

## ИДЕАЛЬНЫЙ ПОТОК НАСЫЩЕНИЯ НА РЕГУЛИРУЕМОМ ПЕРЕСЕЧЕНИИ

А.Г. Левашев, И.М. Головных  
(Иркутский государственный технический университет)  
E-mail: [alexey.levashev@mail.ru](mailto:alexey.levashev@mail.ru)  
[road@istu.irk.ru](mailto:road@istu.irk.ru)

Одним из основных расчетных параметров транспортного потока, используемых в современной зарубежной литературе при проектировании режимов регулирования, является идеальный поток насыщения, под которым понимается поток насыщения, достигающийся при идеальных условиях движения.

В свою очередь под потоком насыщения понимается средняя установившаяся интенсивность разъезда очереди транспортных средств на регулируемом пересечении (достигается после 4 – 6-го автомобилей в очереди) при условиях, что автомобили не испытывают потеряннного времени, а также зеленое время является бесконечным.

Например, в американском руководстве по пропускной способности дорог (HCM 2000) для определения действительного потока насыщения используется следующая формула [1]:

$$S = S_0 \cdot f_w \cdot f_g \cdot f_{HV} \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_{LU} \cdot f_a \cdot f_{LT} \cdot f_{RT} \cdot f_{Lpb} \cdot f_{Rpb}, \quad (1)$$

где  $S_0$  – интенсивность идеального потока насыщения, принятая равной 1900 прив.ед./ч;  $N$  – количество полос движения;  $f_w$  – коэффициент, учитывающий ширину полосы движения;  $f_g$  – коэффициент, учитывающий продольные уклоны;  $f_{HV}$  – коэффициент, учитывающий наличие грузовых автомобилей;  $f_p$  – коэффициент, учитывающий паркирование;  $f_{bb}$  – коэффициент, учитывающий помехи, создаваемые автобусами;  $f_a$  – коэффициент, учитывающий тип территории;  $f_{RT}, f_{LT}$  – коэффициент, учитывающий повороты направо и налево;  $f_{Rpb}, f_{Lpb}$  – влияние велосипедистов и пешеходов соответственно на право- и левоповоротное движение;  $f_{LU}$  – равномерность использования полос движения.

В целом определение величины идеального потока насыщения сводится к измерению потока насыщения при идеальных условиях, которые имеют место, когда:

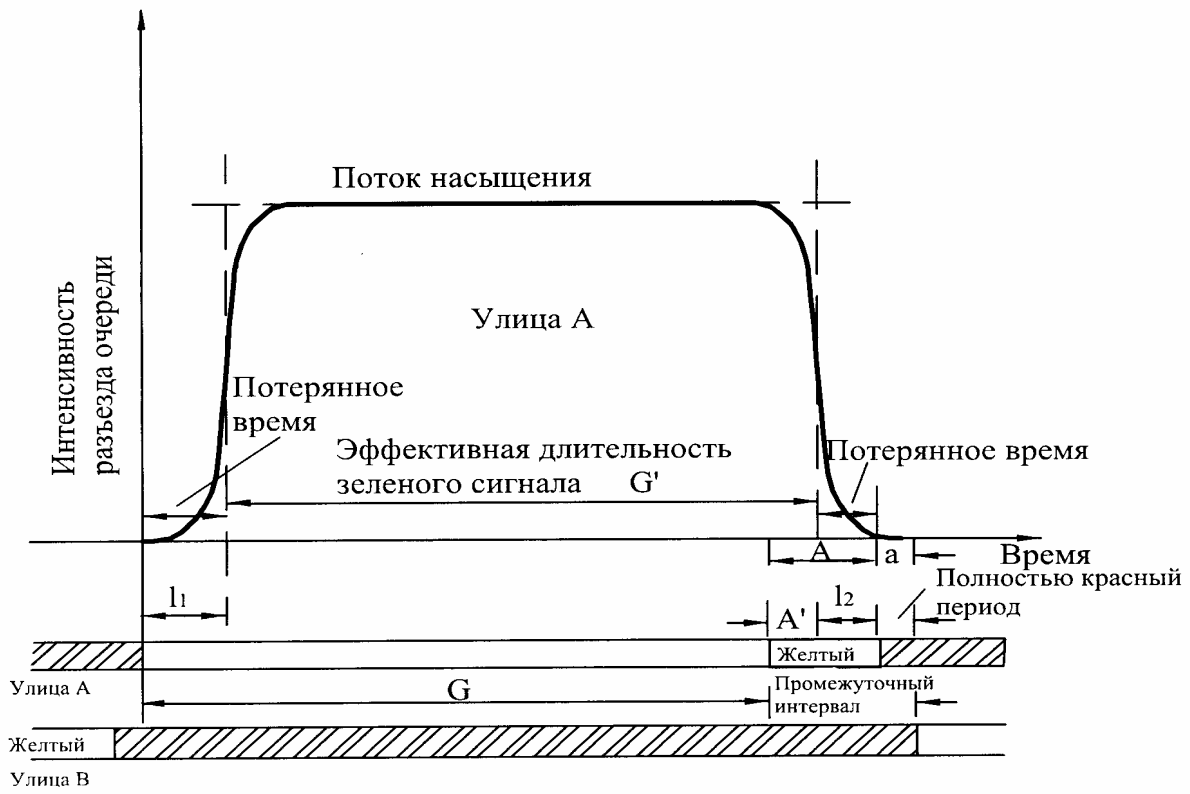
- очередь транспортных средств состоит только из легковых автомобилей;
- уклон на подходе к перекрестку равен 0%;
- ширина полосы движения 3,6 м;
- сухое дорожное покрытие;
- отсутствие помех, создаваемых паркующимися автомобилями и остановками общественного транспорта [1].

В настоящий момент в профессиональной зарубежной литературе можно ознакомиться с рядом различных методик определения величины потока насыщения. Рассмотрим, например, методику, предложенную Ф. Вебстером, являющимся основоположником в области проектирования режимов регулирования [5].

Изучения процесса разъезда транспортных средств на перекрестке показали, что после включения зеленого сигнала автомобилям требуется определенное время для того, чтобы тронуться с места и развить нормальную скорость движения. Но после нескольких секунд очередь транспортных средств движется с более или менее постоянной интенсивностью, которая и называется потоком насыщения (рис 1).

Поток насыщения достигается, по мнению Вебстера, тогда, когда имеется бесконечная очередь транспортных средств, длительность зеленого сигнала для которой равна 100% времени цикла регулирования. Из рис.1 можно увидеть, что средняя интенсив-

ность движения меньше величины потока насыщения в течение нескольких первых секунд (автомобилям требуется время для разгона до нормальной скорости движения), а также в течение желтого сигнала (некоторые водители решают остановиться, в то время, как другие водители продолжают движение). При этом удобно заменить действительные длительности зеленого и желтого сигнала на “эффективную длительность зеленого сигнала”, в течение которой предполагается движение транспортных средств с интенсивностью потока насыщения, и на “потерянное” время, в течение которого предполагается отсутствие всякого движения.



$G$  - Действительная длительность зеленого сигнала

Рис. 1. Поток насыщения

Это является полезной концепцией, поскольку пропускная способность в таком случае будет прямо пропорциональна эффективной длительности зеленого сигнала. С графической точки зрения это означает замену кривой (см. рис.1) на прямоугольник равной площади, где высота прямоугольника равна среднему значению потока насыщения, а его основание – эффективной длительности зеленого сигнала.

*Потерянное время* при этом определяется как разница между суммой действительных длительностей зеленого и желтого сигналов и эффективной длительностью зеленого сигнала.

Процедура вычисления потока насыщения, при использовании модели Вебстера сводится к следующему. После обследования полосы движения или целого подход к перекрестку (если возможно) с использованием секундомера, измеренное число транспортных средств, проехавших стоп-линию с момента включения зеленого сигнала до момента прохождения *переднего бампера*  $n$ -го автомобиля в течение каждого последующего  $b$ -и секундного интервала зеленого и желтого времени преобразуется определенным образом. Рассмотрим данную процедуру вычисления на следующем примере.

Подход к перекрестку регулируется режимом жесткого регулирования. На нем было измерено по 15 каждых насыщенных интервалов по 6 секунд для насыщенного состояния. Следующие результаты были получены (табл. 1).

Таблица 1.

Результаты обследований по методике Ф. Вебстера					
Время (интервал), мин	0 - 0,1	0,1-0,2	0,2 – 0,3	0,3 – 0,4	0,4 – 0,5
Число насыщенных интервалов	15	15	15	15	15
Число автомобилей, проехавших стоп-линию	22	35	30	28	26
Среднее число автомобилей за 6 секунд	1,46	2,33	2,00	1,86	1,73

В конце желтого сигнала остается интервал меньше 6 секунд. Длина этого периода и число транспортных средств, проехавших за этот период стоп-линию необходимо фиксировать. Такие интервалы называют *интервалами последнего насыщения*. Наблюдатель фиксирует следующие данные:

Общая длительность интервалов последнего насыщения = 55 с.

Общее число автомобилей, пересекших стоп-линию = 86 авт.

Среднее число автомобилей, проехавших за 0,1 мин =  $86/55 = 1,56$  авт.

В течение первого и последнего насыщенного интервалов пропускная способность полосы не реализуется, поскольку автомобили затрачивают дополнительное время после включения зеленого сигнала на ускорение, и – на замедление – в течение желтого сигнала. Транспортный поток в течение оставшихся обследованных периодов представляет максимально возможную интенсивность разбеда:

$$\text{Поток насыщения} = \frac{2,33 + 2,00 + 1,86 + 1,73}{4} = 1,98 \text{ автомобилей за } 6 \text{ с} = 1188 \text{ авт./ч.}$$



Рис.2. Иллюстрация определения исследователем последнего автомобиля в очереди, характеризующего момент окончания интенсивности потока насыщения

Еще одной моделью определения потока насыщения является модель, представленная в американском руководстве по пропускной способности дорог (Highway Capacity Manual 1985) [2].

При вычислении потока насыщения на подходе к перекрестку после проведения обследования движущегося на перекрестке транспортного потока с целью измерения промежуточных временных интервалов между транспортными средствами, въезжающими на перекресток необходимо проделать ряд вычислений.

Необходимо отметить, что отличительным элементом данной модели является то, что за фиксируемый момент времени берется не момент времени проезда переднего бампера над стоп-линией (см. описание модели Вебстера), а момент прохождения *задней оси* автомобиля над стоп-линией.

Первый временной интервал рассчитывается как время между включением зеленого сигнала и прохождением задней оси первого стоящего в очереди автомобиля над стоп-линией. Последующие временные интервалы определяются как время между прохождениями задних осей двух следующих друг за другом автомобилей стоп-линии.

Заметьте, что каждая очередь транспортных средств рассматривается отдельно, и поток насыщения определяется отдельно для каждой очереди. При этом общее значение потока насыщения для всего перекрестка определяется как сумма потоков насыщения, рассчитанных для отдельных полос. Вычисления проводятся для данных, полученных при условии полного насыщения, при этом первые три временных интервала не используются в расчете потока насыщения, поскольку считалось, что первые три транспортных средства испытывают стартовые потери времени (связанные с реакцией водителей и временем, которое требуется автомобилю для разгона).

В данной модели определения потока насыщения важным является то, что состояние насыщения на полосе движения заканчивалось при проезде стоп-линии последним автомобилем, находившимся в очереди в момент включения зеленого сигнала (см. рис. 2). Хотя, практически выявлено, что при измерении потока насыщения необходимо учитывать все, кроме последнего, транспортные средства, присоединяющиеся к очереди в течение горения зеленого сигнала.

Таким образом, для вычисления потока насыщения требуются данные, полученные после обследования очередей остановившихся у стоп-линии транспортных средств, состоящих как минимум из четырех транспортных средств.

Необходимо отобрать те временные интервалы, которые расположены между временным интервалом третьего в очереди транспортного средства и первым, встречающимся далее, временным интервалом грузового автомобиля.

Величина временного интервала, соответствующего потоку насыщения, определяется как отношение суммы всех временных интервалов, полученных таким образом, к их количеству:

$$h_{satur} = \frac{\sum h_i}{n}, \quad (2)$$

где  $h_{satur}$  - среднее значение временного интервала насыщения, с;  
 $h_i$  - значение временного интервала с порядковым номером  $i$ , с;  
 $n$  - количество всех временных интервалов.

Затем величина потока насыщения определяется по формуле:

$$S_{satur} = \frac{3600}{h_{satur}}, \quad (3)$$

где  $S_{satur}$  –поток насыщения, прив.ед/ч.

Необходимо отметить, что модель определения потока насыщения, представленная в американском руководстве HCM 1985 была модифицирована в последующем издании этого руководства HCM 2000 [1]. По мнению автора, внесенные изменения, несомненно, влияют на исходную величину измеряемого потока насыщения.

По определению, данному в “HCM 2000”, поток насыщения – это максимальная интенсивность разезда транспортных средств из очереди в течение зеленого сигнала. Эта интенсивность достигается, как правило, между 10-й и 14-й секундами работы зеленого сигнала, что соответствует проезду над стоп-линией передней оси 4-го – 6-го автомобилей после включения зеленого сигнала.

Особым отличием данной модели было то, что за фиксируемый момент здесь уже принимался момент прохождения передней оси над стоп-линией.

Для того, чтобы уменьшить количество данных для каждого цикла при вычислении потока насыщения из времени прохождения последнего автомобиля вычитается время прохождения четвертого автомобиля в очереди. Эта величина будет равна сумме временных интервалов для (n-4) транспортных средств, где n – последний наблюдаемый автомобиль (не обязательно последний автомобиль в очереди). Эта сумма делится на число временных интервалов после 4-го транспортного средства (т.е. на [n-1]), для получения временного интервала для насыщенного состояния потока. Для расчета величины потока насыщения необходимо 3600 разделить на полученную величину.

Например, если время прохождения стоп-линии четвертым транспортным средством было 10,2 с и время прохождения 14-го (последнего) автомобиля – 36,5 с, то средняя величина временного интервала для насыщенного состояния потока равна:

$$\frac{(36,5 - 10,2)}{(14 - 4)} = \frac{26,3}{10} = 2,6. \quad (4)$$

при этом величина преобладающего потока насыщения в этом цикле равна:

$$\frac{3600}{2,36} = 1369. \quad (5)$$

Еще одной моделью определения потока насыщения является модель, представленная в канадском руководстве по проектированию регулируемых пересечений (Canadian Capacity Guide for Signalized Intersection, 1995). Здесь предлагается концепция потока насыщения, отличающаяся от других, представленных в выше указанных руководствах [4]. Используемое понятие “кумулятивного потока насыщения”, по мнению авторов, является очень удобным при расчете коротких фаз в режимах светофорного регулирования. В данном случае величина среднего потока насыщения определяется в зависимости от прошедшего интервала времени горения зеленого сигнала (см. рис. 3).

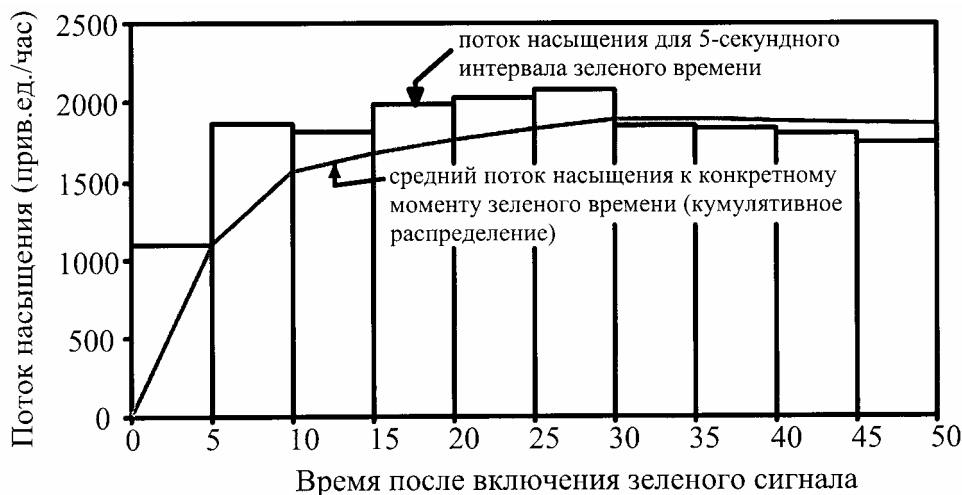


Рис.3. Пример измеренной величины потока насыщения

Следует отметить, что в данной модели в качестве фиксируемого момента используется момент проезда над стоп-линией переднего бампера транспортного средства.

Значение временного интервала насыщения определяется по формуле:

$$h_{satur} = \frac{\sum t_i}{X_i}, \quad (6)$$

где  $h_{satur}$  – среднее значение временного интервала насыщения, с;

$t_i$  - сумма временных интервалов, в которых имеют место лишь легковые автомобили в цикле регулирования  $i$ , с;

$X_i$  - количество легковых автомобилей, входящих в интервал  $t_i$ .

Затем величина потока насыщения определяется по формуле:

$$S_{satur} = \frac{3600}{h_{satur}}, \quad (7)$$

где  $S_{satur}$  – идеальный поток насыщения, прив.ед/ч.

Akcelik (1981) предложил свою модель определения потока насыщения, которая несколько отличается от других перечисленных методик [4]. Данные различия, несомненно, приводят к изменению величины вычисленного потока насыщения.

В данной модели используются результаты обследований, объектом которых являются только те транспортные средства, которые въезжают на перекресток после 10-й секунды зеленого сигнала. Поток насыщения при этом определяется по средней величине временных интервалов, для транспортных средств, начиная с десятой секунды зеленого времени. Величина потока насыщения может быть определена как отношение количества секунд в часе (3600) к среднему временному интервалу для полного насыщения, начиная с 10-й секунды зеленого времени. При этом средняя величина временного интервала потока насыщения определяется как сумма всех временных интервалов для данных промежутков времени, взвешенных соответствующим количеством эквивалентов легковых автомобилей (для каждого из рассматриваемых промежутков зеленого времени), деленная на общее число эквивалентов легковых автомобилей для рассматриваемого периода работы зеленого сигнала.

Анализируя модели определения потока насыщения на местности, перечисленные выше, можно выделить основные задачи, которые требуется выполнить при разработке модели определения потока насыщения:

1. Необходимо выбрать объект экспериментальных обследований. Например, в канадском руководстве [3] в качестве экспериментального объекта принимается количество транспортных средств, пересекших стоп-линию за определенный промежуток зеленого времени, а в HCM 2000 – временные интервалы между транспортными средствами.
2. Важно определить временные границы в фазе регулирования, в которых будет достигаться поток насыщения. От этого будет зависеть величина потока насыщения, а также величина потерянного времени в фазе. В HCM 2000 эти границы определены моментами прохождения стоп-линии 4-ым и последним в очереди транспортными средствами; Akcelik предлагает вести измерение с 10-й секунды после включения зеленого сигнала.
3. Необходимо выбрать относительную точку на транспортном средстве, которая будет определять прохождение транспортного средства через стоп-линию (например, передняя часть, передняя ось, или задняя ось транспортного средства). От этого выбора также будет зависеть исходная величина потока насыщения.

В своей диссертационной работе А.Г. Левашев уделил внимание разработке методики определения величины идеального потока насыщения (2004 г.).

На основе проведенного анализа моделей определения потока насыщения, автором был определен ряд необходимых ограничений.

По своему определению поток насыщения достигается лишь после нескольких секунд с момента включения зеленого сигнала. Это вызвано дополнительными затратами времени, связанными с реакцией водителя на смену светофорных сигналов и на разгон автомобилей до скорости свободного движения.

Для определения момента наступления потока насыщения автор предложил провести предварительное исследование, направленное на оценку этого момента (рис.4).

При этом наиболее рациональным будет использование наиболее распространенной обратной зависимости между позицией автомобиля в очереди и величиной временного интервала.

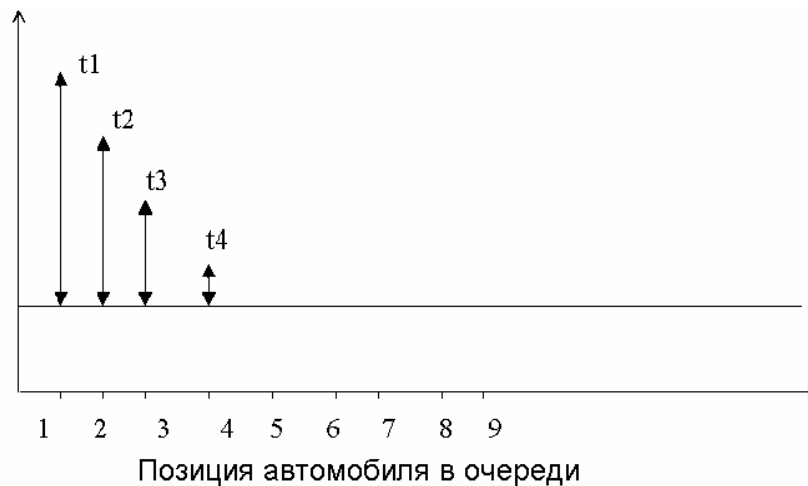


Рис.4. Выявление момента наступления потока насыщения

$t_i$  – время на которое отличается от временного интервала потока насыщения временной интервал транспортного с порядковым номером в очереди  $i$ .

Регрессионная модель определения величины временного интервала в зависимости от порядного номера автомобиля в очереди будет выглядеть следующим образом:

$$h_{\text{легк}} = \beta_0 + \frac{\beta_1}{N}, \quad (8)$$

где  $h_{\text{легк}}$  – величина временного интервала легкового автомобиля как функция от номера позиции легкового автомобиля в очереди, с;

$\beta_0$  – свободный член регрессионной модели, характеризующий величину временного интервала, соответствующего потоку насыщения, с;

$\beta_1$  – параметр регрессионной модели, выражающий величину, используемую при определении отклонения временного интервала  $i$ -го транспортного средства в очереди от временного интервала насыщения, с;

$N$  – переменная, выражающая номер позиции легкового автомобиля в очереди.

На основе анализа перечисленных выше моделей определения потока насыщения автор предлагает в качестве фиксируемого момента использовать момент прохождения над стоп-линией заднего бампера последнего транспортного средства в очереди. Это позволит исключить ошибки связанные с необходимостью полностью учитывать длину последнего автомобиля в очереди.

После того, как будет определен момент выравнивания распределения величины временного интервала в зависимости от времени, величину временного интервала, отражающего идеальный поток насыщения, можно будет определить как отношение времени, необходимого для проезда части очереди легковых автомобилей, величина временного интервала которых равна временному интервалу насыщения, к количеству легковых автомобилей, входящих в рассматриваемую часть очереди:

$$h_{\text{идеал}} = \frac{T_R}{X_R}, \quad (9)$$

где  $h_{\text{идеал}}$  – временной интервал, отражающий идеальный поток насыщения, с;

Число обследований - 284

$$h_{\text{легк}} = 2,42 - 0,0223 * N - 0,0253 * N^2 + 0,0043 * N^3 - 0,0003 * N^4 + 1,0155E-5 * N^5 \text{ (полином)}$$

$$h_{\text{легк}} = 1,8595 + 0,6125 / N \text{ (обратная зависимость)}$$

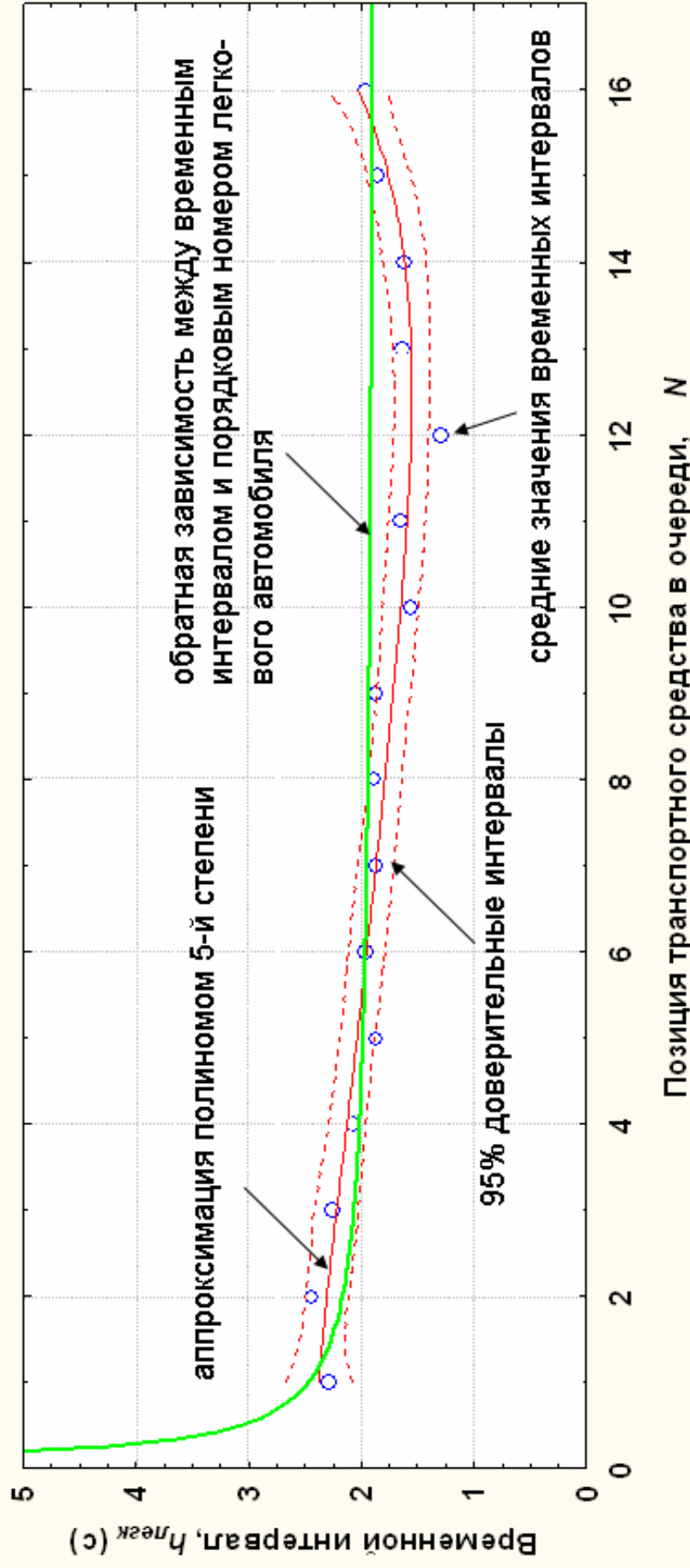


Рис. 5. Распределение временного интервала для очередей легковых автомобилей по данным всех отобранных полос движения (средние значения, аппроксимация полиномом 5-й степени, обратная зависимость)



$T_R$  – время, затрачиваемое для пересечения перекрестка той частью легковых автомобилей, временные интервалы которых в среднем равны временному интервалу насыщения, с;

$X_R$  – количество легковых автомобилей, пересекающих перекресток за рассматриваемый период  $T_R$ .

Начальный момент периода  $T_R$  будет определяться как проезд над стоп-линией заднего бампера последнего из автомобилей, временные интервалы которых отличаются от временного интервала насыщения. В качестве конечного момента периода  $T_R$  принимается момент прохождения над стоп-линией заднего бампера последнего автомобиля в очереди.

В рассматриваемую очередь включаются те легковые автомобили, которые в течение красного сигнала испытывали полную, или почти полную, остановку.

Затем можно определить величину идеального потока насыщения по следующей формуле:

$$S_{идеал} = \frac{3600}{h_{идеал}}, \quad (10)$$

где  $S_{идеал}$  – идеальный поток насыщения, прив.ед/ч.

По результатам обработки статистических данных А.Г. Левашевым было установлено, что идеальный поток насыщения достигается с момента прохождения стоп-линии 5-ым легковым автомобилем в очереди (рис. 5).

Отбросив значения временных интервалов, начиная с 1-го по 4-й порядковый номер, получим среднее значение идеального временного интервала насыщения:

$$h_{идеал} = \frac{\sum_{i=1}^k h_{i,5}}{k} = 1,8904.$$

Следующим этапом является определение величины идеального потока насыщения по формуле (3.18):

$$S_{идеал} = \frac{3600}{h_{идеал}} = \frac{3600}{1,8904} = 1904,3.$$

Для того, чтобы определить, на сколько полученное в данной работе значение идеального потока насыщения соответствует действительности, в табл. 2 сведены значения идеальных потоков насыщения, которые предлагают различные зарубежные руководства.

Таблица 2.

Сравнение значений идеального потока насыщения

Наименование источника	Значение идеального потока насыщения $S_{идеал}$ , (легк.авт/ч)
Highway Capacity Manual, 1985	1800
Highway Capacity Manual, 2000	1900
Полученное значение	1904,3

Из таблицы видно, что полученное в данной работе значение соответствует значению идеального потока насыщения, предлагаемого в недавнем издании американского руководства по пропускной способности дорог (НСМ 2000) [1]. Также можно сделать вывод, что идеальные условия, при которых осуществляется движение на перекрестках в Америке, соответствуют идеальным российским условиям, а в частности, идеальным условиям движения в городе Иркутске. Впрочем, в данной диссертационной работе обсле-

дования проводились лишь в городе Иркутске на нескольких регулируемых перекрестках. И, несмотря на то, что полученное значение идеального потока насыщения близко к предлагаемому в HCM 2000 и его можно считать действительным, для получения более точных результатов, по мнению автора, необходимо провести подобную работу в нескольких городах России.

### **Библиография**

1. Highway Capacity Manual. // TRB, Washington, DC, 2000. – 1134 p.
2. Roess R.P. Development of analysis procedures for signalized intersection in 1985 Highway Capacity Manual. // Transp. Res. Rec., 1987, N 1112, p. 10 – 16.
3. Teply S. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. - Committee Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections, Second Edition, 1995, 117p.
4. Teply S., Allingham D., Richardson D., Stephenson B. Second Edition of the Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections.// Institute of Transportation Engineers, District 7, Canada, 1995. – 115 p.
5. Webster F.V., Cobbe B.M. Traffic Signals | Road Research Technical Paper N56, HMSQ, London, 1966 – 111 p.