

Глава 3. МЕТОДЫ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ УЛИЧНО - ДОРОЖНЫХ СЕТЕЙ

3.1. Классификации критериев оценки улично-дорожных сетей

Оценка состояния улично-дорожной сети является начальной и обязательной составляющей градостроительного проектирования: генеральных планов (в разделах, связанных с УДС); комплексных транспортных схем (КТС); проектов детальной планировки (ПДП); комплексных схем организации движения (КСОД); проектов организации дорожного движения (ПОД).

Кроме того, должна оцениваться эффективность самих проектных решений. В этой связи критерии и методы оценки составляют один из важнейших разделов методического обеспечения проектирования УДС. Вместе с тем в нашей стране до сих пор не существует общепризнанной методики оценки УДС, включенной в нормативные документы и руководства по проектированию. Более того, анализ публикаций [1,5,14-16,18,21-23,29,30,31,42,51,59,60,63,67,69-71] показывает, что специалисты, занимающиеся градостроительным проектированием, и специалисты в области ОДД используют принципиально разные подходы к решению рассматриваемой задачи.

Проектирование ОДД, которое базируется на теории транспортных потоков, отличают использование разнообразного математического инструментария, детальное моделирование УДС. Поэтому представители этой технической отрасли всегда стремились формализовать оценку проектных решений и их эффективности, уделяли внимание критериям оценки, в частности много работ по данной тематике опубликовал Ю.Д. Шелков [42,69-71].

В градостроительном проектировании на стадиях генерального плана и КТС рассматриваются эскизные решения УДС. Более

детальное проектирование УДС (определение ширины улиц в красных линиях, ширины проезжих частей) выполняется на стадии ПДП, но при этом не проводится детальных расчетов пропускной способности узлов; соответственно оценка УДС имеет формальный характер. Как правило, для оценки проектных решений УДС используются такие показатели, как плотность сети и ориентировочные значения пропускной способности полос движения для улиц различных категорий [19,29,30,63]. Поскольку прогнозирование матрицы корреспонденций и картограммы транспортных потоков входят в состав генерального плана или КТС, то сложившаяся практика выполнения ПДП не предусматривает моделирования транспортных потоков, детальных расчетов УДС.

Совершенно иной подход сформировался в США, где при оценке УДС в качестве основного применяется интегральный критерий – показатель уровня обслуживания (Level of Service, сокращенно LOS). Методика его применения входила во все четыре издания (1950, 1965, 1985, 2000) руководства по оценке пропускной способности Highway Capacity Manual (СНМ) и непрерывно совершенствуется [156,157]. Сфера использования этого критерия охватывает все стадии – планирование, проектирование, эксплуатацию [66,88,109,118,160,168,208]. В настоящее время критерий LOS используется для оценки условий движения как в программах моделирования УДС, так и в узкоспециализированных программах проектирования перекрестков и развязок. О внимании, которое уделяется этому критерию и методикам его применения, свидетельствует следующее:

с 1944 г. в США существует специальный комитет **TRB Committee on Highway Capacity and Quality of Service**, занимающийся разработкой нормативных и методических документов;

показатель уровня обслуживания включен в состав рабочих программ двух комитетов С4 и С10 Мировой дорожной ассоциации PIARC.

Существует два принципиально разных подхода к оценке УДС – использование частных критериев и использование интегральных критериев. Для объективного сопоставления теории и практики оценки УДС на основе интегрального критерия – показателя уровня обслуживания (LOS) – и альтернативной ему системы частных критериев следует хотя бы кратко рассмотреть эти частные критерии.

Критерии оценки УДС строго соответствуют определенным задачам проектирования, их целевым установкам и не могут рассматриваться изолированно от них. В свою очередь, сами взгляды на цели и методы градостроительного проектирования и ОДД, их приоритетность постоянно эволюционируют. Как в научном, так и в практическом плане общей тенденцией развития методов проектирования транспортной планировки городов стало все большее внимание к негативным эффектам, сопутствующим росту уровня автомобилизации.

За последние годы взгляды на цели и методы проектирования транспортных систем городов претерпели революционные изменения. Главными проблемами признаны чрезмерная зависимость населения от индивидуального автомобиля, перегруженность городов, и в особенности их центров, автомобильным транспортом [96,103,108,163,165,177,178,180,183,190,198]. Характерна все большая интеграция ОДД с другими видами транспортного и градостроительного проектирования. Обязательным элементом транспортных проектов является оценка их влияния на городскую среду, экологического и социального эффектов.

Обилие разных задач и ситуаций, с которыми сталкиваются при работе с УДС, приводит к естественной идее использования целого набора частных критериев. Многочисленные критерии оценки качества функционирования УДС рассмотрены за последние три десятилетия во многих публикациях. Поэтому отметим работы, в которых содержится их наиболее подробный анализ

[42,59,66,71,118,176,188,206,208]. Достаточно полное представление о разнообразии частных критериев оценки дает классификация, приведенная в [42] (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Задачи комплексной схемы организации движения (КСОД) и используемые критерии [42]

Задача КСОД	Параметры УДС
1	2
1. Оценка состояния ОДД	1.1. Затраты времени на движение по УДС 1.2. Суммарный пробег ТС по УДС 1.3. Экологические характеристики (транспортный шум, выбросы в атмосферу) 1.4. Конфликтная загрузка УДС 1.5. Устойчивость функционирования УДС
2. Выявление узких мест на УДС	2.1. Скорость сообщения по УДС 2.2. Непрямолинейность транспортных сообщений по УДС 2.3. Экологические характеристики 2.4. Места концентрации ДТП (в результате анализа статистических материалов) 2.5. Устойчивость функционирования УДС (см. параметр 1.5)
3. Назначение сетевых методов ОДД: а) оптимальное распределение транспортных потоков по УДС б) выделение пешеходных зон	3.1. Матрицы корреспонденций 3.2. Маршруты движения по УДС 3.3. Загрузка УДС движением 3.4. Дислокация и характеристики объектов притяжения транспортных потоков 3.5. Пропускная способность магистральных улиц и дорог 3.6. Интенсивность движения пешеходов 3.7. Интенсивность движения ТС в пределах предполагаемой пешеходной зоны 3.8. Обеспеченность местами паркования

1	2
в) внедрение метода “жилая зона” г) запрещение движения грузового транспорта д) обеспечение приоритетных условий движения МПТ	3.9. Объем транзитного движения 3.10. Скорость движения ТС 3.11. Характеристики объектов тяготения ТП – грузополучателей и грузоотправителей 3.12. Интенсивность движения МПТ и ТС 3.13. Скорость сообщения МПТ
е) координация работы светофоров ж) система магистралей с односторонним движением з) организация пропуска транзитного движения и) организация пропуска грузового транспорта	См. параметры 3.9, 3.10 См. параметры 1.2, 3.1 – 3.3, 3.5, 3.10, 3.12 3.14. Интенсивность движения и распределение транзитных потоков См. параметры 3.3, 3.5 3.15. Качественный состав транзитных потоков См. параметры 1.2, 3.1 – 3.3, 3.5, 3.11

Авторы методического руководства [42] предложили определенный набор параметров УДС, которые рассматриваются в рамках той или иной задачи КСОД (см. табл. 3.1). По их мнению формализации и количественному описанию поддаются:

- экономические показатели оценки состояния ОДД;
- показатели безопасности дорожного движения;
- показатели экологической безопасности;
- показатели устойчивости функционирования УДС.

Приведенный выше перечень показателей включает лишь часть критериев, характеризующих УДС. Кроме того, частные критерии оценки можно классифицировать иначе – по видам движения

и элементам УДС, как это сделал ранее В.Е. Peterson [176] (табл. 3.2).

Таблица 3.2

**Критерии оценки состояния ОДД
на отдельных элементах УДС [176]**

Вид движения	Элемент улично-дорожной сети	Критерий оценки
Транспортные средства	Перегон дороги или улицы	Пропускная способность Скорость
	Развязки в разных уровнях	Пропускная способность
	Кольцевые пересечения	Пропускная способность Длина очереди Средняя задержка Суммарная задержка
	Нерегулируемые пересечения	Пропускная способность Длина очереди Доля остановившихся транспортных средств Средняя задержка Суммарная задержка
	Регулируемые пересечения	Пропускная способность Длина очереди Доля остановившихся транспортных средств Средняя задержка Суммарная задержка
	Улично-дорожная сеть	Пропускная способность Время сообщения Количество остановок (при движении по сети) Суммарная задержка
Пешеходное	Тротуары	Пропускная способность Скорость Плотность пешеходного потока
	Нерегулируемые переходы	Средняя задержка Размер очереди (территория, занятая пешеходами)
	Регулируемые переходы	Пропускная способность Средняя задержка Размер очереди (территория, занятая пешеходами)

Следует также отметить важные с позиций понимания специфики рассматриваемого вопроса результаты анализа частных критериев, выполненного ранее при разработке стратегии управления УДС в условиях насыщения [206]. Авторами исследовательского проекта (NCHRP Report 194) специально анализировалось наличие или отсутствие тесной корреляции каждого из рассматриваемых частных критериев с другими критериями. Наличие корреляции позволяет заменять группу показателей одним, т.е. применять его в качестве интегрального критерия, тем самым снижать размерность задачи оценки и упрощать ее. В результате систематизации критериев было предложено их разделение по характеру использования: применяемые только как описатели (дескрипторы); используемые как параметры процесса управления. К числу последних были отнесены средняя и суммарные задержки, длина очереди, длина перегона минус длина очереди.

Альтернативой использованию перечисленных частных критериев (см. табл. 3.1, 3.2) является интегральный критерий – показатель уровня обслуживания, который будет подробно рассмотрен в п. 3.4.

3.2. Частные критерии оценки УДС

3.2.1. Транспортная работа УДС

В ряде публикаций [42,71] транспортная работа УДС показывается как наиболее значимый критерий экономической оценки состояния ОДД. Предложен количественный показатель транспортной работы УДС [42]

$$W = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m N_{ij} t_{ij} l_{ij},$$

где n – число корреспонденций ; m – число маршрутов движения, реализующих корреспонденцию j ; N_{ij} – число транспортных

средств, пользующихся маршрутом i при реализации корреспонденции j , прив.ед./ч; t_{ij} – средние затраты времени на реализацию корреспонденции i при использовании маршрута j , ч; l_{ij} – протяженность маршрута i корреспонденции j , км.

Все параметры, необходимые для оценки транспортной работы, устанавливаются в результате обследований транспортной сети, при этом используется матрица корреспонденций часа максимальной загрузки УДС. Возможны два подхода к решению рассматриваемой задачи:

использование методики оценки матрицы корреспонденций на основе замеров интенсивности движения и регистрации номеров транспортных средств (или как вариант – выборочное анкетирование части водителей с последующим распространением результатов анкетирования на всю генеральную совокупность) в межпиковый период и пересчет матрицы на час пик [24,39,42];

восстановление матрицы корреспонденций непосредственно по данным интенсивности движения в пиковый период, в том числе для случаев, когда какая-либо дополнительная информация о корреспонденциях (частичное анкетирование водителей, матрица корреспонденций на пассажирском транспорте и т.д.) отсутствует.

3.2.2. Показатели экологической безопасности

Показателями экологического состояния окружающей среды, как правило, принимают суммарный выброс окиси углерода и окислов азота за единицу времени, а также эквивалентный уровень транспортного шума на расстоянии 7,5 м от края проезжей части [42]. Допустимую концентрацию токсичных веществ в воздухе ($\text{мг}/\text{м}^3$) в результате предлагается определять как разность между предельно допустимой концентрацией (ПДК) и концентрацией токсичных веществ в воздухе от стационарных источников. Оценку массовых выбросов по каждому из токсичных компонентов предла-

гается выполнять по стандартным методикам [42], которые позволяют производить расчеты как для регулируемых пересечений, так и для перегонов городских улиц и дорог.

В настоящее время имеется несколько отечественных программ, позволяющих давать оценку массовых выбросов от автомобильного транспорта как на городских улицах, так и загородных дорогах общего пользования (наиболее полная информация представлена <http://www.infars.ru>):

“МАГИСТРАЛЬ” – программа предназначена для расчета выбросов (оксид углерода, углеводороды, оксиды азота, сажа, соединения свинца) автомобильным транспортом в городских условиях на основе методики, принятой для Москвы в 1997 г.;

“ЭКОЛОГ ПРО” – программа позволяет: оценивать концентрации вредных веществ на различных высотах от уровня земли; учитывать в расчетах различные типы источников выбросов (в том числе автомагистрали), влияние застройки; взаимодействовать с другими программами (“ЭКОЛОГ-ГОРОД”, “АТП ЭКОЛОГ”, “МАГИСТРАЛЬ”, “ПДВ ЭКОЛОГ”, “ЭКОЛОГ”), обеспечивающими статистическую обработку, расчеты рассеивания, картографирование, графический вывод, формирование банков данных;

пакет “CREDO” – использует стандартные методики (методику ОНД-86 или методику, утвержденную федеральным дорожным департаментом Министерства транспорта РФ); позволяет оценивать эмиссию вредных веществ отработавших газов автомобилей транспортного потока и уровень концентрации вредных веществ в придорожном пространстве.

Кроме того, в России сейчас имеются методики и программы для расчета уровня шума и проектирования шумозащитных сооружений [46]. Таким образом, среди частных критериев оценки УДС лучшее методическое и программное обеспечение получила оценка экологической безопасности.

3.2.3. Показатели безопасности дорожного движения

К настоящему времени уже сложилась развитая теория количественной оценки безопасности движения и накоплен опыт разработки методик, соответствующих этой теории:

1. Методы, основанные на данных статистического учета ДТП. Оценка осуществляется по данным фактической аварийности.

2. Вероятностные методы определения возможного количества ДТП, использующие статистические зависимости между зависимой переменной (количеством ДТП) и различными факторами-аргументами, характеризующими условия движения на оцениваемом участке улично-дорожной сети.

3. Методы, основанные на изучении режима и характеристик движения на оцениваемом участке УДС.

4. Метод конфликтных ситуаций.

В нашей стране при оценке безопасности движения в городах предполагается выявлять места концентрации ДТП, получившие название очагов аварийности, или топографических очагов. Под очагом аварийности (топографическим очагом) понимается однородный и ограниченный по длине участок улично-дорожной сети, характеризующийся статистически устойчивым уровнем аварийности. Участки концентрации ДТП определяются на основании данных о ДТП за период не менее чем 3 последних года и показателя относительной аварийности. Очагом ДТП в городах считается участок улично-дорожной сети, не превышающий 400 м, на котором произошло в течение года три и более ДТП. Другой критерий – показатель относительной аварийности Z – рассчитывается по формуле

$$Z = A \cdot 10^6 / (365 \cdot N \cdot L \cdot m),$$

где A – суммарное количество ДТП за последние m лет; N – среднегодовая суточная интенсивность движения за тот же период; L – протяженность участка, км.

Рассмотренных выше показателей достаточно для выполнения оценки текущего состояния безопасности движения. Более проблематична количественная оценка безопасности движения проектных решений КСОД и ПОД, когда должны применяться вероятностные методы определения возможного количества ДТП (т.е. методы прогнозирования количества ДТП).

В России применяются методы оценки вероятного количества ДТП: для дорог общего пользования – линейный график коэффициентов аварийности; для нерегулируемых и кольцевых пересечений – конфликтные точки и их коэффициенты аварийности [4,31]. Однако нет общепринятых методик прогнозирования количества ДТП на регулируемых пересечениях и пешеходных переходах разных типов. Количественную оценку безопасности ОДД в городских условиях предлагалось проводить, используя суммарную конфликтную загрузку УДС R [42]:

$$R = 5 \sum \frac{N_{in} \cdot N_{jn}}{(N_{in} + N_{jn})^2} + 3 \sum \frac{N_{ic} \cdot N_{jc}}{(N_{ic} + N_{jc})^2} + \sum \frac{N_{io} \cdot N_{jo}}{(N_{io} + N_{jo})^2},$$

где N_{in}, N_{jn} – интенсивность движения потоков i и j , образующих конфликтную точку пересечения, ед./сут.; N_{ic}, N_{jc} – интенсивность движения потоков i и j , образующих конфликтную точку слияния потоков, ед./сут.; N_{io}, N_{jo} – интенсивность движения потоков i и j , образующих конфликтную точку ответвления потоков, ед./сут.

Методы оценки безопасности движения пешеходов очень актуальны уже только потому, что в крупных и крупнейших российских городах пешеходы составляют до 60% от общего количества погибших в ДТП. Поэтому существует необходимость проведения исследований и разработки прогнозирования аварийности на пешеходных переходах и регулируемых пересечениях на основе оценки

опасности конфликтных точек и коэффициентов относительной аварийности.

3.2.4. Показатель устойчивости функционирования УДС

Устойчивость УДС определена [42] как свойство не уменьшать свою пропускную способность в результате полного или частичного отказа отдельных ее элементов. Отказы рассматриваются как изменения дорожно-транспортных условий, в результате которых данный элемент УДС частично или полностью исключается из транспортного процесса. В соответствии с приведенными выше определениями устойчивости УДС и отказа элемента УДС причинами отказов указываются ДТП, аварии инженерных коммуникаций, массовые мероприятия и т.д.

Для оценки устойчивости предлагается разделять УДС на элементы, границами которых являются перекрестки, где транспортные потоки могут менять маршруты. Для каждого из элементов определяется коэффициент потерь при полном его отказе k_i , т.е.

$$k_i = (W_{(net-i)} - W_i) / W, \quad (3.1)$$

где $W_{(net-i)}$ – суммарная транспортная работа элементов УДС, которые воспринимают нагрузку элемента i при полном его отказе; W_i – транспортная работа элемента i УДС; W – транспортная работа магистральной УДС.

Показатель устойчивости функционирования УДС предлагается определять как среднее арифметическое коэффициентов потерь, а именно:

$$U_{net} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i, \quad (3.2)$$

где n – число элементов, на которые разбита магистральная УДС.

С рассмотренными выше показателями связывают и возможность определения “узких мест” [42]. К ним предлагается относить

элементы УДС, которые в соответствии с формулами (3.1), (3.2) удовлетворяют условию $k_i > U_{net}$.

Рассмотренные выше определения устойчивости сети и отказов ее элементов вызывают ряд замечаний. Понятие отказа может иметь гораздо более широкое толкование. В частности, в случае светофорного регулирования отказом на обслуживание могут считаться вторичные задержки, т.е. случаи, когда транспортные средства не обслуживаются циклом регулирования, в течение которого они прибыли к перекрестку (т.е. поток превышает пропускную способность). Появление вторичных задержек и рост длины очереди может приводить к сетевым заторам, определение которых приведено ниже (см. п. 3.2.5). Вероятности возникновения так называемого перенасыщения участков УДС, или сетевых заторов, являются одними из наиболее важных критериев оценки устойчивости и имеют ясный физический смысл.

3.2.5. Критерии, основанные на величине задержки и длине очереди

Продолжительность **средней задержки** транспортного средства получила широкое применение в качестве критерия оптимизации управления на отдельном пересечении. Установлено, что средняя задержка тесно коррелирует с такими показателями, как интенсивность движения, длина очереди, суммарная задержка, параметры режима регулирования.

Точность методики расчета величины средней задержки имеет принципиальное значение, так как на основе величины средней задержки оценивается длина очередей и определяется суммарная задержка. В нашей стране для практических расчетов величины средней задержки рекомендуется формула Вебстера, по которой

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \left(\frac{C}{q^2} \right)^{1/3} x^{(2+5\lambda)}, \quad (3.3)$$

где C – длительность цикла, с; λ – относительная эффективная длительность зеленого сигнала; x – коэффициент насыщения; q – интенсивность движения, прив.ед./с.

Входящие в состав формулы (3.3) λ , x и q определяются как

$$\lambda = g/C; \quad x = \frac{Q}{\lambda M} = \frac{gQ}{CM}; \quad q = Q/3600.$$

Здесь g – эффективная длительность зеленого сигнала, с; Q – интенсивность движения, прив.ед./ч; M – поток насыщения, прив.ед./ч.

Под **суммарной задержкой** понимается задержка всех транспортных средств за определенный период в пределах рассматриваемой УДС или ее участка. Суммарная задержка использовалась как критерий качества управления движением Миллером [206]. Показатель тесно коррелирует с длиной очереди, средней задержкой и интенсивностью движения. Суммарная задержка более подходит для экономической оценки эффективности ОДД в масштабах целой УДС или городского района, чем средняя задержка, которая в основном характеризует качество обслуживания отдельно взятого транспортного средства [206].

Максимальной задержкой считается наибольшая задержка одного из транспортных средств за рассматриваемый период. Она тесно коррелирует с величиной входящего на перекресток потока и длиной очереди на подходе к перекрестку. Продолжительность максимальной задержки может использоваться как показатель степени перенасыщения перекрестка, но сама методика ее определения значительно сложнее, чем других видов задержек. В этой связи ее рассматривают главным образом как дескриптор.

Под **длиной очереди** понимается количество транспортных средств в ней или ее протяженность в линейных единицах. Длина

очереди тесно коррелирует со средней и максимальной задержками, интенсивностью движения, параметрами режима регулирования и влияет на такие показатели, как скорость сообщения, количество троганий и торможений в расчете на единицу длины. Ее можно использовать как показатель степени насыщения, сравнивая с длиной очереди, пропускаемой за цикл. При достижении состояния насыщенных потоков, когда задачей управления становится минимизация вероятности возникновения затора, длина очереди и связанные с ней показатели считаются наиболее приемлемыми для управления сетью [206].

С показателем “длина очереди” связано определение понятия “перенасыщенная сеть” [206]. Если очередь транспортных средств у одного перекрестка вызывает образование очередей (т.е. заторы) у соседних пересечений, то такое состояние УДС рассматривается как признак сетевого затора (т.е. перенасыщенной сети).

Длина очереди L , или среднее количество автомобилей в начале основного такта (т.е. в момент включения зеленого сигнала), определяется как большее из двух значений, вычисляемых по формулам [27]

$$L = Nt_r/2 + Nd; \quad L = Nt_r,$$

где t_r – длительность запрещающего сигнала; N – интенсивность движения в данном направлении, авт./с; d – средняя задержка одного транспортного средства, с [см. формулу (3.3)].

Критерием, основанным на длине очереди, является **отношение длины очереди к длине перегона**; при этом за длину перегона принимается расстояние от рассматриваемого перекрестка до предшествующего ему по ходу движения. Еще более информативным показателем считается длина перегона за вычетом длины очереди. В частности, он оценен как наилучший параметр управления в условиях перенасыщения сети [206]. Преимущество рассматриваемых показателей по сравнению с абсолютной длиной очереди заключается в том, что они характеризуют работу перекрестков как

элементов сети, учитывают ее геометрию и позволяют определять участки возникновения сетевых заторов.

3.3. Пропускная способность УДС

3.3.1. Основные подходы к оценке пропускной способности УДС

Оценка пропускной способности отдельных элементов УДС (перегонов, пересечений и развязок различных типов) получила общепринятую терминологию, а методы расчетов подробно освещены в специальной литературе и соответствующих руководствах [13,27,28,3159,60,66,67]. Если выбор критериев уровня обслуживания и оценка пропускной способности отдельных элементов не являются проблемой, то принципиально иная ситуация складывается с оценкой пропускной способности сети.

Сам термин “пропускная способность УДС” давно и широко используется как градостроителями, так и транспортниками, но при этом до сих пор нет его единого определения. Более того, принципиально различаются подходы градостроителей и специалистов в области ОДД. Разное понимание пропускной способности сети привело к принципиально различающимся моделям количественной оценки.

Для отечественной градостроительной практики было характерно использование нормативных показателей плотности УДС в сочетании с определенными ориентировочными значениями пропускной способности магистральных улиц разных категорий [1,18,29,30]. Предполагалось, что соблюдение нормативных значений плотности УДС позволяет обеспечить достаточную пропускную способность. Одни специалисты-градостроители пытались сформулировать количественную оценку пропускной способности УДС на основе показателя ее плотности [18,29], другие авторы и некоторые проектные организации стали использовать показатель

емкости УДС – максимальное количество транспортных средств, которое может находиться на рассматриваемой территории [30,171].

Специалисты в области ОДД чаще всего связывают исчерпание пропускной способности сети с появлением хотя бы одного затора. Очень характерным является определение пропускной способности УДС, предложенное В.Т. Капитановым и Е.Б. Хилажевым [23]. Они понимают ее как “...множество векторов, компонентами которых являются интенсивности транспортных потоков на входах сети. При этом имеется хотя бы одна компонента, минимальное увеличение которой приводит к образованию затора на каком-либо участке УДС”.

Для специалистов в области ОДД характерен интерес к применению различных транспортных моделей, позволяющих прогнозировать возникновение заторов. Кроме того, сложилось направление оценки пропускной способности, использующее теорию графов [21,197,217]. В рамках этого направления пропускная способность сети рассматривается как задача определения минимального разреза сети.

3.3.2. Оценка пропускной способности на основе плотности УДС

Достаточно долго для отечественной градостроительной практики было характерно использование нормативных показателей плотности УДС в сочетании с определенными ориентировочными значениями пропускной способности магистральных улиц разных категорий. Подразумевалось, что соблюдение нормативных значений плотности УДС позволяет обеспечить достаточную пропускную способность.

Плотность УДС определяется как отношение суммарной протяженности улиц и дорог L к размеру территории F , то есть

$$S = L/F.$$

СНиП II-60-75** рекомендовал средний показатель плотности принимать равным 2,2–2,4 км/км². При этом в расчетах в составе КТС и ПДП в зависимости от категорий магистральных улиц и дорог ориентировались на средние значения пропускной способности магистральных улиц 1200–1500 прив.ед./ч. Согласно распространенному мнению эти показатели могут быть увеличены до 3–4 км/км² в центральных зонах городов или уменьшены до 1,5–2 км/км² на городской периферии.

Показатели плотности существующих УДС и их загрузки движением рассматривались в работах А.В.Сигаева, С.А.Ваксмана и ряда других авторов. Как правило, предметом исследований были статистические данные, включавшие следующие показатели: плотность УДС, протяженность улиц и дорог в расчете на одного жителя, количество зарегистрированных транспортных средств на 1 км улиц и дорог, годовой пробег транспортных средств на 1 км улиц и дорог и т.д.

Ряд исследований посвящен установлению связи между показателями плотности и пропускной способности. Так, для центров городов М.Г. Крестмейном [29] предложен относительный показатель пропускной способности λ , являющийся отношением входной мощности магистралей N (авт./ч) к площади центральной части города S (га):

$$\lambda = N/S.$$

По результатам исследований (городов Краснодарского края и республик Северного Кавказа) относительная пропускная способность варьировала в диапазоне 15–32 авт./ч на 1 га, а рекомендуемые значения λ составили 15–30 авт./ч на 1 га.

Несколько отличающуюся методику предложила Д.Р. Гришквичене [18]. Автор оценивала состояние УДС на основе двух показателей:

плотности полос проезжих частей (отношение суммарной протяженности полос движения к территории), км полос/км²;

уровня организации движения (количество приведенных автомобилей, которое может пропустить полоса движения на перегоне или пересечении при условии соблюдения условия безопасности движения).

Существующая полосная плотность магистральных улиц в крупнейших городах Литвы варьировала в пределах 2,4–14,3 км/км². Усредненные значения загрузки магистральных улиц крупнейших городов Литвы и Таллинна составляли в час пик 170–500 прив.ед./ч; при этом для центральных зон городов Литвы было характерно значение 350–490 прив.ед./ч. Соответственно для городов с населением от 100 до 500 тыс. жителей рекомендовались:

в зависимости от категории улиц уровень организации движения от 250 до 1530 прив.ед./ч;

для уровня организации движения 375 прив.ед./ч предлагалась полосная плотность магистральной сети 12–20 км/км².

Важнейший недостаток показателя плотности и его модификаций – отсутствие какой-либо конкретной информации о тех или иных участках УДС. Поэтому к концу 1980-х гг. отношение к показателю плотности УДС меняется. Так, СНиП 2.07.01 – 89 уже не содержит нормы плотности УДС. Позиция его разработчиков, руководствовавшихся тем, что многообразие градостроительных ситуаций требует не усредненных, а индивидуальных решений, достаточно подробно отражена в статьях А.А. Агасьянца [1]. Автор подчеркивал, что сложилась практика учета лишь самых общих требований и рекомендаций, чаще нормативной плотности УДС и формальной классификации улиц и дорог. На его взгляд критериями формирования и развития УДС являются: расчетные пассажиропотоки и затраты времени на транспортные передвижения с трудовыми целями; расчетная скорость движения; пропускная способность; категории улиц и дорог.

Как критерий оценки показатель плотности УДС относится к дескрипторам. Нормирование плотности магистральной улично-дорожной сети необходимо, прежде всего, для обеспечения нормативной доступности линий общественного транспорта.

3.3.3. Емкость УДС

Показатель емкости УДС использовался целым рядом авторов, при этом само понятие емкости УДС получило несколько различающиеся определения. В проектных работах мастерской генерального плана ЛенНИИПроекта (с 1989 г. институт ЛенНИиПИ генерального плана), связанных с оценкой пропускной способности центральных районов Санкт-Петербурга, использовался показатель емкости сети магистральных улиц, предложенный О.Н. Крыловой [30]. Определялась длина колонны транспортных средств L , входящих и выходящих из центральных районов:

$$L = Ndl/100V,$$

где N – количество ТС, входящих и выходящих из центральных районов (пересекающих границы центра); d – динамический габарит автомобиля (рассчитанный для среднего значения скорости сообщения V); l – средняя длина поездки; V – средняя скорость сообщения на УДС центральных районов.

С учетом транзита через городской центр Санкт-Петербурга и поездок только в границах центра длина колонны L оценивалась величиной 474 км. Суммарная протяженность полос движения в центре составляла 1050 км. В соответствии с этим степень использования пропускной способности УДС центра достигала лишь 45% (475км/1050км·100%). Вместе с тем результаты этой оценки не содержат информации о состоянии отдельных участков сети. Уже в период проведения рассматриваемых проектных работ (1986–1987

гг.) в пиковые часы в ряде узлов центральной части Санкт-Петербурга потоки превышали пропускную способность.

Аналогичная модель оценки пропускной способности была предложена для центра Варшавы [171]. Под пропускной способностью территории понималось максимальное количество транспортных средств, которые могут в данный момент двигаться или находиться на стоянках в пределах рассматриваемой территории.

В целом рассмотренные выше показатели плотности и емкости сети являются дескрипторами и дают некоторую общую оценку состояния сети. В случае применения таких оценок информация об исчерпании пропускной способности каким-либо участком УДС отсутствует. В этом главная причина того, что в практике ОДД они не получили применения.

3.3.4. Оценка пропускной способности УДС на основе теории графов

Теория графов имеет много технических приложений, в том числе оценка пропускной способности сетей различной природы (электрических, гидравлических, информационных и т.д.). Традиционно такая оценка основана на понятиях максимального потока и минимального разреза, согласно которым величина максимального потока равна пропускной способности минимального разреза сети. В целом случаи применения теории разрезов для оценки УДС немногочисленны [36,197].

Использование разрезов рассмотрено в ряде исследований, выполненных в университете Осака. Авторами [197] особо подчеркивается, что матрица корреспонденций и распределение потоков конкретной УДС всегда тесно связаны с характеристиками сети (т.е. пропускной способностью ее элементов), размещением крупных объектов массового тяготения, расселением. В этом контексте пропускная способность УДС определяется как максимальный по-

ток при заданных матрице корреспонденций и пропускной способности всех элементов сети (т.е. ребер графа сети). Пропускная способность разреза оценивается суммированием пропускной способности ребер, проходящих через разрез. Величина потока, проходящего через разрез, определяется суммированием потоков, которыми обмениваются расположенные по разные стороны разреза начальные и конечные пункты корреспонденций (рис. 3.1). Процедура оценки предполагает последовательный перебор разрезов с выявлением разреза с наименьшей пропускной способностью или наиболее загруженного разреза.

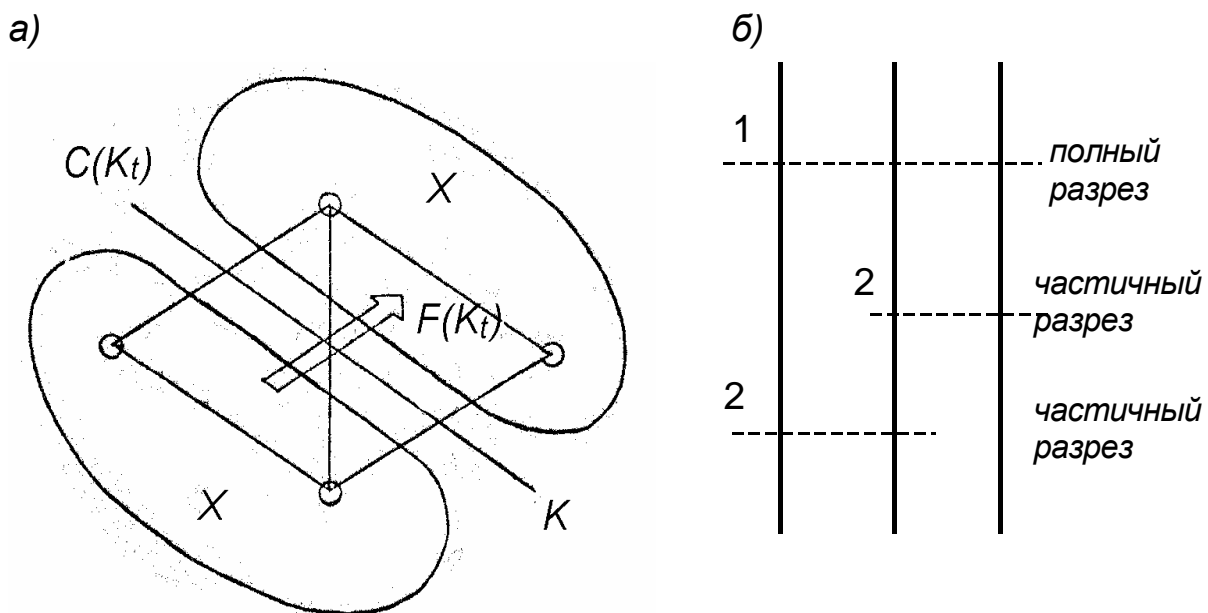


Рис. 3.1. Определение полного (а) и частичных разрезов (б) [197]: 1 – полный разрез; 2 – частичные разрезы ($F(K_t)$ – поток через разрез, $C(K_t)$ – пропускная способность разреза)

Для незначительной по размерам сети не представляется сложным произвести перебор всех ее разрезов, количество которых $n(n-1)/2$, где n – количество вершин графа. Трудоемкость оценки резко возрастает с размером сети. В этой связи японские авторы считают, что с практических позиций целесообразно рассматривать

лишь некоторое количество наиболее важных разрезов сети. Для уменьшения трудоемкости оценки ими предложено понятие “частичного разреза” (см. рис. 3.1).

Пропускная способность частичного разреза и величина потока через него определяются, как и в случае полного разреза. По мнению этих авторов наиболее важным условием применения метода частичных разрезов является заданная исходная матрица корреспонденций. Вторая обязательная составляющая исходных данных – информация о распределении потоков. Японские специалисты предполагали три возможных случая оценки распределения потоков по маршрутам [197]:

1. Заданы пути следования для любого из потоков заданной матрицы корреспонденций.

Распределение всех потоков матрицы корреспонденций определено на основе какой-либо гипотезы (т.е. используется модель распределения потоков).

2. Заданы пути следования для любого из потоков заданной матрицы корреспонденций.

В отличие от первого случая установлено реальное распределение потоков. Для каждой из пар корреспондирующих вершин известны объем корреспонденций и распределение этих корреспонденций по маршрутам на основе исследования сети.

3. Равновероятно использование любого пути следования любым из потоков заданной матрицы корреспонденций.

Предполагается, что потоки могут использовать любой из возможных путей следования, при этом не накладываются ограничения на вероятность выбора того или иного пути.

Отметим, что первый и третий случаи применимы для оценки пропускной способности УДС в перспективе, при предполагаемом росте интенсивности движения. Второй случай более соответствует оценке текущего состояния сети.

В нашей стране идея использовать теорему о максимальном потоке в задачах проектирования УДС рассмотрена в монографии Г.Н. Зубкова [21]. Пропускная способность определяется автором как максимальный поток (количество транспортных средств), который может быть реализован сетью в единицу времени (час и т.д.). Количественной оценкой является максимум функции (максимальный суммарный поток, который обеспечивается сетью относительно всех корреспондирующих пунктов сети одновременно)

$$\max \sum_{i,j} F_{ij}, \quad (3.4)$$

где F_{ij} – поток, который может реализовать сеть между двумя корреспондирующими пунктами сети i и j .

Необходимой исходной информацией служат значения пропускной способности магистральных улиц (т.е. задана пропускная способность ребер ориентированного графа). Наиболее точным представлением результатов является полный набор значений потоков F_{ij} в виде матрицы. Основная трудность такого подхода – трудоемкость перебора всех разрезов графа. Поэтому Г.Н. Зубков предлагал использовать описание ограничений пропускной способности в виде системы линейных неравенств и решать обычную задачу линейного программирования (т.е. каждое ребро и потоки на нем представляются в форме неравенства).

Следует подчеркнуть определенные противоречия между взглядами разных специалистов. Японские авторы [197] отметили применимость методов линейного программирования, но, в отличие от Г.Н. Зубкова, посчитали это пригодным для небольших сетей. Вместе с тем подход к оценке пропускной способности, предложенный Г.Н. Зубковым, легко реализуется путем использования стандартных математических пакетов линейной алгебры, которые позволяют работать с большими матрицами.

3.4. Интегральный критерий оценки – показатель уровня обслуживания

3.4.1. Основные положения концепции показателя уровня обслуживания

Уровень обслуживания (Level of Service, или LOS) заимствован из теории массового обслуживания и используется для оценки условий движения транспортных средств. Основные характеристики системы массового обслуживания (длина очереди в определенный момент времени, продолжительность периода, в течение которого n -е требование ожидает обслуживания, средняя продолжительность пребывания заявки в системе и т.д.) иногда требуют сложных вычислений. Поэтому возникла идея использовать для оценки условий движения транспортных потоков такую простую характеристику, как коэффициент загрузки

$$k = N/P, \quad (3.5)$$

где N – интенсивность поступления требований ; P – интенсивность обслуживания требований.

Другой причиной выбора такого критерия было требование, что критерий должен быть ясным и понятным даже для широкой аудитории, устанавливаться как в результате обследований, так и в результате расчетов.

Показатель получил название “уровень обслуживания” и определяется как “качественная характеристика, которая отражает такие совокупные факторы, как скорость движения, время поездки, свободу маневрирования, безопасность и удобство управления автомобилем” [156]. Приведенная формулировка имеет следующее объяснение: “Цель транспортных мероприятий – обслужить определенное количество требований с приемлемым качеством обслуживания. Это качество представляется пользователем в виде свободы выбора скорости и направления движения. ...Все эти качественные показатели изменяются как некоторая функция отношения ин-

тенсивности движения к пропускной способности обслуживающего транспортного сооружения” [156]. Цитируемые определения почти в неизменном виде содержатся в изданиях руководства по оценке пропускной способности Highway Capacity Manual [117,118] (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Градации уровней обслуживания и уровней удобства [1,59]

Уровень обслуживания	Уровень загрузки	Характеристика условий движения	Уровень удобства	Коэффициент загрузки	Характеристика условий движения
A	<0,1	Свободный поток	A	<0,2	Свободный поток
B	≥0,1	Устойчивый поток	Б	0,2—0,45	Частично связанный поток
C	≥0,3	Устойчивый поток	B	0,45—0,7	Связанный поток
D	≥0,7	Приближающийся к неустойчивому	Г-а	0,7—1,0	Насыщенный поток
E	≥1,0	Неустойчивый поток	Г-б	≥1,0	Плотно насыщенный поток

Уровень обслуживания стал в США основным критерием оценки качества ОДД и был включен в нормативные документы. Первоначально этот критерий был предложен для перегонов дорог и улиц. Разделение на уровни обслуживания преследовало цель транслировать многочисленные параметры, характеризующие функционирование автомобильного транспорта и дорог, в более простую и доступную для понимания шкалу оценки. За основу градации уровней обслуживания был принят коэффициент загрузки – отношение интенсивности движения к пропускной способности [формула (3.5) и табл. 3.3]. В нашей стране этот показатель стал использоваться для оценки условий движения на автомобильных до-

рогах общего пользования [59] и получил название “уровень удобства” (см. табл. 3.3).

Как уже указывалось выше, концепция критерия LOS и методика его применения включаются в состав руководства Highway Capacity Manual. В последнее десятилетие руководство (издание HCM 1985, дополненные переиздания в 1994 и 1997 гг., HCM 2000) претерпело значительные изменения; в него включены показатели LOS почти для всех элементов УДС, рассмотрено качество обслуживания пешеходного и велосипедного движения, качество обслуживания маршрутным пассажирским транспортом.

3.4.2. Формирование системы показателей уровня обслуживания

В настоящее время можно говорить о системе показателей уровня обслуживания [1,59,87,109,118,168,188,203]. В последнем издании HCM 2000 [118] предложены показатели LOS для большинства элементов УДС (табл. 3.4 и 3.5). Естественно, что для каждого вида движения (транспорт, пешеходы и т.д.) и каждого типа элементов УДС (перегоны, перекрестки, тротуары, пешеходные переходы и т.д.) используются свой определенный показатель и соответствующий метод его определения (см. табл. 3.4). Более того, критерии, используемые как индикаторы уровня обслуживания, могут применяться в других видах оценок – экологических и экономических (см. табл. 3.5).

Таким образом, условия движения транспортных средств, пешеходов и других пользователей можно оценивать на различных элементах улично-дорожной сети одним критерием – показателем уровня обслуживания (или уровня удобства).

Таблица 3.4

**Элементы УДС и виды движения, рассматриваемые
в руководстве НСМ 2000 [118]**

Элемент УДС	Показатель уровня обслуживания	Показатель, используемый для расчета скорости сообщения
	Автомобильный транспорт	
Прерываемое движение ¹ :		
Городские улицы	Скорость	Скорость
Регулируемые пересечения	Задержка	Задержка
Нерегулируемые пересечения	То же	То же
Нерегулируемые пересечения с остановкой при движении	— —	— —
Кольцевые пересечения ²	—	— —
Рампы развязок	Задержка	— —
Непрерывное движение ³ :		
Улицы с двухполосными проезжими частями	Скорость, доля времени движения в режиме следования за лидером	Скорость
Улицы с многополосными проезжими частями	Плотность	То же
Городские скоростные дороги:		
Перегоны	То же	Скорость
Ответвление съездов (рамп)	— —	То же
Примыкание съездов (рамп)	— —	— —
Участки переплетения потоков	Скорость	— —
Другие пользователи		
Маршрутный пассажирский транспорт ⁴	—	Скорость
Велосипедисты	Пространство, задержка	Скорость, задержка
Пешеходы	То же	То же

Примечания:

1. Под прерываемым движением понимаются регулируемые и нерегулируемые перекрестки, на которых происходят задержки транспортных средств.
2. Руководство НСМ 2000 не включает метод оценки уровня обслуживания на кольцевых пересечениях.
3. Под непрерывным движением понимаются дороги, имеющие только развязки в разных уровнях.
4. Для оценки уровня обслуживания при поездках на маршрутном пассажирском транспорте используется несколько критериев.

Таблица 3.5

Показатели уровня обслуживания и их связь с другими видами оценок
НСМ 2000 [118]

Элементы УДС и виды движения	Критерии, используемые для оценки уровня обслуживания	Возможности использования критерия для других оценок		
		Состояние воздуха	Уровень шума	Экономическая оценка
Городские улицы	Скорость сообщения	√	√	√
	Время поездки	√	—	√
	Задержка *	√	—	√
Регулируемые пересечения	Задержка *	√	—	√
	Коэффициент загрузки	√	—	√
Нерегулируемые пересечения	Задержка *	√	—	√
	Длина очереди	√	√	√
	Коэффициент загрузки	√	—	√
Движение пешеходов	Пространство	—	—	—
	Задержка	—	—	—
	Скорость	—	—	√
	Коэффициент загрузки	—	—	√
Двухполосные дороги	Доля времени движения в режиме следования за другим автомобилем	—	—	—
	Скорость	√	√	√
Многополосные дороги	Плотность потока	—	—	—
	Скорость	√	√	√
	Коэффициент загрузки	√	—	√
Участки скоростных дорог (freeway facilities)	Плотность потока	—	—	—
	Скорость	—	—	√
	Задержка **	√	√	√
	Продолжительность поездки	—	—	√
Эталонный перегон (Basic Freeway Section)	Плотность потока	—	—	—
	Скорость	√	√	√
	Коэффициент загрузки	—	—	—
Участки переплетения потока	Плотность потока	—	—	—
	Скорость в зоне переплетения	√	√	√
	Скорость вне зоны переплетения	√	√	√
Съезды (рампы) развязок	Плотность потока	—	—	—
	Скорость	√	√	√
Примыкание съездов	Задержка *	√	—	√
Пассажирский маршрут-ный транспорт	Интервал движения	√	√	√
	Суточная продолжительность работы	√	√	√
	Загрузка салона	√	√	√
	Надежность	√	√	√

* Задержка, вызванная организацией движения.

** Суммарная задержка на съездах данного участка.

В своем первоначальном виде показатель уровня обслуживания являлся инструментом оценки конкретного элемента УДС на основе данных, получаемых в результате обследований и простейших расчетов. Развитие теории транспортных потоков, вычислительной техники, методов моделирования УДС и пакетов программ позволило производить оценку прогнозируемого уровня обслуживания при проектировании. Теперь к сфере применения показателей LOS относят [211]:

анализ на стадии управления и эксплуатации – определение уровня обслуживания при заданных дорожных и транспортных условиях, разработка мероприятий ОДД, проектирование;

анализ на стадии проектирования ОДД – оценка транспортно-го обслуживания при средне - и долгосрочных прогнозах, определение расчетных параметров транспортных сооружений, обеспечивающих заданное качество обслуживания;

анализ на стадии планирования – оценка качества обслуживания при долгосрочных прогнозах и стратегическом планировании развития транспортных систем.

Поскольку область применения критерия очень широка, в самых общих чертах рассмотрим показатели уровня обслуживания, предложенные для ряда элементов УДС.

3.4.3. Оценка уровня обслуживания на перегонах улиц и дорог

В последнем издании руководства HCM 2000 [118] градация уровней обслуживания для условий непрерывного движения получила некоторые уточнения (см. рис. 3.2 и табл. 3.5), при этом оценка уровня обслуживания при непрерывном движении связана с рядом понятий, определения которых приводятся ниже.

Эталонный перегон (Basic Freeway Section) – перегон многополосной дороги с непрерывным движением, находящийся вне

зон влияния съездов (рамп) развязок и участков переплетения потоков. Эталонный перегон характеризуется следующими основными параметрами:

расстояние между развязками не менее 2 миль;

ширина полос движения не менее 12 футов;

боковой зазор на обочине справа не менее 6 футов;

боковой зазор до ограждений на разделительной полосе не менее 2 футов;

поток состоит только из легковых автомобилей;

плоский рельеф, продольные уклоны не превышают 2%.

Пропускная способность (Capacity) – максимальная устойчивая интенсивность движения в течение 15 мин., которую может обслужить эталонный перегон в преобладающих дорожных условиях, выражается количеством легковых автомобилей в час на полосе.

Объем обслуживания (Service Volume) – максимальная интенсивность движения, которая может быть обслужена дорогой (улицей, пересечением и т.д.) при заданном уровне обслуживания. Понятие “фактический уровень обслуживания” употребляется, когда оцениваются преобладающие дорожные условия, а понятие “расчетный уровень обслуживания” – когда оцениваются проектируемая дорога или ее элемент [118].

Скорость свободного потока (Free Flow Speed) – 1) теоретическая скорость при отсутствии других транспортных средств (при плотности потока, равной нулю); 2) средняя скорость движения автомобилей на перегоне улицы, не имеющей светофорного регулирования, в условиях низкой плотности потока; 3) средняя скорость движения автомобилей на идеальном перегоне многополосной проезжей части в условиях низкой плотности потока.

Коэффициент внутричасовой неравномерности (Peak-hour Factor) – отношение интенсивности движения в час пик к макси-

мальной интенсивности движения в течение 15 мин. в период этого пикового часа.

Использование коэффициента внутричасовой неравномерности PHF вызвано необходимостью уделять внимание пиковым периодам суток, когда УДС работает с максимальными нагрузками. Неравномерность интенсивности движения наблюдается и внутри самих пиковых периодов. Такие короткие промежутки времени с максимальной интенсивностью в час пик могут стать причиной исчерпания пропускной способности. Наиболее распространенная практика состоит в разделении часа пик на 15-минутные интервалы при подсчете интенсивности движения. Наибольшее значение интенсивности принимается за расчетное значение. В соответствии с этим на основе данных обследований коэффициент внутричасовой неравномерности PHF определяется как

$$PHF = \frac{V}{4 \times V_{15}}, \quad (3.6)$$

где V – интенсивность за час пик, прив.ед./ч; V_{15} – максимальное количество автомобилей, прошедших за 15 - минутные интервалы, прив.ед.

Для эталонных перегонов городских дорог с непрерывным движением приняты нижеследующие значения пропускной способности полосы движения (табл. 3.6).

Показателем уровня обслуживания на перегонах дорог с непрерывным движением принята плотность транспортного потока. Рассматриваемый как функция плотности потока и коэффициента загрузки, критерий получил в СНМ 2000 [118] градацию, приведенную в табл. 3.7 и на рис. 3.2.

В соответствии с приведенными выше определениями терминов и данными табл. 3.6 и 3.7 определение показателя LOS выполняется в указанной ниже последовательности [формулы (3.7) – (3.12)].

Таблица 3.7

Границы уровней обслуживания на перегонах дорог в случае непрерывного движения (СНМ 2000) [118]

Уровень обслуживания	Плотность потока	
	прив.ед./миля	прив.ед./км
A	<11	<7
B	11,1 – 18	7,1 – 11
C	18,1 – 26	11,1 – 16
D	26,1 – 35	16,1 – 22
E	35,1 – 45	22,1 – 28
F	>45	>28

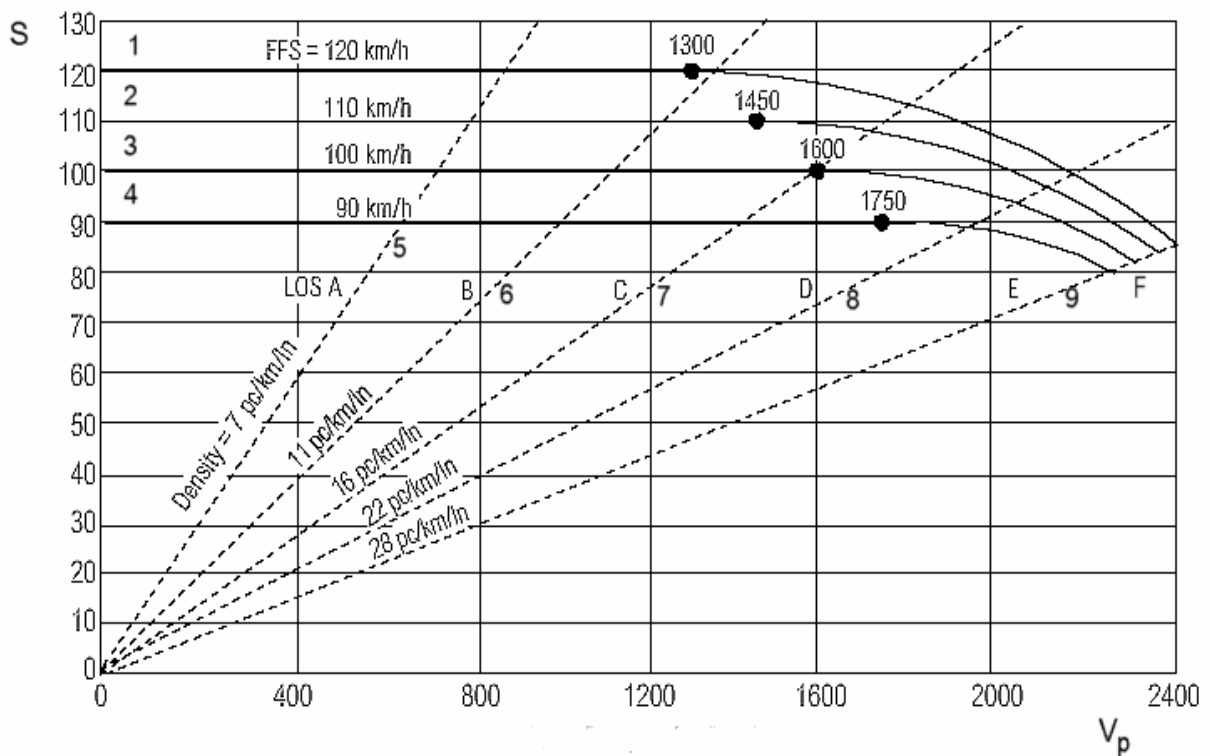


Рис. 3.2. Зависимость средней скорости S от интенсивности V_p [118] (1–4 – скорость свободного движения FFS , км/ч: 1 – 120; 2 – 110; 3 – 100; 4 – 90) и границы уровней обслуживания для непрерывного движения при плотности потока D , прив.ед./км (5 – уровней А – В, $D = 7$; 6 – уровней В – С, $D = 11$; 7 – уровней С – D, $D = 16$; 8 – уровней D – Е, $D = 22$; 9 – уровней Е – F, $D = 28$)

1. Определяется интенсивность движения v_p в 15-минутный пиковый период по формуле

$$v_p = \frac{V}{PHF \times N \times f_{HV} \times f_P}, \quad (3.7)$$

где V – проектная интенсивность, прив.ед./ч; PHF – коэффициент внутрисуточной неравномерности для перерасчета по формуле (3.6) интенсивности движения в час пик к максимальной за период этого пикового часа, в случае дорог с непрерывным движением изменяется в диапазоне 0,80 – 0,95; N – количество полос движения; f_{HV} – коэффициент, учитывающий наличие грузовых автомобилей и автобусов в потоке,

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)} \quad (3.8)$$

(здесь P_T – доля грузовых автомобилей и автобусов в потоке; E_T – коэффициент приведения грузовых автомобилей и автобусов к легковому автомобилю; P_R – доля рекреационных (т.е. перевозящих оборудование для спорта и отдыха) автомобилей в потоке; E_R – коэффициент приведения рекреационных автомобилей к легковому автомобилю); f_P – поправочный коэффициент, учитывающий поведение водителей.

2. Определяется скорость свободного потока FFS как

$$FFS = BFFS - f_{LW} - f_{LC} - f_N - f_{ID}, \quad (3.9)$$

где $BFFS$ – типичная скорость в свободных условиях (75 миль/ч – скорость на загородных дорогах, 70 миль/ч – скорость на городских дорогах); f_{LW} – коэффициент, учитывающий ширину полос движения; f_{LC} – коэффициент, учитывающий боковой зазор на обочине до ограждений, сооружений и т.д.; f_N – коэффициент, учитывающий количество полос движения; f_{ID} – коэффициент, учитывающий плотность размещения развязок.

3. Определяется уровень обслуживания. Для этого рассчитывается скорость потока S :

при выполнении условия $V_p \leq (3100 - 15FFS)$

$$S = FFS; \quad (3.10)$$

при условии $(3100 - 15FFS) < V_p \leq (1800 + 5FFS)$

$$S = FFS - \left[\frac{1}{28} (23FFS - 1800) \left(\frac{V_p + 15FFS - 3100}{20FFS - 1300} \right)^{2.6} \right]. \quad (3.11)$$

Плотность потока D (прив.ед./км) рассчитывается как отношение

$$D = \frac{V_p}{S}. \quad (3.12)$$

Определение показателя уровня обслуживания для непрерывного движения выполняется на основе исходных параметров V_p , FFS , D (см. рис. 3.2).

При регулируемом движении оценка уровня обслуживания на городских улицах выполняется на основе расчетов скорости сообщения с учетом задержек на регулируемых и нерегулируемых пересечениях. В соответствии с этим и с учетом классификации улиц (табл. 3.8) предложена градация уровней обслуживания, приведенная в табл. 3.9.

Средняя скорость сообщения (км/ч) на участке улицы (рис. 3.3) определяется как

$$S_A = \frac{3600L}{T_R + d}, \quad (3.13)$$

где L – длина участка, км; T_R – время движения по участку, с; d – задержка, вызванная ОДД, на регулируемом пересечении, с.

Таблица 3.8

Классы городских улиц (СНМ 2000) [118]

Особенности проектирования в зависимости от типа района	Функциональная категория	
	Важнейшие магистрали	Второстепенные магистрали
Скоростные дороги (загородные)	I	—
Пригородные районы	II	II
Районы, промежуточные между городскими и пригородными	II	III или IV
Городские районы	III или IV	IV

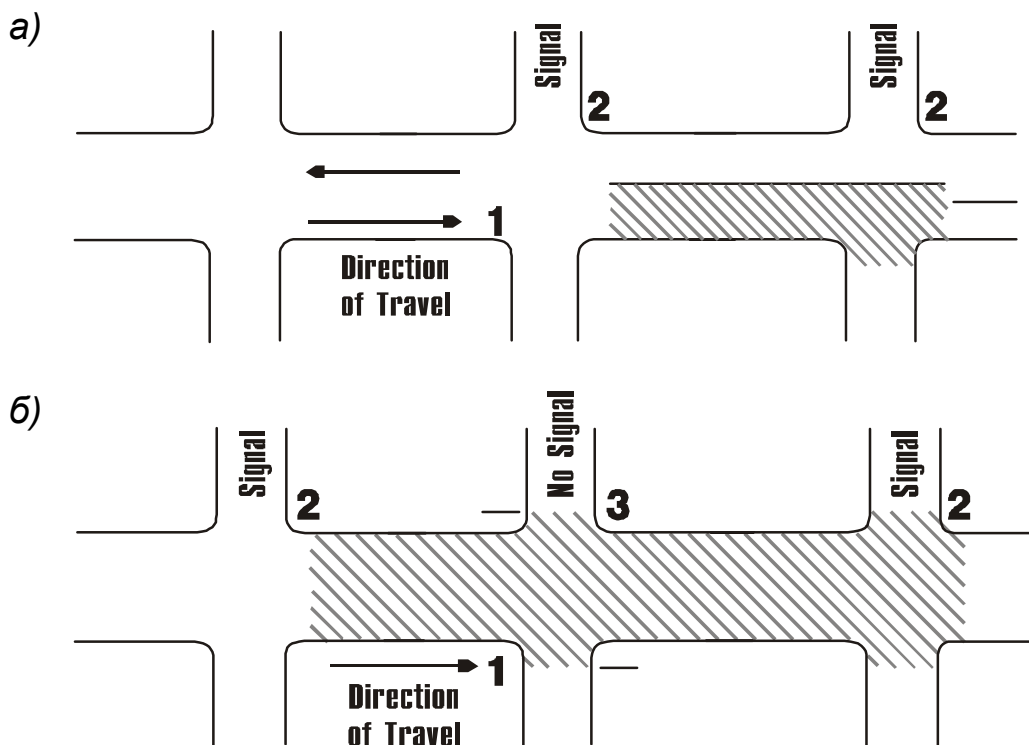


Рис. 3.3. Участок (сегмент) улицы с двухсторонним движением (а) и односторонним (б) при определении уровня обслуживания с использованием формулы (3.13): 1 – направление движения; 2 – регулируемые перекрестки; 3 – нерегулируемый перекресток (участок улицы является главным направлением движения)

Соответственно уровень обслуживания улицы в целом

$$S_A = \sum L / \sum T, \quad (3.14)$$

где $\sum L$ – длина улицы (сумма участка), км; $\sum T$ – суммарное время движения по улице, с;

Для определения задержек, входящих в состав параметров, используемых в формулах (3.13) и (3.14), применяется детальная методика, изложенная еще в руководстве НСМ 1985, в которой также учитывается степень координации движения между соседними перекрестками. Это принципиально важно для расчетов задержек, когда перекрестки нельзя рассматривать как изолированные.

Таблица 3.9

Границы уровней обслуживания на городских улицах с регулируемым движением (СНМ 2000) [118]

Класс городской улицы	Диапазон значений скорости в свободных условиях (FFS), км/ч	Типичное значение FFS, км/ч	Границы уровней обслуживания					
			A	B	C	D	E	F
			Средняя скорость сообщения, км/ч					
I	90 – 70	70	>72	56,1 – 72	40,1 – 56	32,1 – 40	26,1 – 32	≤26
II	70 – 55	70	>59	46,1 – 59	33,1 – 46	26,1 – 33	21,1 – 26	≤21
III	55 – 50	70	>50	39,1 – 50	28,1 – 39	22,1 – 28	17,1 – 22	≤17
IV	55 – 40	70	>41	32,1 – 41	23,1 – 32	18,1 – 23	14,1 – 18	≤14

В соответствии с выбранным индикатором уровня обслуживания (средней скоростью сообщения) условия движения на город-

ских улицах при различных уровнях охарактеризованы в СНМ 2000 следующим образом:

Уровень А. Свободный поток, средняя скорость составляет 90% скорости в свободных условиях *FFS* данного класса улиц. Свободные условия для выполнения маневров. Задержки на регулируемых перекрестках минимальны.

Уровень В. Средняя скорость составляет 70% скорости в свободных условиях *FFS* данного класса улиц. Незначительные помехи движению и выполнению маневров. Задержки на регулируемых перекрестках незначительны.

Уровень С. Стабильный поток, но возможность выполнения маневров и смены полосы движения более затруднены, чем при уровне В. Возрастают очереди у перекрестков. Средняя скорость составляет 50% скорости в свободных условиях *FFS* данного класса улиц.

Уровень Д. При данном уровне незначительное увеличение скорости может вызывать рост задержек и снижение скорости сообщения. Данный уровень наблюдается при плохой координации, не соответствующих потокам параметрах режима регулирования или при сочетании этих причин. Средняя скорость составляет 40% скорости в свободных условиях *FFS* данного класса улиц.

Уровень Е. Характеризуется значительными задержками и снижением скорости сообщения до 33 % скорости в свободных условиях *FFS* данного класса улиц. Причинами такого состояния могут быть комбинации следующих факторов: плохая координация, не соответствующие потокам параметры режима регулирования, высокая плотность размещения регулируемых пересечений, большая интенсивность движения.

Уровень F. Средняя скорость составляет 25–33 % скорости в свободных условиях *FFS* данного класса улиц. Значительные задержки и длина очередей у регулируемых перекрестков.

Таблица 3.10

Допустимые уровни обслуживания, принятые в штате Флорида [109]

Категория дорог		Загородные территории	Территории, которые будут отнесены к городским ¹	Городские территории с населением менее 500 000	Городские территории с населением более 500 000	Дороги, дублирующие важнейшие маршруты пассажирских перевозок	Территории с особым режимом застройки и планировки ²	Улицы, не подлежащие реконструкции ³
Дороги, включенные в план транспортной системы Флориды	Дороги с ограниченным доступом (Limited access)	B	C	C(D)	D(E)	D(E)	D(E)	По условиям эксплуатации ⁵
	Дороги с регулируемым доступом (Controlled access)	B	C	C	D	E	E	То же
Другие магистральные дороги	Многополосные	B	C	D	D	E	Специальные нормы ⁴	По условиям эксплуатации ⁵
	Двухполосные	C	C	D	D	E	Специальные нормы ⁴	То же

Примечания:

1. Территории, которые планируется в течение 20 лет включить в состав урбанизированных территорий.
2. Территории, на которых существуют ограничения, связанные с сохранением исторических и культурных ценностей, природных ландшафтов и проектами реабилитации городских территорий.
3. Дороги, которые функционируют при предельных допустимых уровнях обслуживания, но не будут подвергаться реконструкции в течение 5 ближайших лет.
4. Условия движения должны соответствовать требованиям документа Rule 9J-5.0057 штата Флорида.
5. В городских условиях средний годовой рост интенсивности составляет 10-процентное превышение интенсивности движения предельного уровня обслуживания.

Следует отметить, что в отличие от магистральных улиц и дорог для улиц и дорог с двухполосными проезжими частями предлагается использовать долю времени, при которой осуществляется движение в режиме следования за впереди идущим транспортным средством (т.е. когда водитель вынужден снижать скорость и не может совершить обгон). Таким образом, категории улиц и дорог (многополосные дороги непрерывного движения, улицы и дороги с регулируемым движением, двухполосные проезжие части местных улиц и дорог) оцениваются соответствующими критериями, что демонстрирует гибкость системы показателей уровней обслуживания.

На основе положений СНМ 2000 департаменты транспорта формируют собственные нормативы проектирования и организации движения, вносят в них определенные дополнения. Пример предельных допустимых значений уровня обслуживания, принятых в штате Флорида, приведен в табл. 3.10.

3.4.4. Оценка уровня обслуживания на пересечениях

Средняя задержка, или продолжительность обслуживания, является одним из наиболее часто используемых критериев качества функционирования систем массового обслуживания. Естественно, что показателем уровня обслуживания транспортных средств на регулируемых пересечениях традиционно служит величина средней задержки (табл. 3.11). Кроме того, анкетирование специалистов и водителей показало, что экспертные оценки условий движения на регулируемых перекрестках лучше всего коррелируют с величиной средней задержки [206].

Таблица 3.11

Градации уровней обслуживания для регулируемых пересечений, основанные на величине средней задержки (stopped delay)

Уровень обслуживания	Величина средней задержки, с			
	May A. [211], Tidvell J.E. [196]	Sutaria T., Hampreys J.E. [196]	HCM 1985, 1994	
			Условия движения	Время, с
A	≤15	≤12,6	Задержка отсутствует или мала	≤5
B	≤30	≤30,1	Незначительная длительность цикла регулирования, хорошая координация	5,1 – 15
C	≤40	≤47,7	Возросшая длительность цикла регулирования, достаточно хорошая координация	15,1 – 25
D	≤60	≤65,2	Значительная длительность цикла регулирования, достаточно хорошая координация	25,1 – 40
E	>60	≤82,2	Значительная длительность цикла регулирования, плохая координация	40,1 – 60
F	—	—	Условия движения неприемлемы для большинства водителей, интенсивность на подходах превышает пропускную способность перекрестка	> 60

В руководстве HCM 2000 [118] в качестве показателя уровня обслуживания на регулируемых и нерегулируемых пересечениях используется так называемая задержка, вызванная регулированием (Control Delay). Термин Control Delay имеет следующее определение: задержка, возникающая в результате замедления или остановки и измеряющаяся как разница между затратами времени при движении без регулирования. Объяснение этому термину дает диаграмма расстояние – время (рис. 3.4). В связи с применением нового критерия границы уровней обслуживания на регулируемых пересечениях получили изменения (табл. 3.11 и 3.12). Рассматривае-

мый индикатор уровня обслуживания был использован и для оценки условий движения на второстепенных направлениях нерегулируемых пересечений (табл. 3.14) и участках примыканий съездов развязок. Далее по тексту этот показатель будет называться задержкой, вызванной организацией движения, и обозначаться *ACD* (Average Control Delay).

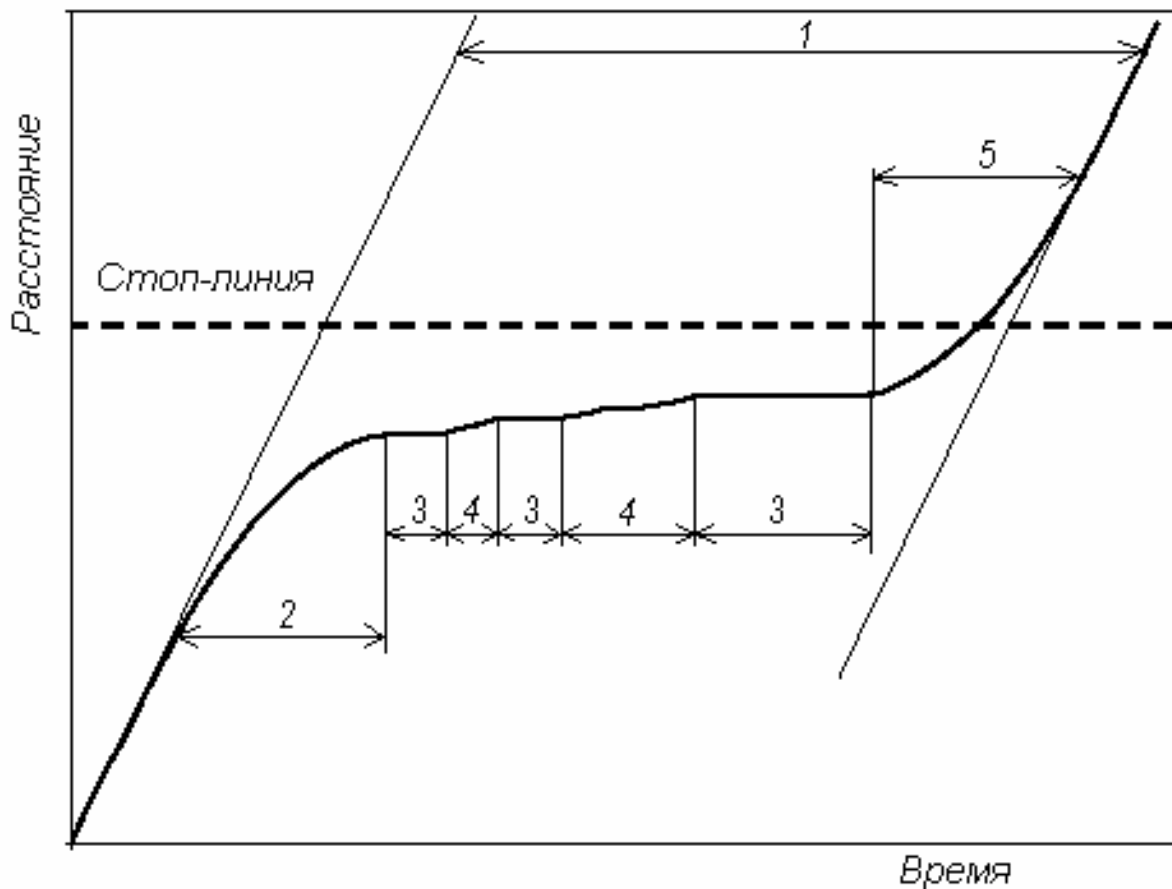


Рис. 3.4. Потери времени, входящие в состав задержки *ACD* (1), вызванной организацией движения на регулируемом пересечении: 2 – торможение (Deceleration delay); 3 – остановки в очереди транспортных средств (Stopped delays); 4 – продвижение в очереди транспортных средств (Queue move-up-delays); 5 – разгон (Acceleration delay)

На нерегулируемых пересечениях условия движения характеризуются задержками, снижением скорости движения второстепенного направления и т.д. Поэтому в случае нерегулируемых пересечений предлагалось использовать разные показатели [159] (см. табл. 3.13). Градация уровней обслуживания для нерегулируемых пересечений, принятая в Руководстве СНМ 2000 [118], приведена в табл. 3.14.

Таблица 3.12

Градация уровней обслуживания для регулируемых пересечений (СНМ 2000) [118]

Уровень обслуживания	Условия движения	Величина средней задержки, вызванной организацией движения (Average Control Delay), с
A	Задержка отсутствует или мала	≤ 10
B	Незначительная длительность цикла регулирования, хорошая координация	10,1 – 20
C	Возросшая длительность цикла регулирования, достаточно хорошая координация	20,1 – 35
D	Значительная длительность цикла регулирования, достаточно хорошая координация	35,1 – 55
E	Значительная длительность цикла регулирования, плохая координация	55,1 – 80
F	Условия движения неприемлемы для большинства водителей, интенсивность на подходах превышает пропускную способность перекрестка	> 80

В Руководстве СНМ 2000 [118] подчеркивается, что уровень обслуживания F на нерегулируемых пересечениях соответствует условиям, когда пропускная способность второстепенного направления не превышает 85 авт./ч.

Таблица 3.13

Предлагавшиеся показатели и градации уровней обслуживания для нерегулируемых пересечений [159]

Уровень-обслуживания	Второстепенные направления движения		
	Величина средней задержки, с	Доля автомобилей, снизивших скорость до 16 км/ч, %	Доля остановившихся автомобилей, %
A	<15	<60	<40
B	<30	<70	<60
C	<40	<80	<70
D	<60	<85	<75
E	>60	>85	>75

Таблица 3.14

Используемая в настоящее время градация уровней обслуживания для нерегулируемых пересечений (СНМ 2000) [118]

Уровень обслуживания	Величина средней задержки, вызванной организацией движения (Average Control Delay), с
A	≤10
B	10,1 – 15
C	15,1 – 25
D	25,1 – 35
E	35,1 – 50
F	> 50

В Руководстве СНМ 2000 [118] градация уровней обслуживания на съездах рассматривается отдельно для проезжих частей съездов и участков примыкания съездов к основному направлению. В первом случае индикатором обслуживания выбрана плотность потока (табл. 3.15). Участки примыканий съездов оцениваются аналогично нерегулируемым пересечениям.

Таблица 3.15

Градации уровней обслуживания для съездов (рампы)
развязок (СНМ 2000) [118]

Уровень обслуживания	Максимальная плотность потока, прив. авт./миля *	Описание
A	≤10	Поворачивающие с основного направления ивливающиеся в него автомобили не создают помех движению на основном направлении
B	>10 – 20	Маневры поворота с основного направления и слияния с ним заметны для водителей, двигающихся в прямом направлении
C	>20 – 28	В зонах влияния съездов снижается средняя скорость, заметно влияние маневров поворота с основного направления и слияния с ним
D	>28 – 35	Все транспортные средства снижают скорость при выполнении поворота с основного направления и слияния с ним
E	>35	Условия, близкие к исчерпанию пропускной способности. Скорость движения меньше 40 миль/ч. Маневры поворота с основного направления и слияния с ним оказывают влияние на всех водителей, двигающихся в зоне съездов развязки
F	**	Условия насыщения. При этом уровне поток превышает пропускную способность основного направления (слияние с основным направлением) и съезда (разветвление потоков)

* Плотность потока измеряется в приведенных (легковых) автомобилях в час на милю на одну полосу.

** Поток превышает пропускную способность.

Сравнение Руководства СНМ 2000 [118] с нормативными советскими, а затем российскими документами и публикациями по-

зволяет сделать следующие выводы. Методы расчета задержек на нерегулируемых пересечениях, примыканиях съездов развязок, кольцевых развязках подробно рассмотрены в работах Е.М. Лобанова, В.В. Сильянова [59,60] и ряда других авторов. Кроме того, имеются нормативные руководства, в которых содержатся подробные методики соответствующих расчетов. Однако в нашей стране не обновляется методическое обеспечение по проектированию регулируемых пересечений (расчетам задержек, очередей транспортных средств, параметров режимов регулирования). В Руководстве НСМ 1985 [117] для определения средней задержки была предложена уточненная зависимость, получившая название североамериканской формулы (North American Equation). Считается, что она дает более точную оценку средней задержки при значениях коэффициента насыщения, близких 1,00 [202]. Кроме того, за последние примерно 15 лет было уделено большое внимание изучению параметров, используемых в расчетах режима регулирования (потoki насыщения в различных условиях, коэффициенты приведения к легковому автомобилю, влияние координации движения на величину средней задержки и т.д.).

3.4.5. Показатель уровня обслуживания пешеходных потоков

Показатель уровня обслуживания получил в дальнейшем распространение и на пешеходное движение. Для описания параметров пешеходного потока воспользовались моделями макроскопической теории транспортного потока. Соответственно на движение пешеходов были перенесены сложившиеся в теории транспортных потоков концепции пропускной способности, соотношений скорости, плотности и интенсивности, а также понятие уровней обслуживания [20,141,150].

Для оценки движения пешеходов на тротуарах применяются аналогии с транспортным потоком на перегонах дорог. Критерием комфорта движения пешеходов и степени загруженности пешеходной коммуникации выбрана плотность пешеходного потока, оцениваемая отношением количества пешеходов к площади этой коммуникации [20,141,150]. Многими авторами отмечено, что именно плотность определяет возможность пешехода избрать желаемые ему темп и траекторию движения, учитывает помехи и даже физические воздействия на пешехода со стороны других участников движения [141,102,108,109]. В соответствии с этим предлагались градации уровней обслуживания (табл. 3.16) пешеходных потоков.

Таблица 3.16

Границы уровней обслуживания пешеходных потоков

Уровень обслуживания	Плотность пешеходного потока, чел./м ²			
	Авторы, библиографические источники			
	Fruin J.J., Benz G.P. [150]*	Da Rios, Rinelli [141]	Weidmann U. [220]	Fruin J.J., Benz G.P. [150]**
A	<0,28	<0,3	<0,10	<0,83
B	0,28-0,46	0,3-0,4	0,10-0,30	0,83-1,11
C	0,46-0,69	0,4-0,7	0,30-0,45	1,11-1,54
D	0,69-1,00	0,7-1,0	0,45-0,60	1,54-3,57
E	1,00-1,85	1,0-2,0	0,60-0,75	3,57-5,50
F	>1,85	>2,0	0,75-1,00	>5,50
G	—	—	1,00-1,50	—
H	—	—	1,50-2,00	—
I	—	—	>2,0	—

* Градация уровней обслуживания для тротуаров.

** Градация уровней обслуживания для пространств, где останавливаются пешеходы.

В Руководстве НСМ 2000 [118] в зависимости от характера пешеходного движения приняты разные градации уровней обслуживания для разных типов пешеходных коммуникаций. В качестве примера приведем два типа коммуникаций (табл. 3.17):

для участков, где осуществляется только движение пешеходов и не предусматривается образование их очередей, показателями уровня обслуживания выбраны пространство, приходящееся на одного пешехода (м^2), и интенсивность движения пешеходов в расчете на полосу движения шириной 1 м (пеш./мин./м);

для участков, где образуются очереди пешеходов, например тротуаров около пешеходных регулируемых переходов, показателем уровня обслуживания выбрано пространство, приходящееся на одного пешехода (м^2).

Таблица 3.17

Предлагаемые границы уровней обслуживания
(НСМ 2000) [118]

Уровень обслуживания	Тротуары, дорожки		Участки с образованием очередей пешеходов
	Пространство, приходящееся на одного пешехода, м^2	Интенсивность движения пешеходов, чел./мин./м	Пространство, приходящееся на одного пешехода, м^2
A	5,6	16	1,2
B	3,71 – 5,6	16,1 – 23	0,9 – 1,19
C	2,21 – 3,7	23,1 – 33	0,6 – 0,89
D	1,41 – 2,2	33,1 – 49	0,3 – 0,59
E	0,75 – 1,41	49,1 - 75	0,2 – 0,29
F	< 0,75	меняется	< 0,2

Если исходить из декларируемого принципа “оценка с позиций пользователя”, то существуют определенные сложности при

оценке уровня обслуживания пешеходов на регулируемых пересечениях и переходах. Субъективная оценка условий движения самими пешеходами во многом определяется продолжительностью ожидания разрешающего сигнала (т.е. продолжительностью задержки), что подтверждается исследованиями [6,51,188].

Многие специалисты предполагают существование психологически приемлемой длительности задержки, или так называемого времени терпеливого ожидания. Ю.Д.Шелков [6] установил значительный рост числа нарушений пешеходами запрещающего сигнала, когда его длительность превышала 38–40 с. На этом основании высказывалось предположение, что время терпеливого ожидания пешеходов на регулируемых переходах составляет в среднем 40 с. Можно совместить продолжительность задержки и плотность пешеходного потока в процедуре определения уровня обслуживания. Например, если уровень обслуживания определяется плотностью пешеходного потока, то при задержке пешеходов дольше 40 с условия движения можно относить к низшему уровню обслуживания.

3.4.6. Показатель уровня обслуживания маршрутным пассажирским транспортом

Показатели LOS были распространены на оценку качества обслуживания перевозок маршрутным пассажирским транспортом и включены в состав Руководства HCM 2000. Несколько ранее такая оценка была рассмотрена в специальном руководстве TCQSM [203,208], кроме того, ряд исследований по этой проблеме выполнен во Флориде [109].

При разработке концепции оценки соблюдался принцип “оценка с позиций пользователя”. В соответствии с этим отбира-

лись критерии, характеризующие все составляющие поездки с использованием пассажирского маршрутного транспорта (табл. 3.18).

Таблица 3.18

**Концепция и показатели качества обслуживания
маршрутного пассажирского транспорта
TCQSM [203], HCM 2000**

Категория оценки	Показатели качества обслуживания и эффективности		
	Остановка общественно-го транспорта	Перегон на маршруте	Система маршрутов пассажирского транспорта
Доступность	<p>Маршрутный интервал</p> <p>Доступность *</p> <p>Заполнение салона</p>	<p>Протяженность работы в часах за сутки</p> <p>Доступность *</p>	<p>Доступность **</p>
Комфорт и удобство пользования	<p>Заполнение салона</p> <p>Обустройство остановок</p> <p>Надежность</p>	<p>Надежность</p> <p>Скорость сообщения</p> <p>Соотношении скоростей сообщения при пользовании маршрутным транспортом и легковым автомобилем</p>	<p>Соотношение скоростей сообщения при пользовании маршрутным транспортом и легковым автомобилем</p> <p>Время поездки</p> <p>Безопасность</p>

* Пешеходная доступность остановок.

** Охват территории зонами пешеходной доступности.

Таблица 3.19

Предлагаемые границы уровней обслуживания по условиям размещения пассажиров в салонах подвижного состава маршрутного пассажирского транспорта

Уровень обслуживания	Автобусы		Рельсовый транспорт		Комментарий
	Пространство в расчете на одного пассажира, м ²	Количество пассажиров, приходящееся на одно сидение	Пространство в расчете на одного пассажира, м ²	Количество пассажиров, приходящееся на одно сидение	
A	>1,20	0,00 – 0,50	1,85	0,00 – 0,50	Пассажиры могут выбирать место в салоне и не садиться рядом друг с другом
B	0,80 – 1,19	0,51 – 0,75	1,30 – 1,85	0,00 – 0,50	Пассажиры могут выбирать место в салоне
C	0,60 – 0,79	0,76 – 1,00	0,95 – 1,29	0,00 – 0,50	Все пассажиры могут сидеть
D	0,50 – 0,59	1,00 – 1,25	0,50 – 0,94	0,00 – 0,50	Уровень загрузки
E	0,40 – 0,49	1,26 – 1,50	0,30 – 0,49	0,00 – 0,50	Максимальная загрузка салона, допускаемая в расчетах провозной способности и выпуска подвижного состава
F	<0,40	>1,50	<0,30	>3,00	Переполнение салона

Сложность рассматриваемой задачи не позволила свести оценку к какому-то одному показателю. К числу факторов, оказывающих влияние на субъективную оценку пользователей, отнесены:

- пешеходная доступность остановок;
- качество пешеходной среды (т.е. удобство пешеходных коммуникаций и особенности их дизайна);
- маршрутное расписание;
- благоустройство остановок;
- затраты времени на поездку;
- стоимость поездки;
- безопасность поездки (безопасность ОДД и персональная безопасность);
- заполнение подвижного состава;
- дизайн подвижного состава;
- надежность (оценивается возможностью сохранять заданные маршрутные интервалы).

В качестве основных критериев оценки уровня обслуживания выбраны величина маршрутного интервала (или обратная характеристика – частота) и показатели заполнения подвижного состава (табл. 3.19). Учет остальных факторов, перечисленных выше, осуществляется поправочными коэффициентами.

Пример разработки показателей уровня обслуживания для пассажирского маршрутного транспорта еще раз доказывает большие потенциальные возможности этого подхода к оценке транспортных систем в целом. Закономерным следствием сложившейся системы показателей должна была быть идея перехода от оценки отдельных видов движения (транспорт, пешеходы, маршрутный пассажирский транспорт и т.д.) к их совместной оценке, рассмотрению их взаимодействия и взаимного влияния. В проводящихся в

настоящее время исследованиях [109] уже рассматривается такая задача.

3.4.7. Дальнейшее развитие показателя уровня обслуживания

Перспективы развития системы показателей обслуживания были сформулированы “Комитетом пропускной способности и качества обслуживания” [211]. К числу вопросов, требующих изучения, отнесены оценка условий движения при достижении пропускной способности (congested conditions) и качество обслуживания транспортных потоков кольцевыми пересечениями.

Принципиально важным направлением развития LOS объявлено [203,211] создание методов оценки (multimodal LOS), рассматривающих совместное движение разных пользователей городской улицы (автомобильного транспорта, пассажирского маршрутного транспорта, велосипедистов и пешеходов). Так как разные виды пользователей взаимодействуют в пространстве городской улицы, важно установить, каким образом изменение уровня обслуживания одного пользователя влияет на уровни обслуживания других. За неимением общепринятого термина в российской литературе для обозначения multimodal LOS переведем его как “комплексная оценка уровня обслуживания”.

Для развития данного направления есть ряд предпосылок, главные из которых – акты Transportation Equity Act for the 21st Century (TEA-21) [199] и Intermodal Surface Transportation Efficiency Act of 1991 (ISTEA). Оба акта утвердили общественный транспорт, движение пешеходов и велосипедистов в качестве обязательных элементов планирования, проектирования и эксплуатации транспортных систем США. Были разработаны показатели LOS для пешеходного и велосипедного движения, в результате чего новое

“Руководство по пропускной способности” (HCM 2000) [118] уже содержит специальные разделы, посвященные этим видам движения. Еще одним шагом является “Руководство по провозной способности и оценке качества обслуживания пассажирским маршрутным транспортом” (TCQSM) [203]. В нем были разработаны соответствующие показатели LOS для оценки качества обслуживания пассажирских перевозок. Таким образом, некоторые компоненты метода интегральной оценки совместного движения разных пользователей уже существуют, и необходимо продолжать дальнейшее его развитие, дополняя недостающими компонентами.

Проводимые транспортным департаментом Флориды (Florida Department of Transportation или FDOT) [211] инициативные исследования по данной тематике уже воплотились в критерии комплексной оценки уровня обслуживания, применяемые на стадии проектирования, методики и программного обеспечения.

Интерес к развитию комплексной оценки уровня обслуживания настолько велик, что весной 2003 г. в рамках Национальной программы исследований США был начат новый проект NCHRP Project 3-70 [211]. Целью исследований является создание методов оценки LOS для автомобильного транспорта, маршрутного пассажирского транспорта, велосипедистов, пешеходов в условиях их взаимного влияния. Задача проекта, который объявлен лишь первой стадией исследований, сформулирована как подготовка дополнительных материалов для новых изданий руководств по пропускной способности HCM и маршрутному транспорту TCQSM.

Уже известна часть основных положений будущей методики комплексной оценки. Так, вместо единого интегрального показателя LOS, оценивающего условия движения сразу всех пользователей пространства улицы, будет применяться система показателей. В этой связи предполагается провести критический анализ практики

применения отдельных критериев LOS и выполнить в полном объеме необходимые исследования взаимного влияния всех видов движения. Объявляется принципиально важным взаимно увязать градации уровней обслуживания разных видов движения, сделать их сопоставимыми. При этом градации и описание уровней будут выполняться “с позиций пользователей” (т.е. водителей автомобилей, пассажиров маршрутного транспорта, пешеходов, двигающихся вдоль улицы).

Еще один аспект развития показателя уровня обслуживания, который обсуждается в публикациях – интеграция этого критерия с методами оценки безопасности движения [211].

Таким образом, в США оценка качества транспортного обслуживания, условий движения при планировании, проектировании и эксплуатации улично-дорожных сетей будет и в дальнейшем базироваться на системе показателей уровней обслуживания.

3.5. Оценка пропускной способности улично-дорожной сети с использованием показателя уровня обслуживания

Использование показателя уровня обслуживания не только позволяет унифицировать критерии оценки УДС, но и принципиально упрощает задачу оценки пропускной способности УДС, которая рассматривалась п.3.3. Если принимать УДС как систему массового обслуживания, то оценку сети и ее отдельных элементов можно свести к двум следующим показателям:

уровень обслуживания – качество обслуживания заявок;

пропускная способность – максимальное количество заявок, которые может обслужить сеть (или ее элемент) при заданном уровне обслуживания.

Определение максимального количества заявок сводится к задаче линейного программирования, в которой целевой функцией является сумма корреспонденций, обслуживаемых сетью, как это предлагалось Г.Н. Зубковым [21]. Если УДС рассматривается в виде ориентированного графа, то суммарные потоки на дугах и пропускные способности дуг формируют линейные ограничения задачи. Линейные ограничения позволяют рассматривать оценку пропускной способности УДС так, как ее формулировали В.Т. Капитанов и Е.Б. Хилажев [23]. Вместо значений пропускной способности дуг в линейных ограничениях могут использоваться максимальные объемы движения, соответствующие заданным уровням обслуживания. В этом случае оценивается максимальное количество корреспонденций, которые может пропустить УДС при заданном качестве обслуживания.

Для оценки распределения потоков обязательным условием является заданная матрица корреспонденций, причем случаи, когда матрица не является фиксированной, получили название эластичного спроса (elastic demand). В рассмотренной выше постановке задачи линейного программирования пока не отражен спрос на обслуживание, который можно учесть дополнительными ограничениями. Современное развитие методов линейного программирования предоставляет возможность рассматривать задачу оценки максимального объема корреспонденций в условиях эластичного спроса даже с учетом существующей матрицы корреспонденций.

За последние примерно 15 лет предложено несколько новых методов решения задач линейной оптимизации и разработано много пакетов программ линейного программирования. Об этом свидетельствуют многочисленные публикации, информационные материалы о теоретических и вычислительных аспектах, алгоритмах и пакетах линейного программирования, предоставляемые целым ря-

дом специализированных веб-сайтов университетов и научных учреждений Европы и Северной Америки, например [74,139]. Очень подробные справочные данные и библиографию, сравнительный анализ программного обеспечения содержит <http://www.lionhrtpub.com/orms/surveys/LP>.

Современные методы линейного программирования, их реализация в виде пакетов и библиотек программ предоставляют возможность эффективных решений задачи со смешанными ограничениями

$$\min \mathbf{c}^T \mathbf{x}, \quad (3.15)$$

при линейных ограничениях

$$\mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \quad (3.16)$$

и двухсторонних ограничениях

$$\mathbf{x}^{lb} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{ub}, \quad (3.17)$$

где \mathbf{x} – вектор оцениваемых параметров $m \times 1$, $\mathbf{x} \geq 0$; \mathbf{c} – вектор коэффициентов целевой функции $m \times 1$; \mathbf{A} – матрица коэффициентов линейных ограничений $n \times m$; \mathbf{b} – вектор правых частей линейных ограничений $n \times 1$, $\mathbf{b} \geq 0$; \mathbf{x}^{lb} – вектор нижних ограничений параметров $m \times 1$, $\mathbf{x}^{lb} \geq 0$; \mathbf{x}^{ub} – вектор верхних ограничений $m \times 1$, $\mathbf{x}^{ub} \geq 0$.

В настоящее время решение задачи (3.15) при ограничениях (3.16) и (3.17) выполнено, например, в математических пакетах MATLAB (версии 5.1, 5.2, 6,0), MOSEK 2.0. Принципиально важно, что кроме набора ограничений

$$\mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b}; \quad \mathbf{x} \geq 0; \quad \mathbf{x}^{lb} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{ub}; \quad \mathbf{x}^{lb} \geq 0; \quad \mathbf{x}^{ub} \geq 0$$

можно вводить вектор начальных значений оцениваемых параметров \mathbf{x}^0 . Это позволяет включать в задачу оценки пропускной способности существующую матрицу корреспонденций, которую можно преобразовать и представить в виде вектора \mathbf{x}^0 размерностью $m \times 1$. Тогда двухсторонние ограничения \mathbf{x}^{lb} и \mathbf{x}^{ub} характеризу-

ют эластичный спрос, другими словами, границы, в которых могут изменяться значения корреспонденций x .

Рассматриваемая задача линейного программирования (3.15)–(3.17) позволяет обобщить и объединить идеи и теоретические положения работ [21, 23, 197], рассмотренных ранее в п. 3.3, и сформулировать оценку пропускной способности УДС в самом общем виде [см. формулу (3.4)]:

N – совокупность вершин графа, описывающего УДС;

M – совокупность начальных и конечных вершин корреспонденций (в литературе по сетевым задачам для таких вершин иногда применяют термины “истоки – стоки”, origin-destination pairs);

t_{ij} – поток из начальной вершины i в конечную вершину j (x_{ij} элемент квадратной матрицы корреспонденций T), $ij \in M$;

p – маршрут следования, $p \in P$;

$x_{ij,p}$ – часть потока из начальной вершины i в конечную вершину j , использующая путь (маршрут) движения p ;

c_{ab} – пропускная способность дуги ab , направленной из вершины a в вершину b , или максимальный объем движения по дуге ab , соответствующий заданному уровню обслуживания; $a, b \in N$;

f_{ab} – интенсивность движения по дуге ab ; $a, b \in N$;

$d_{p,ab} = 1$, если маршрут p проходит через дугу ab , 0 – в остальных случаях.

Предполагается, что кроме значений дуг пропускной способности c_{ab} известны существующие значения f_{ab}^0 , x_{ijp}^0 и t_{ij}^0 . Интенсивности движения f_{ab}^0 устанавливаются в результате обследования УДС, а по их значениям восстанавливается существующая матрица корреспонденций T^0 . При этом распределение потоков по сети x_{ijp}^0 и

корреспонденции t_{ij}^0 , образующие матрицу T^0 , связаны зависимостями:

$$t_{ij}^0 = \sum_p x_{ijp}^0 \quad \text{для всех пар } ij.$$

Связь между существующими значениями интенсивности движения f_{ab}^0 и существующими потоками x_{ijp}^0 задается уравнениями

$$\sum_i \sum_j \sum_p d_{p,ab} x_{ij,p}^0 = f_{ab}^0 \quad \text{для всех пар } ab. \quad (3.18)$$

Значения пропускной способности дуг c_{ab} , являющиеся правыми частями линейных ограничений задачи линейного программирования, необходимо задать в виде вектора-столбца. Это вызывает изменение индексов; соответственно, c_{ab} , f_{ab} и $d_{p,ab}$ будут представлены как c_k , f_k и $d_{p,k}$, где $k = 1, 2, \dots, K$. В результате условие (3.18) получит следующий вид:

$$\sum_i \sum_j \sum_p d_{p,k} x_{ij,p} = f_k \quad \text{для всех } k \in K.$$

Как уже указывалось ранее, в задаче оценки пропускной способности УДС c_k могут задаваться как значения пропускной способности дуг или как максимальные объемы движения, соответствующие заданным уровням обслуживания. Двухсторонние ограничения (3.17), накладываемые на корреспонденции, могут устанавливаться в результате расчетов или экспертных оценок. Поэтому эластичный спрос, характеризующийся двухсторонними ограничениями, назовем гипотезой изменения матрицы корреспонденций. Соответственно пропускная способность УДС определяется авторами как *максимальное количество корреспонденций, которое может обслужить сеть при известных c_k и заданной гипотезе изменения матрицы корреспонденций T* . Пропускная способность оценивается максимумом целевой функции

$$\max \sum_i \sum_j \sum_p x_{ij,p} \quad (3.19)$$

при линейных ограничениях, учитывающих пропускную способность дуг c_k

$$\sum_i \sum_j \sum_p d_{p,k} x_{ij,p} \leq c_k \quad (\text{для всех } k),$$

и условия неотрицательности оцениваемых параметров $x_{ij,p} \geq 0$.

В рассматриваемой задаче оценки пропускной способности (3.19) разные гипотезы изменения матрицы корреспонденций T задаются с использованием:

нижних $x_{ij,p}^{lb}$ и верхних $x_{ij,p}^{ub}$ ограничений для потоков $x_{ij,p}$;

верхних ограничений t_{ij}^{ub} для количества корреспонденций t_{ij} .

1. Изменение потоков с сохранением маршрутов следования.

Задана гипотеза изменения транспортных потоков x_{ijp} в виде нижних x_{ijp}^0 и верхних ограничений x_{ijp}^{ub} . При этом предполагается, что используются прежние пути следования p , часть потоков x_{ijp} изменяется в бóльшую сторону ($x_{ijl} > x_{ijl}^0$), а часть потоков x_{ijp} уменьшается ($x_{ijs} < x_{ijs}^0$). Двухсторонние ограничения имеют вид

$$x_{ijp}^{lb} \leq x_{ijp} \leq x_{ijp}^{ub}.$$

2. Рост части потоков с сохранением маршрутов следования.

Предполагается увеличение части потоков ($x_{ijl} > x_{ijl}^0$) и ($x_{ijs} = x_{ijs}^0$) и сохранение маршрутов следования. В этом случае двухсторонние ограничения можно задать следующим образом:

$$x_{ijl}^0 \leq x_{ijl} \leq x_{ijl}^{ub}, \quad l = 1, 2, \dots, n.$$

$$x_{ijs}^0 \leq x_{ijs} \leq x_{ijs}^0, \quad s = n+1, n+2, \dots, P.$$

3. Рост всех потоков с сохранением маршрутов следования.

Предполагается, что количество корреспонденций изменяется только в бóльшую сторону, и используются прежние пути следования, то есть

$$x_{ijp}^0 \leq x_{ijp} \leq x_{ijp}^{ub},$$

где x_{ijp}^{lb} – нижние ограничения приняты равными существующим потокам x_{ijp}^0 .

4. Изменение потоков и их маршрутов следования.

В этом случае задается гипотеза изменения матрицы корреспонденций T , т.е. накладываются верхние ограничения t_{ij}^{up} для элементов матрицы t_{ij} .

Результатом оценки пропускной способности УДС по формуле (3.19) являются значения потоков $x_{ij,p}^*$, при которых исчерпана пропускная способность одного или нескольких участков УДС, то есть условие $f_k^* = c_k$ для любого $k = 1, 2, \dots, K$. Соответствующие такому состоянию УДС значения корреспонденций t_{ij}^* и интенсивностей движения f_k^* определяются как

$$t_{ij}^* = \sum_p x_{ij,p}^* \quad \text{для всех пар } ij;$$

$$f_k^* = \sum_i \sum_j \sum_p d_{p,k} x_{ij,p}^* \quad \text{для всех } k.$$

Выбор ограничений $x_{ij,p}^{lb}$, $x_{ij,p}^{ub}$ или $t_{ij,p}^{ub}$ базируется на соответствующих начальных исходных данных:

в случае проекта реконструкции УДС с длительным расчетным сроком необходимы оценка матрицы корреспонденций и прогноз распределения потоков (перспективная картограмма интенсивности движения);

в случае проекта реконструкции или ОДД используются известное существующее распределение потоков x_{ijk}^0 , полученное в результате обследований УДС, и восстановленная матрица корреспонденций T^0 .