

**Глава 7****Параметры транспортных потоков**

---

**Содержание**

Содержание .....	1
<b>7-1. Введение .....</b>	<b>2</b>
<b>7-2. Непрерывные потоки.....</b>	<b>2</b>
7-2.1. Нагрузка и интенсивность потока.....	2
7-2.2. Скорость.....	3
7-2.3. Плотность.....	6
7-2.4. Интервал и дистанция.....	6
7-2.5. Соотношения между базовыми параметрами.....	7
<b>7-3. Прерываемые потоки.....</b>	<b>9</b>
7-3.1. Управление с помощью светофоров .....	10
7-3.2. Перекрестки со знаками Стоп и Уступи дорогу .....	12
7-3.3. Скорость.....	13
7-3.4. Задержка.....	13
7-3.5. Интенсивность потока насыщения и потери времени .....	14
7-3.6. Образование очередей .....	15
<b>7-4. Литература .....</b>	<b>18</b>

## 7-1. Введение

Для описания трафика на любой дороге можно использовать три базовых переменных — нагрузку или интенсивность потока, скорость и плотность. В настоящем руководстве нагрузка (или интенсивность потока) является параметром, общим для участков с непрерывным и прерываемым потоками, однако скорость и плотность применимы, большей частью, к непрерывным потокам. Некоторые параметры, имеющие отношение к интенсивности потока (такие как дистанция и интервал движения), также используются для обоих типов участков; другие же (наподобие интенсивности потока насыщения или просвета) характерны для участков с прерыванием потока.

## 7-2. Непрерывные потоки

### 7-2.1. Нагрузка и интенсивность потока

Нагрузка и интенсивность потока — это два показателя для измерения объема трафика, проходящего через точку на полосе или дороге в продолжение заданного периода времени.<sup>1</sup> Понятия определяются следующим образом.

- Нагрузка — количество транспортных средств, проходящих через заданную точку или секцию полосы либо дороги в течение определенного интервала времени; нагрузка выражается в терминах годового, суточного, часового или субчасового периодов.
- Интенсивность потока — эквивалентный часовой темп, в котором автомобили пересекают заданную точку или секцию полосы либо дороги в продолжение промежутка времени менее часа (обычно длительностью 15 минут).

Нагрузка и интенсивность потока являются переменными, измеряющими запрос на трафик, т.е. количество водителей и пассажиров (обычно выражаемое числом автомобилей), которые желают воспользоваться данным участком дороги в течение указанного интервала времени. На запрошенный объем трафика могут влиять заторы, и наблюдаемые значения нагрузки иногда в большей степени отражают ограничения пропускной способности, нежели реальную величину запроса.

Различие между нагрузкой и интенсивностью потока весьма важно. Нагрузка — это количество автомобилей (наблюдаемое или прогнозируемое), которые пересекают точку в течение определенного интервала времени. Интенсивность потока представляет количество автомобилей, пересекающих точку в продолжение интервала, меньшего 1 часа, но выражается как эквивалентный часовой показатель. Интенсивность потока есть количество автомобилей, измеренное за период длительностью менее часа и деленное на время (в часах) наблюдения. Например, нагрузка в 100 автомобилей за 15-минутный период подразумевает интенсивность потока, равную  $100 \text{ автомобилей} / 0.25 \text{ часа}$ , или  $400 \text{ авт./час}$ .

Понятия нагрузки и интенсивности потока можно проиллюстрировать посредством значений нагрузки для четырех последовательных 15-минутных периодов. Пусть четыре значения таковы: 1000, 1200, 1100 и 1000. Общая часовая нагрузка есть сумма этих слагаемых, или 4300 авт. Интенсивность потока, однако, варьируется для каждого 15-минутного периода. В течение 15-минутного периода максимальной нагрузки интенсивность потока составляет  $1200 \text{ автомобилей} / 0.25 \text{ часа}$ , или  $4800 \text{ авт./час}$ . Заметим, что через исследуемую точку не проехало 4800 автомобилей в течение часа наблюдений, но поток обладал такой интенсивностью в продолжение одного из 15-минутных промежутков времени.

<sup>1</sup> К базовым параметрам участков дорог с непрерывным потоком относятся: нагрузка, интенсивность потока, скорость, плотность, интервал движения и пропускная способность.

Рассмотрение пиковых значений интенсивности потока важно при анализе пропускной способности. Если, например, пропускная способность сегмента изучаемой магистрали составляет 4500 авт./час, в течение пикового 15-минутного периода этот показатель вполне допускает превышение, когда поток демонстрирует интенсивность в 4800 авт./час, даже если общая часовая нагрузка будет ниже пропускной способности. Это чревато серьезной проблемой, поскольку процесс рассеяния затора, возникшего из-за превышения пропускной способности, может растянуться на часы.

Пиковые значения интенсивности потока и часовые уровни нагрузки позволяют получить коэффициент часа пик (PHF — от *peak-hour factor*) — отношение общей часовой нагрузки к пиковой интенсивности потока в течение часа:

$$PHF = \frac{\text{Часовая нагрузка}}{\text{Пиковая интенсивность потока (в течение часа)}}. \quad (7-1)$$

Если используются 15-минутные периоды, коэффициент часа пик можно вычислять по формуле

$$PHF = \frac{V}{4 \cdot V_{15}}, \quad (7-2)$$

где

$PHF$  — коэффициент часа пик;

$V$  — часовая нагрузка (авт./час);

$V_{15}$  — нагрузка в течение пикового 15-минутного интервала пикового часа (авт./15 мин.).

Когда коэффициент часа пик известен, величину пиковой нагрузки можно преобразовать в пиковую интенсивность потока:

$$v = \frac{V}{PHF}, \quad (7-3)$$

где

$v$  — интенсивность потока для 15-минутного периода пиковой нагрузки (авт./час);

$V$  — нагрузка в течение пикового часа (авт./час);

$PHF$  — коэффициент часа пик.

В использовании соотношения (7-3) для оценки пиковой интенсивности потока нет необходимости, если доступны значения нагрузки по периодам; однако выбранный интервал учета должен включать пиковый 15-минутный период. Интенсивность затем можно вычислить как учетверенное максимальное значение показателя нагрузки за 15-минутный период. Когда известны интенсивности потока в терминах произвольных автомобилей, можно перейти к эквивалентной мере в единицах пассажирских автомобилей, если воспользоваться коэффициентом часа пик и корректирующим коэффициентом транспорта большой грузоподъемности.

## 7-2.2. Скорость

Хотя параметр нагрузки обеспечивает способ числового представления значений пропускной способности, скорость (или соответствующее ей время проезда) является важной мерой качества обслуживания трафика. Это значимый критерий эффективности, определяющий уровни обслуживания для дорожных участков многих типов, подобных загородным двухполосным магистралям, городским улицам, сегментам примыкания к автострадам и пр.

Скорость определяется как темп движения, выраженный значением расстояния, проходимого за единицу времени (обычно числом километров в час). Характеризуя скорость транспортного потока, следует использовать репрезентативную величину ввиду широкого распределения значений скорости отдельных автомобилей в потоке. В контексте настоящего руководства в

качестве меры скорости используется средняя скорость проезда, поскольку она легко вычислима на основе наблюдаемых значений скорости отдельных автомобилей и является наиболее статистически релевантным показателем во взаимосвязи с другими переменными. Средняя скорость проезда вычисляется путем деления длины рассматриваемого сегмента (магистралю, улицы, секции и т.п.) на среднее время проезда по нему. Если для  $n$  автомобилей, проехавших по сегменту длины  $L$  (в километрах), зафиксированы значения  $t_1, t_2, \dots, t_n$  времени проезда (в часах), то средняя скорость проезда составит

$$S = \frac{n \cdot L}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{L}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i} = \frac{L}{t_a}, \quad (7-4)$$

где

$S$  — средняя скорость проезда (км/час);

$L$  — длина сегмента (км);

$t_i$  — время проезда сегмента  $i$ -м автомобилем (час);

$n$  — количество зафиксированных значений времени проезда сегмента автомобилями;

$t_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$  — среднее время проезда (час).

Здесь время проезда включает задержки остановки ввиду прерываний потока из-за действия регулирующих сигналов или возникновения заторов и трактуется как общее время проезда сегмента дороги определенной длины.

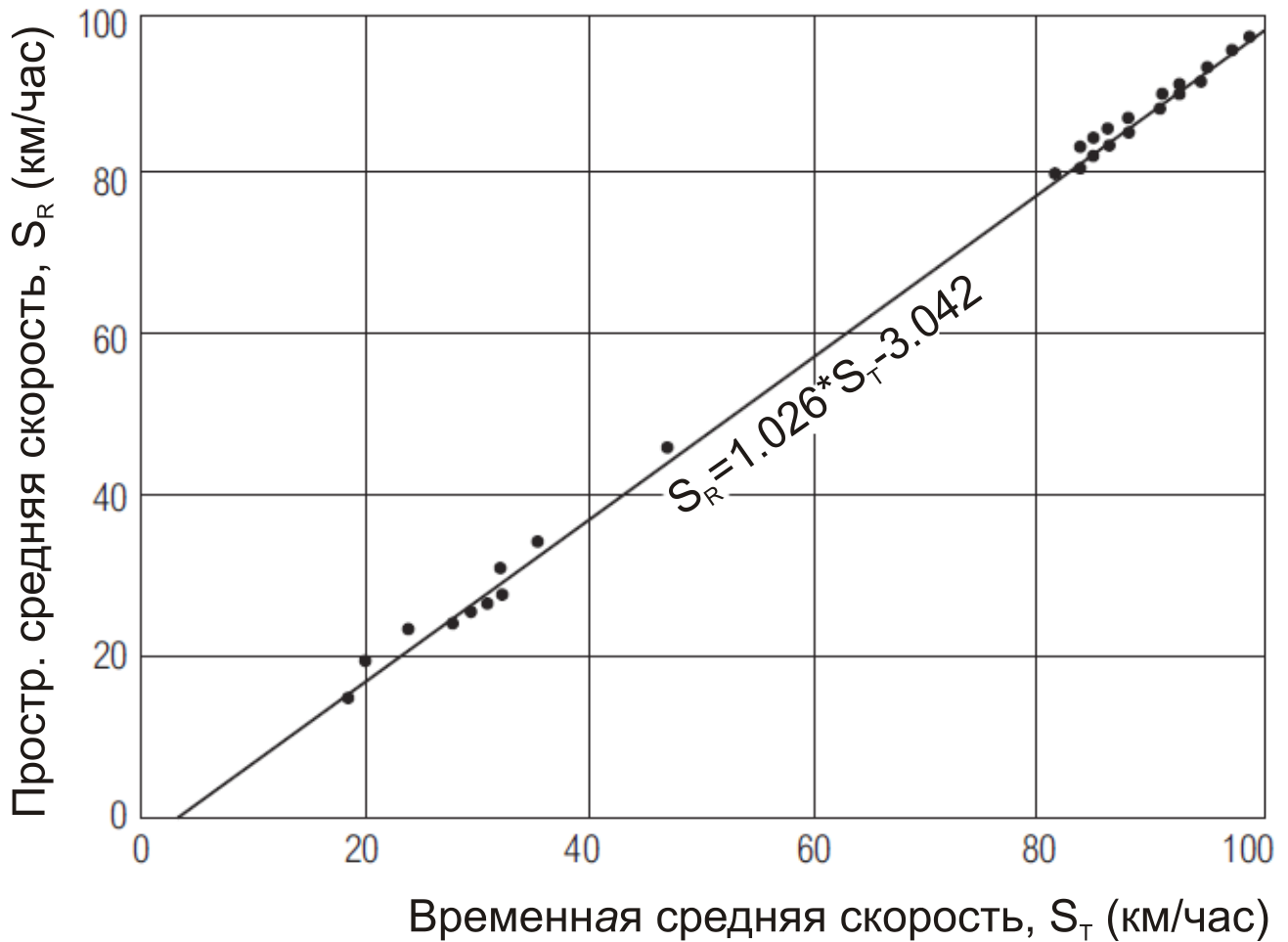
К транспортному потоку применимо несколько различных параметров скорости, перечисленных ниже.

- Средняя скорость движения — мера потока трафика, основанная на наблюдаемых значениях времени проезда автомобилей через секцию магистралю известной длины и вычисляемая как частное от деления длины сегмента на среднее время движения автомобилей через сегмент. Время движения включает только моменты, когда автомобили пребывают в движении.
- Средняя скорость проезда — мера потока трафика, основанная на наблюдаемых значениях времени проезда автомобилей через секцию магистралю известной длины и вычисляемая как частное от деления длины сегмента на среднее время проезда автомобилей через сегмент, которое включает все интервалы задержки из-за остановок. Это также и пространственная средняя скорость.
- Пространственная средняя скорость — статистический термин, обозначающий среднюю скорость, основанную на среднем времени проезда автомобилей через сегмент дороги. Параметр получил свое название потому, что показатель среднего времени проезда означает усреднение времени, проведенного каждым автомобилем в пределах определенного сегмента дороги, или пространства.
- *Временная* средняя скорость — арифметическое среднее скоростей, наблюдаемых при пересечении автомобилями точки на магистралю; также носит название средней точечной скорости. Значения скоростей автомобилей, проходящих точку, регистрируются и арифметически усредняются.
- Скорость движения без помех — средняя скорость автомобилей в пределах заданного участка дороги, измеренная в условиях низкой нагрузки, когда водители имеют возможность ехать с желаемой для них скоростью, не будучи ограниченными задержками управления.

В большинстве процедур настоящего руководства, использующих скорость в качестве показателя эффективности, средняя скорость проезда является определяемым параметром. Для

участков с непрерывным потоком, не функционирующих с уровнем обслуживания F, средняя скорость проезда равна средней скорости движения.

На рис. 7-1 показана типовая зависимость между временной и пространственной средними скоростями. Пространственная средняя скорость всегда меньше временной средней скорости, но их разность уменьшается с ростом их абсолютных значений. Будучи основанной на статистическом анализе данных наблюдений, эта зависимость оказывается полезной благодаря тому, что временные средние скорости часто проще измерять в полевых условиях, нежели пространственные средние скорости.



Примечания. Источник: [1].

**Рис. 7-1. Типовая взаимосвязь между пространственной и временной средними скоростями**

На основе данных о скоростях отдельных транспортных средств возможно вычислить как временную, так и пространственную средние скорости. Пусть, например, скорости трех автомобилей зафиксированы равными 40, 60 и 80 км/час. Время проезда ими 1 километра составляет 1.5, 1.0 и 0.75 минут соответственно. Тогда временная средняя скорость равна  $(40 + 60 + 80)/3 = 60$  км/час, а пространственная средняя скорость составляет  $60 \cdot [3 \div (1.5 + 1.0 + 0.75)] = 55.4$  км/час.

Для целей анализа пропускной способности скорости лучше всего измерять посредством наблюдения за значениями времени проезда сегмента магистрали известной длины. Для

участков дорог с непрерывным потоком и стабильными условиями длина сегмента может выбираться возможно более короткой вплоть до 50–100 м для облегчения наблюдений.

В качестве меры эффективности критерий скорости должен учитывать ожидания водителей и функцию дорожных условий. Например, водитель справедливо надеется на более высокую скорость в пределах автострады по сравнению с городской улицей. Более низкие скорости движения без помех приемлемы для дорог с более сложным горизонтальным/вертикальным профилем, где движение с высокими скоростями менее комфортно для водителей. Эти ожидания отражаются в критерии обслуживания.

### 7-2.3. Плотность

Плотность потока представляет количество автомобилей (или пешеходов), занимающих заданную длину полосы или дороги в определенный момент времени. В контексте настоящего руководства плотность усредняется во времени и обычно выражается количеством автомобилей в расчете на километр (авт./км) либо числом пассажирских автомобилей на километр (ед. пасс. авт./км)

Непосредственное измерение параметра плотности в полевых условиях затруднительно и требует наличия выгодной точки для фотографирования, видеосъемки или наблюдения за значительным пространством магистрали. Плотность можно вычислить, однако, на основе средней скорости проезда и интенсивности потока, которые легче поддаются измерению. Для ненасыщенных условий используется выражение

$$D = \frac{v}{S}, \quad (7-5)$$

где

$v$  — интенсивность потока (авт./час);

$S$  — средняя скорость проезда (км/час);

$D$  — плотность потока (авт./км).

Например, сегмент магистрали с интенсивностью потока 1000 авт./час и средней скоростью проезда 50 км/час обладал бы плотностью потока

$$D = \frac{1000 \text{ авт./час}}{50 \text{ км/час}} = 20 \text{ авт./км.}$$

Плотность является критичным параметром для дорожных участков с непрерывным потоком, поскольку она характеризует качество обслуживания трафика. Плотность описывает относительную взаимную близость автомобилей и отражает свободу маневра в транспортном потоке.

В системах управления в качестве заменителя параметра плотности используется показатель занятости дороги, который легче измерять. Занятость в пространстве есть часть длины дороги, покрытая транспортными средствами, а занятость во времени отражает долю времени, в течение которого поперечное сечение дороги заполнено автомобилями.

### 7-2.4. Интервал и дистанция

Дистанция — это расстояние между последовательными автомобилями в транспортном потоке, измеряемое между аналогичными точками каждого автомобиля (например, между передними бамперами, задними мостами и пр.) Интервал представляет собой время между моментами прохождения двумя последовательными автомобилями определенной точки на полосе или дороге, также измеряемое при совпадении этой точки на дороге с аналогичными точками обоих автомобилей.

Указанные характеристики причисляют к параметрам микроуровня, поскольку они относятся к отдельным парам автомобилей в транспортном потоке. В пределах всего потока дистанция и

интервал отдельных автомобилей распределяются в диапазоне значений, обычно зависящем от скорости потока и доминирующих условий. Будучи агрегированными, параметры относятся к макроскопическим характеристикам плотности и интенсивности потока.

Дистанция есть расстояние, исчисляемое в метрах, которое можно определить непосредственно путем измерения расстояния между одноименными точками последовательных автомобилей в некоторый момент времени. Это обычно требует сложного аэрофотографического оборудования, так что величину дистанции предпочитают выводить из результатов иных прямых измерений. Интервал, напротив, легко измерим с помощью секундомера, фиксирующего моменты пересечения автомобилями некоторой точки на дороге.

Средняя дистанция между автомобилями в потоке непосредственно соотносится с плотностью потока следующим образом:

$$\text{Плотность (авт./км)} = \frac{1000}{\text{Дистанция (м/авт.)}}. \quad (7-6)$$

Зависимость между средней дистанцией и средним интервалом в потоке обуславливается скоростью, как видно из соотношения

$$\text{Интервал (с/авт.)} = \frac{\text{Дистанция (м/авт.)}}{\text{Скорость (м/с)}}. \quad (7-7)$$

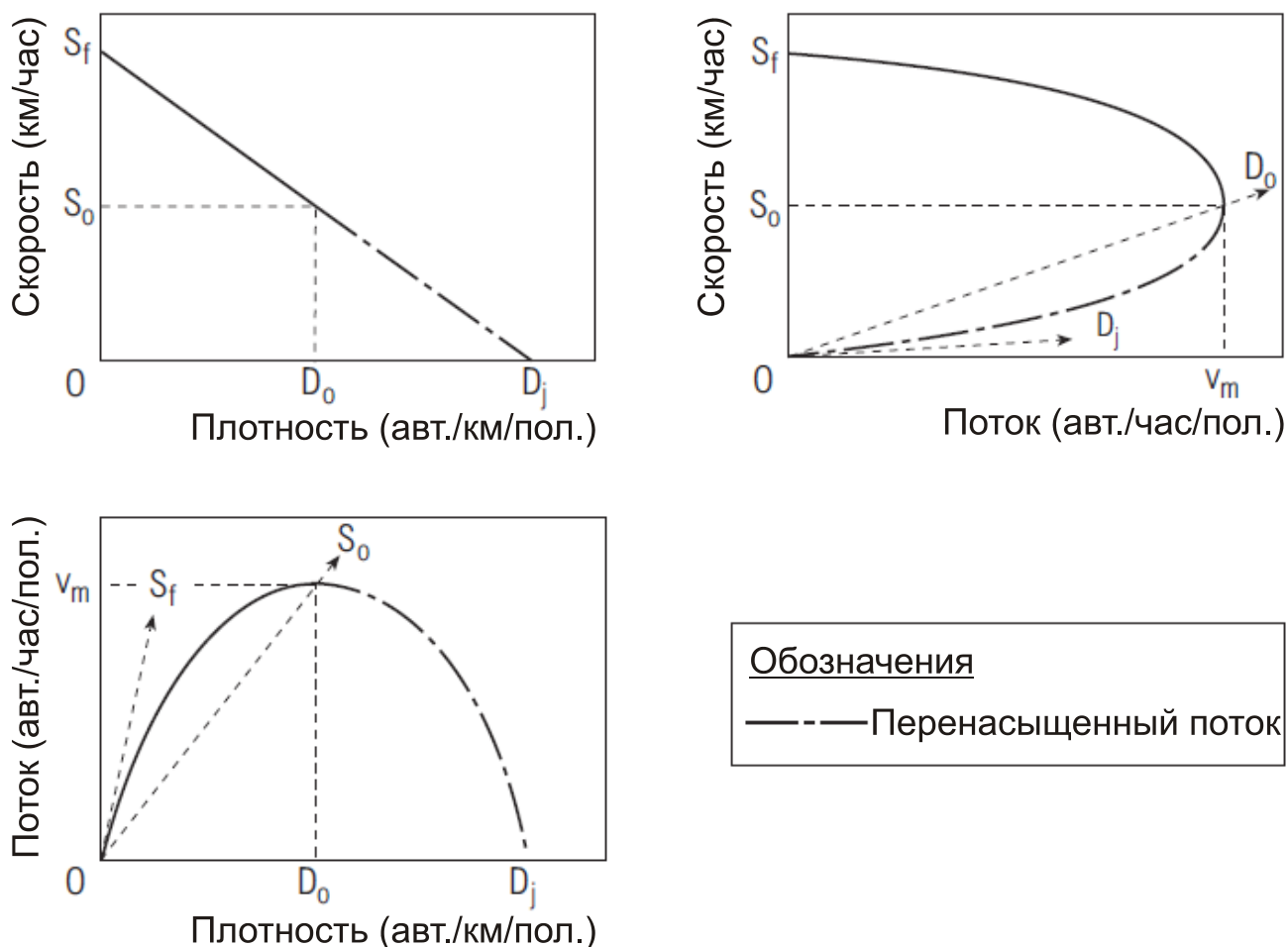
Последнее справедливо и в отношении отдельных значений интервала и дистанции для конкретных пар автомобилей. Под скоростью здесь понимается скорость второго (ведомого) автомобиля в паре. Наконец, интенсивность потока связана со средним интервалом как

$$\text{Интенсивность потока (авт./час)} = \frac{3600}{\text{Интервал (с/авт.)}}. \quad (7-8)$$

### **7-2.5. Соотношения между базовыми параметрами**

Уравнение (7-5) воспроизводит базовое соотношение между тремя параметрами, описывающими непрерывный транспортный поток. Хотя выражение  $v = S \cdot D$  алгебраически допускает существование бесконечного количества комбинаций скорости и плотности, отвечающих заданной интенсивности потока, имеются дополнительные соотношения, ограничивающие разнообразие условий потока в конкретном пункте дороги.

Рис. 7-2 демонстрирует обобщенное представление упомянутых соотношений, являющихся основой для анализа пропускной способности дорожных участков с непрерывным потоком. График функции *поток–плотность* располагается непосредственно под графиком *скорость–плотность*, поскольку оба обладают одинаковой горизонтальной осью, а график функции *скорость–поток* размещен справа от графика *скорость–плотность*, ибо оба содержат общую вертикальную ось. Здесь под скоростью подразумевается пространственная средняя скорость.



Примечания. Источник: [2].

**Рис. 7-2. Обобщенные зависимости между скоростью, плотностью и интенсивностью непрерывного потока**

Форма кривых зависит от доминирующих условий трафика и дороги на исследуемом участке, а также от длины последнего (при определении плотности). Хотя кривые на рис. 7-2 непрерывны, маловероятно, чтобы в произвольной позиции существовали все функции. По данным исследований функции иногда прерываются разрывы [2].

Рис. 7-2 иллюстрирует несколько важных положений. Во-первых, нулевая интенсивность потока возникает при двух различных условиях. Первое имеет место, когда на участке дороги транспорт отсутствует — плотность равна нулю и интенсивность потока также оказывается нулевой. Скорость для такого условия носит теоретический характер и могла бы быть выбрана (по-видимому, высокой) первым появившимся водителем. На графиках эта скорость представляется значением  $S_f$ . Второе условие отвечает ситуации, когда плотность становится столь высокой, что все автомобили вынуждены остановиться — скорость равна нулю и интенсивность также равна нулю, поскольку движение отсутствует и автомобили не в состоянии пересечь точку на дороге. Плотность потока, в котором весь транспорт остановлен, называют предельной плотностью и обозначают как  $D_j$ .

Динамика потока в пределах между этими экстремальными точками демонстрирует эффект максимизации. По мере роста интенсивности потока от нуля плотность также возрастает, поскольку на дороге появляется большее число автомобилей. При этом из-за взаимовлияния



автомобилей их скорость падает. Уменьшение скорости незаметно при низких и средних уровнях плотности и интенсивности. При возрастании плотности, как показывают обобщенные кривые на рис. 7-2, скорость значительно уменьшается прежде, чем будет достигнут уровень пропускной способности. Последнее происходит, когда произведение плотности и скорости находит выражение в максимальной интенсивности потока. Это условие отображено как оптимальная скорость  $S_o$  (часто называемая критической скоростью), оптимальная плотность  $D_o$  (нередко упоминаемая как критическая плотность) и максимальная интенсивность потока  $v_m$ .

Наклон луча, исходящего из начала кривой *скорость–поток*, представляет величину, обратную плотности в смысле выражения (7-5). Аналогичный луч на графике *поток–плотность* представляет скорость. В качестве примеров рис. 7-2 демонстрирует среднюю скорость движения без помех и скорость при достижении пропускной способности, а также оптимальную и предельную плотности. Одновременное отображение трех диаграмм избыточно, поскольку при одной известной зависимости две другие определяются однозначно. Функция *скорость–плотность* используется, большей частью, в теоретических выкладках; две другие применяются в настоящем руководстве при определении уровня обслуживания.

Как показано на рис. 7-2, любая интенсивность потока, отличная от уровня пропускной способности, может достигаться при двух различных условиях, одно из которых связано с высокой скоростью и низкой плотностью, а второе — с высокой плотностью и низкой скоростью. Та часть кривой, которая относится к высокой плотности и низкой скорости, представляет перенасыщенный поток. В состоянии трафика (скорости, плотности и интенсивности потока) возможны непредвиденные изменения. Уровни обслуживания от А до Е определяются для части кривой, отвечающей низкой плотности и высокой скорости с границей максимальной интенсивности потока в виде уровня обслуживания Е при достижении значения пропускной способности; уровень обслуживания F, напротив, описывает перенасыщенный поток с трафиком рассеяния очередей, представляемый той частью кривой, которая соответствует условиям высокой плотности и низкой скорости.

### 7-3. Прерываемые потоки

Прерываемый поток имеет более сложную природу, нежели непрерывный, ввиду фактора времени, затрачиваемого на распределение пространства для конфликтующих транспортных потоков.<sup>2</sup> На участке с прерываемым потоком последний обычно регулируется фиксированными пунктами управления наподобие светофоров и знаков *Stop*. Эти управляющие средства оказывают различное влияние на поток в целом.

Функциональное состояние трафика на участках дорог с прерываемым потоком определяется параметрами, перечисленными ниже:

- нагрузка и интенсивность потока;
- интенсивность потока насыщения и интервал отправления;
- управляющие переменные (признаки использования светофоров или знаков *Stop*);
- параметры просветов в конфликтующих потоках;
- задержка.

Суждения относительно нагрузки и интенсивности потока, приведенные в одном из начальных разделов этой главы, применимы также к участкам дорог с прерыванием потока. Важный дополнительный фактор связан с уровнем детализации при сканировании нагрузки или интенсивности потока. Традиционные счетчики трафика на перекрестках учитывают только количество исходящих автомобилей. Максимальная интенсивность потока, таким образом,

<sup>2</sup> К базовым параметрам участков дорог с прерываемым потоком относятся: тип системы управления перекрестком, интенсивность потока насыщения, потери времени и характеристики очередей.

ограничивается пропускной способностью участка. Когда запрос превышает пропускную способность и очередь растет, разумно наблюдать за трафиком выше по потоку, до места образования затора.

### **7-3.1. Управление с помощью светофоров**

Наиболее существенным источником фиксированных прерываний потока служит светофор. Светофоры периодически останавливают поток в каждом направлении или на множестве направлений. Направление движения в виде заданного набора полос действует, вероятно, только в течение некоторого промежутка времени общего цикла, поскольку светофор периодически запрещает движение по направлению. Для движения доступен только период времени эффективного зеленого сигнала светофора. Например, если одному подмножеству полос на регулируемом перекрестке отводится 30 секунд времени эффективного зеленого сигнала из 90 секунд длительности всего цикла, тогда для движения по этим полосам доступна только 1/3 часть общего времени. Таким образом, поток по полосам может двигаться только 20 минут на протяжении каждого часа. Если полосы могли бы обслужить поток с максимальной интенсивностью, равной 1500 авт./час, при зеленом сигнале, генерируемом в продолжение полного часа, в реальности они смогут справиться с потоком интенсивности 500 авт./час, так как только треть часа доступна для движения.

Поскольку расписания сигналов подвержены изменениям, удобно выражать значения пропускной способности и интенсивности потока в контексте обслуживания в терминах числа автомобилей в час (авт./час). В предыдущем примере максимальная интенсивность потока была принята равной 1500 авт./час. Эту величину можно преобразовать в значение реального времени путем умножения на отношение длительности эффективного зеленого сигнала к продолжительности цикла светофора.

Заслуживает внимания рассмотрение динамики начала движения автомобилей, стоящих в очереди, при включении зеленого сигнала светофора. На рис. 7-3 показана очередь автомобилей, остановившихся перед светофором. Когда генерируется зеленый сигнал, очередь приходит в движение. Интервал между автомобилями можно наблюдать в момент пересечения ими стоп-линии на перекрестке. Первым интервалом следует считать время в секундах от момента инициирования зеленого сигнала до момента пересечения стоп-линии передними колесами автомобиля, находящегося в голове очереди. Второй интервал равен разности моментов пересечения стоп-линии передними колесами второго и первого автомобилей. Последующие интервалы измеряются аналогично.



**Рис. 7-3. Условия прерывания трафика на полосе подъезда к регулируемому перекрестку**

Водитель автомобиля в голове очереди должен заметить момент изменения сигнала светофора на зеленый и отреагировать освобождением тормоза и нажатием педали газа для проезда через перекресток. В результате первый интервал окажется относительно долгим. Второй автомобиль в очереди выполняет те же действия, однако периоды реакции на изменение сигнала и ускорения могут протекать одновременно с началом движения первого автомобиля. При пересечении стоп-линии второй автомобиль будет двигаться быстрее первого, поскольку обладает большей длиной разгона. Интервал следования второго автомобиля также уменьшится. Третий и четвертый автомобили выполняют аналогичную процедуру, и каждый достигает несколько меньшего интервала по сравнению с предшественником. После начала движения четвертого автомобиля влияние времени реакции и ускорения становится пренебрежимо малым. Последующие автомобили — вплоть до того, который замыкает исходную очередь, — пересекают стоп-линию на стабильной скорости. Их интервал остается относительно постоянным.

На рис. 7-3 постоянный средний интервал, обозначенный как  $h$ , достигается после проезда четырех автомобилей. Интервалы следования первых четырех автомобилей в среднем превышают  $h$  и выражаются как  $h + t_i$ , где  $t_i$  — приращение интервала  $i$ -го автомобиля из-за влияния времени реакции и ускорения. По мере роста  $i$  от 1 до 4 значения  $t_i$  уменьшаются.

На рис. 7-4 показана концептуальная диаграмма интервалов. В настоящем руководстве принято (из практических соображений), что пятый автомобиль, следующий с момента включения зеленого сигнала, трактуется как исходная точка в измерениях условий насыщения.

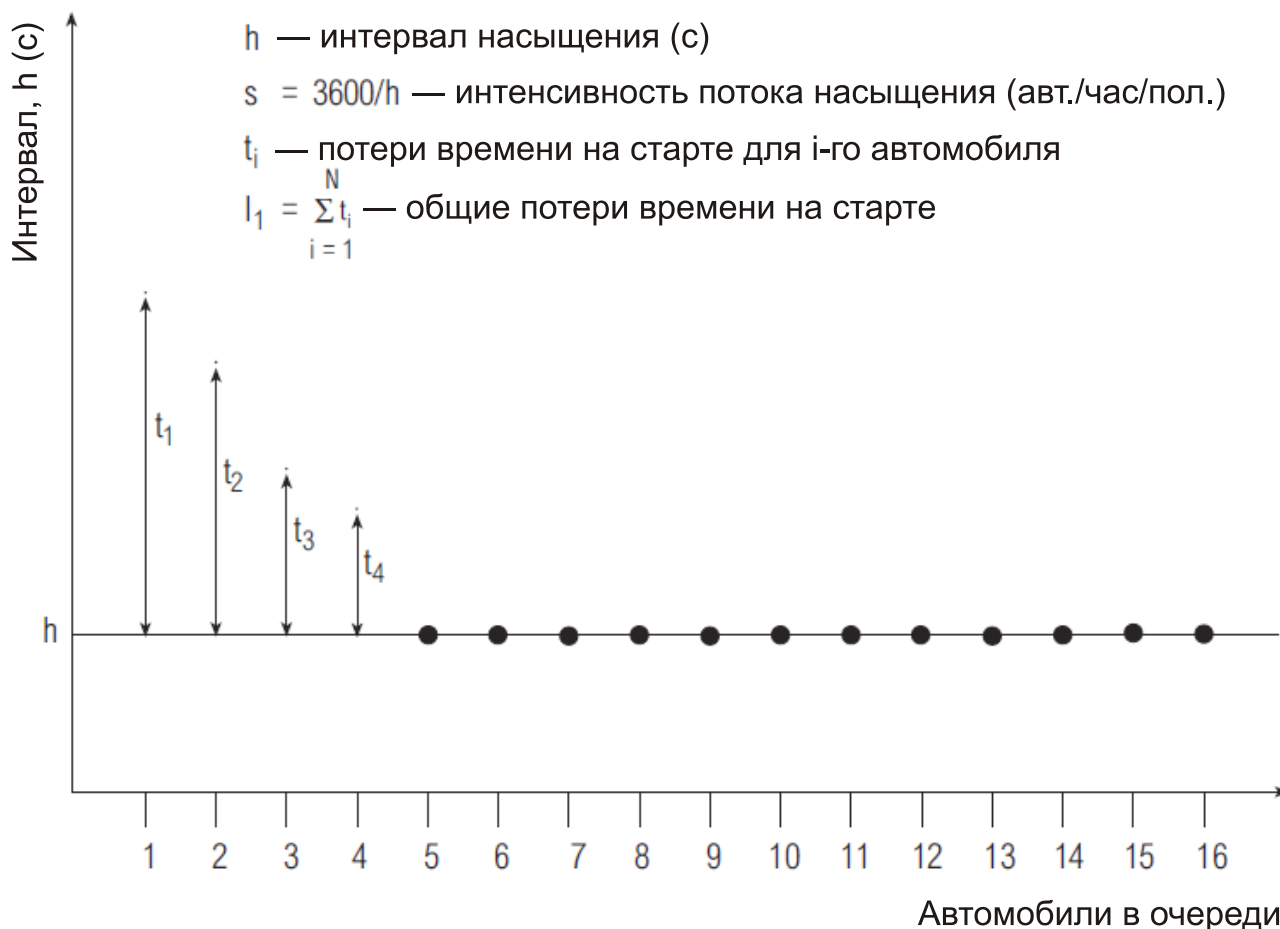


Рис. 7-4. Понятия потока насыщения и потерь времени

Значение  $h$  представляет интервал насыщения, оцениваемый как постоянный средний интервал между транспортными средствами, начиная с пятого автомобиля, выезжающего из очереди, и заканчивая последним автомобилем, который находился в очереди к моменту включения зеленого сигнала и пересек перекресток. Интервал насыщения есть количество времени, затрачиваемое автомобилем, находящимся в стоящей очереди, на проезд через перекресток на зеленый сигнал светофора в предположении, что существует непрерывная очередь автомобилей, направляющихся через перекресток.

Определения интервала насыщения, принятые в настоящем руководстве для участков дорог с непрерывным и прерываемым потоками, различаются. Для непрерывного потока интервал представляет время между моментами прохождения передних осей последовательно движущихся автомобилей через заданное поперечное сечение дороги; для участков с прерываемым потоком, напротив, точками идентификации автомобилей служат их передние бамперы.

### 7-3.2. Перекрестки со знаками Стоп и Уступи дорогу

Водитель, двигающийся по второстепенной дороге или поворачивающий влево с главной дороги на перекрестке со знаками *Стоп* на двух сторонах, сталкивается со специфической задачей выбора просвета в приоритетном потоке для осуществления необходимого маневра. Термин *просвет* означает пространство между автомобилями на дороге, которое обеспечивает возможность проезда на нерегулируемом перекрестке. Модель ожидания просвета описывает процедуру проезда автомобиля через просвет.

Пропускная способность подъезда со стороны второстепенной дороги зависит от двух факторов:

- распределения доступных просветов по потоку на главной дороге;
- размера просвета, который требуется автомобилю, следующему со второстепенной дороги, для выполнения необходимого ему маневра.

Распределение доступных просветов по потоку на главной дороге зависит от общей нагрузки, ее распределения по направлениям, количества полос на главной дороге и степени и типа группирования транспорта в потоке. Размер просвета, который требуется автомобилю со второстепенной дороги, зависит от типа маневра (поворота влево, движения прямо или поворота вправо), количества полос на главной дороге, скорости движения по ней, расстояний видимости, длительности периода времени ожидания автомобилем на второстепенной дороге и характеристик водителя (остроты зрения, времени реакции, возраста и пр.). Критический просвет есть минимальный временной интервал между моментами пересечения точки на главной дороге передними бамперами двух последовательно движущихся автомобилей, позволяющий влиться в поток одному транспортному средству со второстепенной дороги. Когда одним просветом на главной дороге пользуется несколько автомобилей со второстепенной дороги, временной интервал между последними называют временем следования. Вообще говоря, время следования короче критического просвета. Участки с круговым движением функционируют подобно перекресткам со знаками *Stop* на двух сторонах, однако на таких участках водители, осуществляющие въезд, следят только за одним — круговым — потоком, ожидая появления приемлемого просвета.

На перекрестках со знаками *Stop* на всех сторонах все водители обязаны полностью остановиться, прежде чем продолжить движение. Решение о возможности продолжения движения основывается на признаке право- или левостороннего движения (в первом случае право приоритетного проезда имеет водитель справа), а также на информации о дорожных условиях на других подъездах к перекрестку. Интервал отправления для рассматриваемого подъезда определяется как время между моментами отправления двух последовательно движущихся автомобилей. Интервал отправления трактуется как интервал насыщения, если второй автомобиль останавливается позади первого перед стоп-линией. Если поток существует только с одного подъезда, автомобили могут отправляться настолько быстро, насколько водители способны безопасно ускорить движение и пересечь перекресток. Если трафик имеет место и на направлениях с других подъездов, интервал насыщения на рассматриваемом подъезде возрастает в зависимости от степени конфликтности направлений.

Как и на регулируемых перекрестках, передние оси двух последовательно движущихся автомобилей служат точками идентификации последних при определении интервалов насыщения для транспорта, отправляющегося от стоп-линии на подъезде к перекрестку со знаками *Stop* на двух или всех сторонах. При измерении интенсивности потока свободного движения по главной дороге на перекрестке со знаками *Stop* на двух сторонах точками идентификации автомобилей обычно служат их передние бамперы.

### **7-3.3. Скорость**

Для участков с прерыванием потока основным эксплуатационным критерием служит задержка, а не скорость. Однако значения скорости для непрерывных потоков оказываются полезными при определении дополнительного времени проезда из-за торможения, перемещения в пределах очередей и ускорения автомобилей при проезде через перекресток.

### **7-3.4. Задержка**

Задержка служит решающим показателем эффективности функционирования участков с прерыванием потока. Существует несколько типов задержки, однако в контексте настоящего

руководства задержка управления является основным критерием обслуживания при оценке уровня обслуживания для регулируемых и нерегулируемых перекрестков. Хотя определение задержки управления одинаково для регулируемых и нерегулируемых перекрестков, применение этих параметров, включая пороговые значения уровня обслуживания, различается.

Задержка управления охватывает движение с малыми скоростями и остановки на подъездах к перекрестку, когда автомобили подвигаются в очереди или замедляют ход выше перекрестка. Водители часто снижают скорость, видя красный сигнал очередного светофора или очередь на подъезде к перекрестку. Задержка управления требует определения реальной средней скорости движения по каждому сегменту дороги. Любая оценка средней скорости проезда по городской улице подразумевает влияние задержки управления.

На перекрестках со знаками *Стоп* на двух или всех сторонах задержка управления представляет собой общее время, прошедшее с момента попадания автомобиля в очередь и до момента отравления из состояния остановки в голове очереди. Задержка управления также включает время, требуемое для торможения до остановки и ускорения до достижения скорости движения без помех.

### 7-3.5. Интенсивность потока насыщения и потери времени

Интенсивность потока насыщения определяется как интенсивность потока (в расчете на полосу), при которой автомобили способны пересечь регулируемый перекресток, и вычисляется по формуле

$$s = \frac{3600}{h}, \quad (7-9)$$

где

$s$  — интенсивность потока насыщения (авт./час/пол.);

$h$  — интервал насыщения (с).

Интенсивность потока насыщения представляет число автомобилей в час в расчете на полосу, которые могли бы пересечь регулируемый перекресток при условиях, что зеленый сигнал доступен в течение полного часа, поток никогда не прерывается и не существует долгих интервалов.

Каждый раз, когда поток останавливается, он должен стартовать вновь, и первые четыре автомобиля в очереди испытывают влияние параметров времени реакции и ускорения, проиллюстрированных на рис. 7-3. Как было показано, первые четыре автомобиля в очереди отличаются значениями интервала, превышающими интервал насыщения,  $h$ . Значения приращений,  $t_i$ , называют потерями времени на старте. Общие потери времени на старте исчисляются в виде суммы приращений:

$$l_1 = \sum_{i=1}^N t_i, \quad (7-10)$$

где

$l_1$  — общие потери времени на старте (с);

$t_i$  — потери времени на старте для  $i$ -го автомобиля (с);

$N$  — порядковый номер последнего автомобиля в очереди.

Другим источником потерь времени служит любая остановка потока. Когда один поток прерывает движение, соображения безопасности требуют наличия некоторого промежутка времени общего бездействия перед тем, как конфликтующему потоку будет позволено въехать на перекресток. Подобный промежуток полного отсутствия транспорта на перекрестке называют потерями времени при очистке перекрестка,  $l_2$ .

На практике в рамках цикла сигналов для очистки перекрестка предусмотрены интервалы изменения, включающие периоды желтого, общего красного или обоих сигналов. В общем случае водители не могут наблюдать подобный интервал полностью, но имеют возможность пользоваться перекрестком в течение некоторой доли интервала. Потери времени при очистке перекрестка,  $l_2$ , являются долей интервала изменения, не используемой водителями.

Соотношение между интенсивностью потока насыщения и значениями потерь времени весьма важно. На любой полосе или направлении движения автомобиля используют перекресток с интенсивностью потока насыщения в течение периода, равного сумме доступного времени зеленого сигнала и интервала изменения за вычетом потерь времени на старте и при очистке перекрестка. Поскольку потери времени возникают при каждом старте и остановке, общее значение потерь на протяжении часа связано с расписанием сигналов. Например, при 60-секундном цикле работы светофора тот будет начинать и прерывать движение в каждом направлении 60 раз в час, и тогда общие потери времени для каждого направления составят  $60 \cdot (l_1 + l_2)$ .

Потери времени влияют на пропускную способность и задержки. Может показаться, что с ростом длительности цикла пропускная способность перекрестка стала бы увеличиваться. Но это до некоторой степени компенсируется тем обстоятельством, что интервал насыщения,  $h$ , может возрасти с увеличением длительности непрерывного зеленого сигнала. Другие компоненты перекрестка, подобные полосам поворота, также способны возмещать снижение пропускной способности из-за краткости цикла. Использование более продолжительных циклов приводит к увеличению числа автомобилей в очереди и способно повлечь переполнение полосы левого поворота с сокращением пропускной способности ввиду блокирования полос прямого направления.

По мере увеличения длительности цикла задержка управления в расчете на автомобиль также подвержена росту (в предположении об адекватном уровне пропускной способности). Задержка, однако, является составной функцией многих других переменных помимо длительности цикла.

### **7-3.6. Образование очередей**

Когда запрос на трафик превышает пропускную способность подъезда к регулируемому перекрестку в начале периода эффективного зеленого сигнала, образуются очереди [2]. Из-за прибытия автомобилей в продолжение фазы красного некоторые из них могут не успеть пересечь перекресток в течение рассматриваемой фазы зеленого сигнала. Очередь формируется также, когда прибывающий транспорт вынужден ожидать обслуживания — возникновения приемлемого просвета в потоке на главной дороге, приема оплаты за проезд или парковку и пр. Автомобиль в хвосте очереди определяет количество транспортных средств в очереди на подъезде к регулируемому перекрестку, образуемой из-за чрезмерной интенсивности прибывающего потока или невозможности пересечения перекрестка автомобилями в течение периода зеленого сигнала (т.е. переполнения). В большинстве случаев теория очередей подразумевает наличие ненасыщенных условий.

Для математического прогнозирования характеристик очередей необходимо задать следующие параметры системы [3]:

- характеристики типа прибытия, включая среднюю интенсивность прибытия и статистическое распределение времени между моментами прибытия;
- характеристики обслуживания, в том числе средние значения темпа обслуживания и распределение и количество пользователей, которые могут быть обслужены одновременно, либо число доступных каналов обслуживания;

- параметры дисциплины обслуживания, подобные способу выбора очередного пользователя, подлежащего обслуживанию.

В перенасыщенных очередях интенсивность прибытия выше темпа обслуживания; в очередях же, возникающих в ненасыщенных условиях, интенсивность прибытия ниже темпа обслуживания. Длина "ненасыщенной" очереди способна варьироваться, но с прибытием автомобилей достигает стабильного состояния. Длина перенасыщенной очереди, напротив, никогда не достигает стабильного состояния и с прибытием автомобилей возрастает.

Очередь перед регулируемым перекрестком, отвечающая ненасыщенным условиям, проиллюстрирована на рис. 7-5 [2]. Подразумевается формирование очереди на одном подъезде с двумя фазами сигналов. В каждом цикле запрос на прибытие оказывается меньше пропускной способности подъезда: ни один автомобиль не ждет дольше одного цикла, и поэтому переполнение от одного цикла к следующему отсутствует. На рис. 7-5, *a* указана интенсивность прибытия,  $v$ , выраженная числом автомобилей в час и являющаяся постоянной в течение всего периода наблюдений. Переменная  $s$ , представляющая темп обслуживания, обладает двумя состояниями: нулевым, когда активен эффективный красный сигнал, и приближающимся к интенсивности потока насыщения при эффективном зеленом сигнале. Заметим, что темп обслуживания совпадает с интенсивностью потока насыщения только при наличии очереди.

На рис. 7-5, *b* показана диаграмма совокупного прохождения автомобилей с течением времени. Горизонтальная прямая функции  $v$  на рис. 7-5, *a* становится наклонной (показанной в виде сплошной линии) на рис. 7-5, *b* с углом, отвечающим интенсивности прибытия. Перенос темпа обслуживания с рис. 7-5, *a* в рис. 7-5, *b* приводит к изменению графика. В течение периода красного сигнала темп обслуживания равен нулю (см. горизонтальные участки нижней — штриховой — кривой на рис. 7-5, *b*). В начале периода зеленого наличествует очередь, и темп обслуживания равен интенсивности потока насыщения. Это приводит к формированию последовательности треугольников, где верхняя (сплошная) сторона представляет функцию прибытия, а две другие (штриховые) — функцию обслуживания (отправления).

Каждый треугольник на рис. 7-5, *b*, представляющий один цикл, можно проанализировать для вычисления продолжительности существования очереди — с момента начала периода красного до момента ее полного рассеяния. Эта величина варьируется между временем эффективного красного и длительностью цикла:

$$v \cdot t_Q = s \cdot (t_Q - r), \text{ или } t_Q = \frac{s \cdot r}{s - v}, \quad (7-11)$$

где

- $t_Q$  — продолжительность существования очереди (с);
- $v$  — средняя интенсивность прибытия (авт./час);
- $s$  — средний темп обслуживания (авт./час);
- $r$  — время эффективного красного сигнала (с).



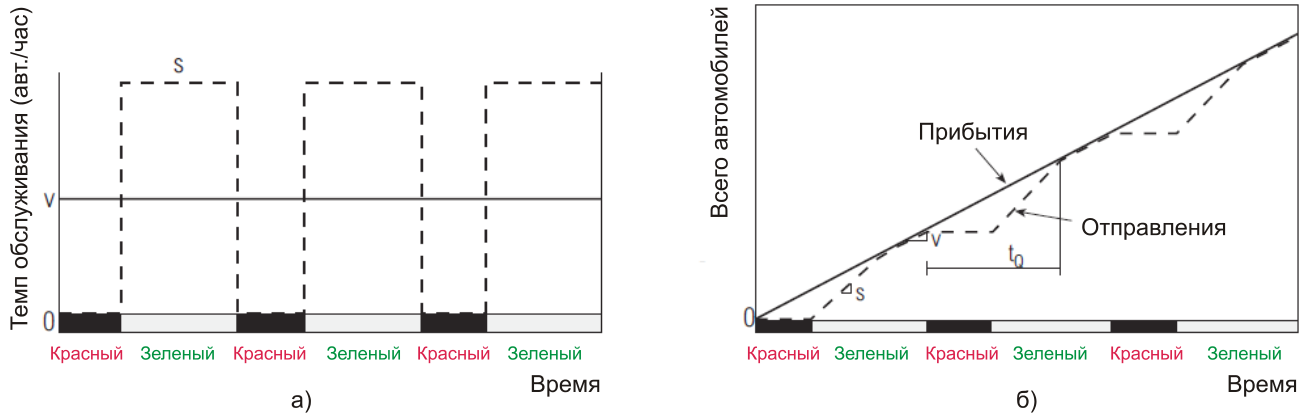


Рис. 7-5. Диаграммы образования очередей перед регулируемым перекрестком

Длина очереди представляется вертикальной высотой треугольника. В начале периода красного сигнала длина очереди равна нулю и далее возрастает до максимума в конце периода красного. Затем длина очереди уменьшается, пока линия прибытий не пересечет линию обслуживания, и становится равной нулю. Из рис. 7-5 можно получить три значения длин очереди — максимальное, среднее при наличии очереди и общее среднее, — которые вычисляются по следующим формулам:

$$Q_M = \frac{v \cdot r}{3600}, \quad (7-12)$$

$$Q_Q = \frac{v \cdot r}{7200}, \quad (7-13)$$

$$Q = \frac{Q_M \cdot t_Q}{2 \cdot C}, \quad (7-14)$$

где

$Q_M$  — максимальная длина очереди (авт.);

$Q_Q$  — средняя длина очереди при ее наличии (авт.);

$Q$  — общая средняя длина очереди (авт.);

$v$  — средняя интенсивность прибытия (авт./час);

$r$  — время эффективного красного сигнала (с);

$C$  — длина цикла (с);

$t_Q$  — продолжительность существования очереди (с).

Характеристики процесса образования очереди можно моделировать путем варьирования параметрами интенсивности прибытия, темпа обслуживания и расписания сигналов. В реальных ситуациях значения интенсивности прибытия и темпа обслуживания непрерывно изменяются. Эти вариации усложняют модель, однако базовые соотношения сохраняются. Длину очереди можно оценить для целей планирования, приняв значение плотности в накопителе (средней плотности автомобилей в очереди) и затем используя следующее соотношение [4] (справедливое, заметим, только при превышении запроса на трафик над пропускной способностью):

$$QL = \frac{T \cdot (v - c)}{N \cdot d_s}, \quad (7-15)$$

где

$QL$  — длина очереди (км);

$T$  — продолжительность периода анализа (час);

- $v$  — запрос на трафик (авт./час);  
 $c$  — пропускная способность (авт./час);  
 $N$  — количество полос;  
 $d_s$  — плотность в накопителе (авт./км/пол.).

## 7-4. Литература

1. Drake, J. S., J. L. Schofer, and A. D. May, Jr. *A Statistical Analysis of Speed-Density Hypotheses*. In *Highway Research Record 154*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1967, pp. 53–87.
2. May, A. D., Jr. *Traffic Flow Fundamentals*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1990.
3. Gerlough, D., and M. Huber. *Special Report 165: Traffic Flow Theory, A Monograph*. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1975.
4. Dowling, R. G., W. Kittelson, J. Zegeer, and A. Skabardonis. *NCHRP Report 387: Planning Techniques to Estimate Speeds and Service Volumes for Planning Applications*. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1997.