российской Федерации. О целесообразности такого решения свидетельствует и зарубежный опыт. В качестве примера можно привести Великобританию, где обязанность местных властей по разработке пятилетних планов развития транспорта закреплена специальным законом. Транспортные планы муниципалитетов и графств проходят экспертизу в национальном Министерстве транспорта, и на реализацию одобренных планов выделяются средства из государственного бюджета. Ход работ по реализации транспортных планов контролирует независимая экспертная организация. По результатам ее ежегодного отчета Министерство может принять решение об увеличении или, напротив, снижении объемов финансирования на следующий год. Также Министерство транспорта Великобритании опубликовало (и периодически обновляет) серию руководств по разработке и реализации городских транспортных планов. В целом для транспортного планирования в большинстве стран Европейского Союза в настоящее время характерны три основные черты, которые нашли отражение в коммюнике Еврокомиссии «На пути к целевой стратегии развития городской среды обитания» от 11.01.2004:

- Возложение полномочий по разработке правовой, организационной и методологической основы для регионального и местного транспортного планирования на национальные органы управления транспортом. Национальные министерства транспорта готовят рекомендации и методики по разработке и реализации планов развития транспорта на местном уровне, а также контролируют качество этих планов и обеспечивают их соответствие целям национальной транспортной политики.
- Делегирование полномочий по разработке и осуществлению транспортных планов и транспортной политики региональным властям и муниципалитетам. Местные власти берут на себя ответственность за разработку транспортных планов и программ, призванных обеспечить эффективную работу транспорта на подве-

домственных им территориях, а также наделяются всеми полномочиями, необходимыми для проведения этих планов в жизнь.

- Законодательное закрепление необходимости координации планов развития городского транспорта с планами в сфере градостроительства, землепользования и охраны окружающей среды. Такая практика существует во многих государствах — членах ЕС (Великобритании, Франции, Германии, Италии, Ирландии, Испании и др.).

На основании изложенного можно сформировать *базовые принципы устойчивой городской транспортной политики*.

1. Комплексность рассмотрения городских транспортных проблем:

- учет всех факторов, влияющих на формирование транспортного спроса и транспортных потоков (экономическая и демографическая ситуация, градостроительная политика, состояние УДС и др.);
- учет всех аспектов функционирования городских транспортных систем (экономика, безопасность, экология);
- обеспечение межведомственного подхода к решению транспортных проблем;
- координация деятельности органов управления транспортом, градостроительных и природоохранных органов исполнительной власти.

2. Борьба с причинами возникновения транспортных проблем в большей степени, чем с их последствиями (регулирование и оптимизация спроса на автомобильные перевозки, оптимизация использования существующих провозных возможностей УДС и транспорта в целом).

3. Рассмотрение пропускной способности УДС как ограниченного ресурса общего пользования, по аналогии с ресурсами других коммунальных инфраструктур (водопровод, канализация, теплоснабжение, электроэнергетика) с применением необходимых процедур регламентации и согласования со стороны корпоративных пользователей.

4. Субсидиарность, т. е. «пакетный» характер реализации мероприятий (реализация скоординированных, взаимодополняющих и взаимно усиливающих мероприятий транспортной политики).

5. Рассмотрение ограничений на движение и парковку автомобильного транспорта в качестве одной из основных мер «устойчивой» городской транспортной политики.

6. Принятие решений в области совершенствования работы городских транспортных систем на основе их комплексного обследования

и моделирования, а также по результатам моделирования технико-экономического анализа ожидаемой эффективности предлагаемых мероприятий.

Традиционное транспортное планирование направлено на повышение мобильности, чаще всего для транспортных средств, и может неадекватно учитывать более отдаленные последствия. Но реальная цель транспорта — обеспечение доступа: к работе, к месту обучения, к товарам и услугам, к друзьям и семье, и существуют апробированные методы для улучшения доступа при одновременном снижении экологических и социальных последствий, а также для предотвращения заторов. Сообщества, которые успешно повышают устойчивость своих транспортных систем, делают это в рамках более широкой программы создания динамичного, удобного для проживания стабильного города.

Тенденции транспортного планирования в Европе, напротив, никогда не были основаны на предположениях, что частный автомобиль является лучшим и единственным решением для передвижения по городу. Например, план Голландской транспортной структуры, введенный с 1970-х годов, требует, чтобы спрос на дополнительные транспортные средства удовлетворялся только в случае, «если его вклад в общественное благосостояние будет положительным», а с 1990 года включены явные цели сокращения вдвое темпов роста автомобильного движения. В некоторых неевропейских городах также неуклонно внедряется устойчивость транспорта и планирование землепользования, в частности, в г. Куритибе (Бразилия), в г. Портленде (штат Орегон, США) и в г. Ванкувере (Канада).

Между разными городами существуют значительные различия в потреблении энергии на транспорте. Средний городской житель США использует ежегодно в 24 раза больше энергии для частного транспорта, чем китайские городские жители, и почти в четыре раза больше, чем европейские. Эти различия не могут быть объяснены только богатством, они также тесно связаны с привычками ходьбы, езды на велосипеде и использования общественного транспорта. На этот параметр оказывают влияние особенности городов, включая плотность городской застройки и городское планирование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в работе основные аспекты транспортного моделирования позволяют сформировать целостное представление об основных возможностях и месте моделирования в транспортном планировании. В свою очередь оптимальное транспортное планирование предопределяет не только достаточный уровень мобильности грузов и пассажиров, но и высокий уровень доступности транспортных услуг. Повышение уровня доступности в физическом аспекте связано с совершенствованием транспортных сетей, в экономическом аспекте — с повышением эффективности функционирования транспортных систем и их ориентацией на социальные показатели развития общества.

Дальнейшее развитие методов транспортного моделирования связано с совершенствованием формализации и прогнозирования подвижности населения, выбора способа осуществления поездки. Особое значение имеют исследования, связанные с уточнением зависимости интенсивности дорожного движения от многочисленных факторов, связанных не только с параметрами УДС, временными и погодными факторами, но и с социально-экономическими условиями деятельности населения. Предстоит создать автоматизированные системы актуализации исходных данных для транспортного моделирования на основе мощных систем хранения и обработки данных с датчиков дорожного движения.

Современные системы транспортного моделирования с учетом перечисленных тенденций развития позволят специалистам и руководителям принимать обоснованные решения в области транспортного планирования, обеспечивающие высокую эффективность функционирования общества и экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бережная Е. В.* Математические методы моделирования экономических систем: учеб. пособие. — 2-е изд. / Е. В. Бережная, В. И. Бережной. — М.: Финансы и статистика, 2006. — 432 с.
2. *Буслаев А. П.* Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автотодорожного движения / А. П. Буслаев [и др.]; под ред. чл.-корр. РАН В. М. Приходько. — М.: Мир, 2003. — 368 с.
3. *Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учеб. пособие / А. В. Гасников [и др.]; под ред. А. В. Гасникова.* — М.: МФТИ, 2010. — 362 с.
4. *Горев А. Э.* Грузовые автомобильные перевозки: учебник, 6-е изд. / А. Э. Горев. — М.: Издательский центр «Академия», 2013. — 304 с.
5. *Горев А. Э.* Основы теории транспортных систем: учеб. пособие / А. Э. Горев. — СПб.: СПбГАСУ, 2011. — 173 с.
6. *Зенгбуш М. В.* Пассажиропотоки в городах / М. В. Зенгбуш, А. Ю. Белинский, А. Г. Дынкин. — М.: Транспорт, 1974. — 136 с.
7. *Лобанов Е. М.* Транспортная планировка городов: учебник для студентов вузов / Е. М. Лобанов. — М.: Транспорт, 1990. — 240 с.
8. *Михайлов А. С.* Управление рынком перемещений городского населения / А. С. Михайлов. — Алматы: НИЦ Гылым, 2003. — 237 с.
9. *Михайлов А. Ю.* Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов / А. Ю. Михайлов, И. М. Головных. — Новосибирск: Наука, 2004. — 267 с.
10. *Самойлов Д. С.* Городской транспорт: учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. / Д. С. Самойлов. — М.: Стройиздат, 1983. — 384 с.
11. *Сильянов В. В.* Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В. В. Сильянов. — М.: Транспорт, 1977. — 303 с.
12. *Трофименко Ю. В., Якимов М. Р.* Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов / Ю. В. Трофименко, М. Р. Якимов. — М.: Логос, 2013. — 464 с.
13. *Якимов М. Р.* Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов / М. Р. Якимов. — М.: Логос, 2013. — 188 с.
14. *Яцукович В. И.* Подвижность населения / В. И. Яцукович. — М.: МГАДИ (ГУ), 1996. — 97 с.
15. *Highway Capacity Manual 2000.* — Transportation Research Board, National Research Council. — Washington, D.C., USA, 2000. — 1134 p.
16. *Ortuzar J. D., Willumsen L. G.* Modeling Transport / 3-rd edition. — John Wiley & Sons Ltd, 2008. — 499 p.
17. *Papacostas C. S., Prevedouros P. D.* Transportation Engineering and Planning / 3-rd edition. — Prentice Hall, 2001. — 685 p.

Практическое пособие

Международная ассоциация транспортных инженеров
www.traffic-ing.org

При содействии А+S
www.apluss.ru

Библиотека транспортного инженера

Горев Андрей Эдливич, Бёттгер Кристиан,
Прохоров Андрей Вячеславович, Гизатуллин Рустам Рафикович
ОСНОВЫ ТРАНСПОРТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Оригинал-макет подготовлен
ООО «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА»

Дизайнер *Д. А. Девянев*
Корректор *С. Н. Павлюченкова*

Подписано в печать 25.11.2015. Формат 60 × 84 $\frac{1}{16}$.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Minion Pro.
Усл. печ. л. 9,77. Тираж 100 экз. Заказ № 364.

Отпечатано в ООО «ИПК «КОСТА»
Санкт-Петербург, Новочеркасский пр., 58, офис 413
Тел. (812) 445 1002
E-mail: kosta-prn@kostaprint.ru

ISBN 978-5-91258-343-8



9 785912 583438