

УДК 711.7

МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРИВЕДЕНИЯ К ЛЕГКОВОМУ АВТОМОБИЛЮ ДЛЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ

А.Г. Левашев, А.Ю. Михайлов
(Иркутский государственный технический университет)
E-mail: alexey.levashev@mail.ru

За последние 30-40 лет за рубежом было проведено большое количество исследований, направленных на выявление влияния, оказываемого различными типами транспортных средств на пропускную способность регулируемого пересечения. Так, например, в работе [8] Вебстер оценивал коэффициенты приведения к легковому автомобилю (personal car equivalents) для автомобилей большей и средней грузоподъемности. Общее значение величины коэффициента приведения в его расчетах было 1,75.

Миллер получил значение коэффициента приведения для тех же типов автомобилей равное 1,85. При этом его исследования базировались на определении дополнительного времени, которое требуется транспортным средствам данного типа для пересечения перекрестка, по сравнению с легковыми автомобилями.

При проведении измерений большей частью авторов предполагалось учитывать лишь те автомобили, которые испытывали полную остановку, при примыкании к уже имеющейся на подходе к перекрестку очереди транспортных средств.

Брэнстон в 1978 определил величину коэффициента приведения для грузовых автомобилей равную 1,74 [2].

Позднее, в 1979 году Branston определяет величину коэффициентов приведения методом регрессионного анализа, обследуя при этом прямо направленное движение. Коэффициенты приведения равнялись 1,35 и 1,68 соответственно для автомобилей средней и большой грузоподъемности. Stuart в 1978 году изучал эффект влияния на пропускную способность автомобилей, не значительно отличающихся от легковых по габаритам [5]. Он определил, что длина автомобиля значительно влияет на величину временного интервала между транспортными средствами при разъезде на перекрестке.

Рассмотрим модель определения коэффициентов приведения к легковому автомобилю, которую предложил Sosin J. в 1980 году [7].

Величина задержки на регулируемом перекрестке является функцией многих факторов, которые могут быть разделены на три основных группы:

1. Совокупность параметров характеризующих транспортную ситуацию на перекрестке;
2. Совокупность параметров, определяющих режим регулирования;
3. Совокупность параметров, описывающих геометрию перекрестка.

Чтобы определить влияние на величину задержки параметров, определяющих режим регулирования требуется установка множества программ светофорной сигнализации на исследуемых перекрестках. К сожалению, часто это бывает сложно осуществить из-за нехватки средств на необходимое оборудование.

Точнее определить влияние цикла регулирования на величину задержки можно лишь с помощью средств цифровой вычислительной техники. Также

Наряду с полевыми измерениями, величина задержки определяется методом моделирования.

При моделировании предполагается, что автомобили прибывают к перекрестку в моменты A_1, A_2, \dots , и разъезжаются в моменты B_1, B_2, \dots (см. рис.1). Предполагается, что скорость до остановки и после стоп-линии является постоянной величиной, равной

среднему значению скорости автомобилей при пересечении перекрестка без остановок. Теоретические линии, отображающие положение автомобилей, представлены на рис.1 прямыми сплошными линиями, а действительное положение представлено пунктирными кривыми. Задержка для отдельного автомобиля определяется величиной отрезка AB .

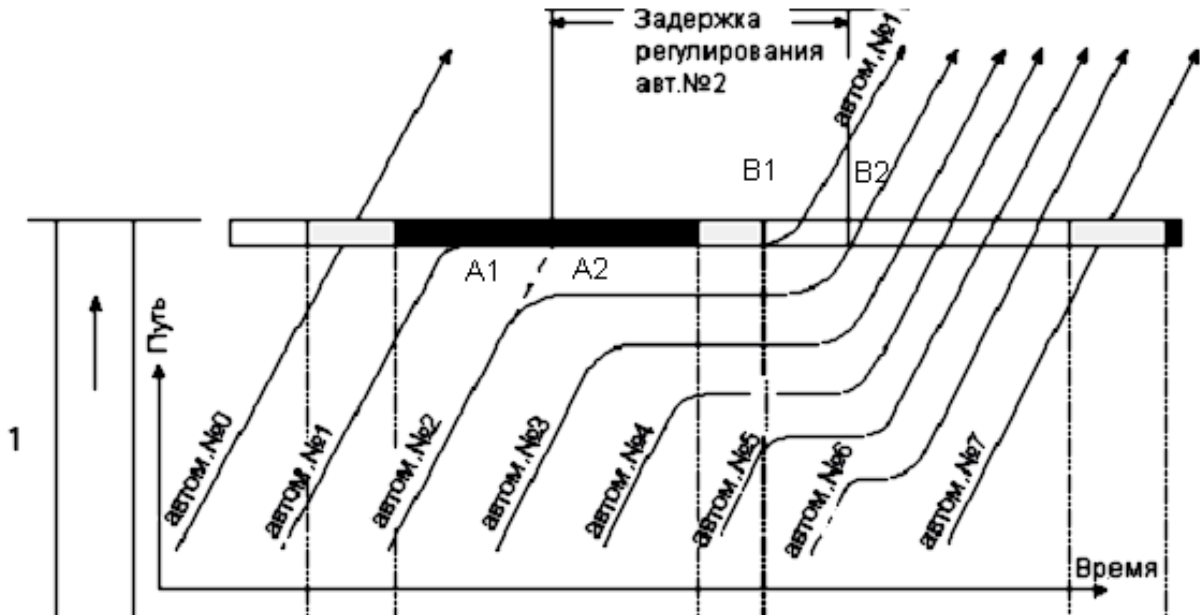


Рис.1. Диаграмма зависимости дистанции от времени для автомобилей при моделировании

Для того, чтобы определить величину задержки методом моделирования предполагается следующее:

1. Все подходы к перекрестку должны быть рассмотрены в отдельности.
2. Процесс прибытия транспортных средств к перекрестку при моделировании соответствует действительному процессу прибытия.
3. Транспортные средства разъезжаются на перекрестке в течение зеленого сигнала с постоянной интенсивностью движения.

Ниже перечисляются исходные данные, требуемые для компьютерной обработки:

1. длительность цикла регулирования;
2. длительность эффективного зеленого времени;
3. моменты во времени, определяющие прибытие транспортных средств к стоп-линии.

Основой всего алгоритма при моделировании была формула определения общей величины задержки за цикл:

$$D = \sum_{i=1}^k [c(1-\lambda) - p_i] + \frac{k(k+1)t}{2} \dots, \quad (1)$$

где k – число остановившихся автомобилей;

c – длительность цикла регулирования, с;

λ – доля эффективного зеленого времени в цикле;

p_i – момент времени прибытия транспортного средства к стоп линии, с;

t – постоянная величина, характеризующая временной интервал, с которым транспортные средства пересекают стоп-линию ($t=1,9$ с).

Для того, чтобы сравнить, насколько точно моделирование отражает действительный процесс, средние величины задержек, полученные при моделировании, были сопоставлены с задержками, измеренными при натуральных обследованиях.

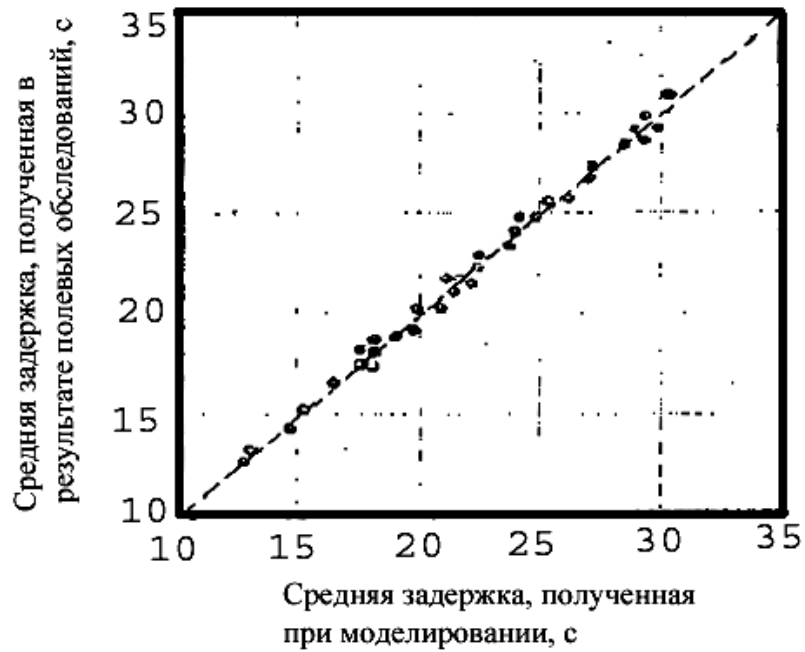


Рис.2. Сравнение средних значений задержек, полученных при моделировании и при натуральных обследованиях (только легковые автомобили).



Рис.3. Сравнение средних значений задержек, полученных при моделировании и при натуральных обследованиях (все типы транспортных средств).

Поскольку при моделировании предполагалось, что все транспортные средства являются легковыми автомобилями, величина средней задержки по натурным обследованиям определялась также для очередей, состоящих лишь из легковых автомобилей.

Как показано на рис.2 различие между задержками, полученными при моделировании и при натуральных обследованиях, не превышает 5 процентов.

Изменения в составе транспортного потока вызывают необходимость определения коэффициентов приведения видов транспортных средств к легковому автомобилю. В рассматриваемой модели коэффициенты приведения определяются на основе влияния различных типов транспортных средств на величину задержки.

Коэффициенты приведения определяются, используя метод наименьших квадратов. Анализируемый транспортный поток подставляется в рассматриваемую модель как поток, состоящий только из легковых автомобилей. Зная величину общей задержки, определенной из натуральных обследований, и величину задержки, полученной при моделировании, количество транспортных средств в потоке может быть выражено в виде функции $f(k)$:

$$f(k) = k_1 X_1 + k_2 X_2 + \dots + k_n X_n, \quad (2)$$

где k_i – количество транспортных средств типа i ;

X_i – коэффициент приведения к легковому автомобилю для транспортных средств вида i .

Значение функции $f(k)$ определялось на основании равенства:

$$f(k) = D / d_s, \quad (3)$$

где D – значение общей задержки, полученной при натуральных обследованиях;

d_s – значение средней задержки, полученной при моделировании.

Все транспортные средства, имеющие место в действительности, Sosin разбил на 5 типов: легковые автомобили; грузовые автомобили; автобусы; автопоезда; мотоциклы.

После сбора натуральных обследований транспортного потока, изменяющегося по составу, в соответствие с назначенными типами транспортных средств, была выстроена система линейных уравнений, в которой число неизвестных равнялось числу различных типов транспортных средств, за исключением легковых автомобилей, для которых коэффициент приведения $X_1=1$.

Поскольку число уравнений больше числа неизвестных, то такая система уравнений является противоречивой. Тем не менее, были вычислены наиболее вероятные значения параметров $X_2 - X_5$.

Используя метод наименьших квадратов, максимальное значение корреляции между теоретической $f(k)$ и эмпирической $F(k)$ функциями достигалось из предположения, что сумма квадратов отклонений минимальна:

$$m = \sum [f(k) - F(k)]^2 = \min. \quad (4)$$

Для определения величин $X_2 - X_5$, четыре линейных уравнения были вычислены, принимая функцию $m=0$.

По этим уравнениям были получены следующие коэффициенты приведения:

1. Легковой автомобиль	1,0
2. Грузовой автомобиль	1,6
3. Автобус	1,7
4. Автопоезд	2,8
5. Мотоцикл	0,6

Таким образом, теоретическая функция $F(k)$, конвертирующая транспортный поток в легковые автомобили может быть представлена в виде:

$$F(k) = 1,0 \cdot k_1 + 1,6 \cdot k_2 + 1,7 \cdot k_3 + 2,8 \cdot k_4 + 0,6 \cdot k_5. \quad (5)$$

Для иллюстрации точности уравнения (1) на рис.3 представлено сравнение средней величины задержки, полученной при натуральных обследованиях, и задержки, полученной при моделировании. Представленная на рисунке задержка, полученная по результатам полевых обследований, вычислялась как отношение средней величины об-

шей задержки к количеству транспортных средств, выраженных в легковых автомобилях.

Еще одна модель была представлена Ю.А. Врубелем [1]. В своей модели Врубель назвал коэффициенты приведения различных видов транспортных средств к легковому автомобилю – коэффициентами по потоку насыщения.

В данной модели рассматривалось отношение величины установившихся интервалов убытия конкретного вида транспортных средств T_{Hi} к величине установившегося интервала убытия очереди транспортных средств, состоящей только из легковых автомобилей $T_{HЛ}$ ($T_{HЛ}$ считался равным 2 с):

$$K_{Hi} = T_{Hi} / T_{HЛ}, \quad (6)$$

где K_{Hi} - коэффициент приведения к легковому автомобилю вида i ;

T_{Hi} - установившийся интервал убытия транспортных средств вида i , с;

$T_{HЛ}$ - установившийся интервал убытия очереди транспортных средств, состоящей только из легковых автомобилей, с.

По данной модели Врубелем были получены следующие коэффициенты приведения:

1. Мотоциклы	0,7
2. Автомобили средней грузоподъемности	1,4
3. Автопоезда	2,3
4. Автобусы	2,0
5. Троллейбусы	2,0
6. Сочлененные автобусы или троллейбусы	2,6

Еще одну модель определения коэффициентов приведения различных видов транспортных средств к легковому автомобилю предложил Tarko A. в работе [6]. Рассмотрим основные положения модели, предложенной автором.

Интенсивность потока насыщения падает с ростом доли автобусов и грузовых автомобилей в транспортном потоке. Влияние грузовых автомобилей на величину потока насыщения можно охарактеризовать двумя факторами:

1. Грузовые автомобили используют больше времени для пересечения перекрестка, чем легковые автомобили;
2. Грузовые автомобили воздействуют на другие транспортные средства путем увеличения временных интервалов последних.

Влияние грузовых автомобилей учитывается при определении потока насыщения, при использовании коэффициентов приведения к легковому автомобилю E . Коэффициент приведения E – это количество легковых автомобилей, которыми можно заменить один грузовой автомобиль в очереди без изменения ожидаемого времени, требуемого для разъезда первоначальной очереди (до конвертирования грузового автомобиля в легковой). Коэффициент приведения к легковому автомобилю, который учитывает лишь первый из перечисленных выше факторов можно определить просто из следующего отношения:

$$h_{hv} / h_{pc} \quad (7)$$

где h_{hv} - среднее значение временного интервала грузового автомобиля, с;

h_{pc} - среднее значение временного интервала легкового автомобиля, с.

Отношения временных интервалов грузовых и легковых автомобилей, полученные по данным, которые были собраны автором, представлены в табл.1. Представленные в таблице величины учитывают полное воздействие грузовых автомобилей на транспортный поток, если предположить, что второй эффект просто отсутствует. Для того, чтобы протестировать гипотезу, что грузовые автомобили не влияют на величину временных интервалов транспортных средств других типов, удобно показать, что на

временные интервалы легковых автомобилей не влияет величина доли грузовых транспортных средств в транспортном потоке u .

Таблица 1.

Отношение временных интервалов h_{hv} / h_{pc}		
Тип транспортного средства	Коэффициент приведения	Среднее отклонение
Легковые автомобили	1,0	0,0
Грузовой автомобиль	1,6	0,1
Автопоезд	2,3	0,2
Все автомобили, отличающиеся от легкового автомобиля	1,7	0,2

Согласно вышеописанной гипотезе, Tarko A. получил регрессионную зависимость средних значений временных интервалов легковых автомобилей от величины доли грузовых автомобилей в транспортном потоке (рис.4).

Регрессионный анализ показал достаточно тесную связь этих двух параметров. Исходя из рисунка, становится ясно, что грузовые автомобили влияют на величину временного интервала легковых автомобилей.

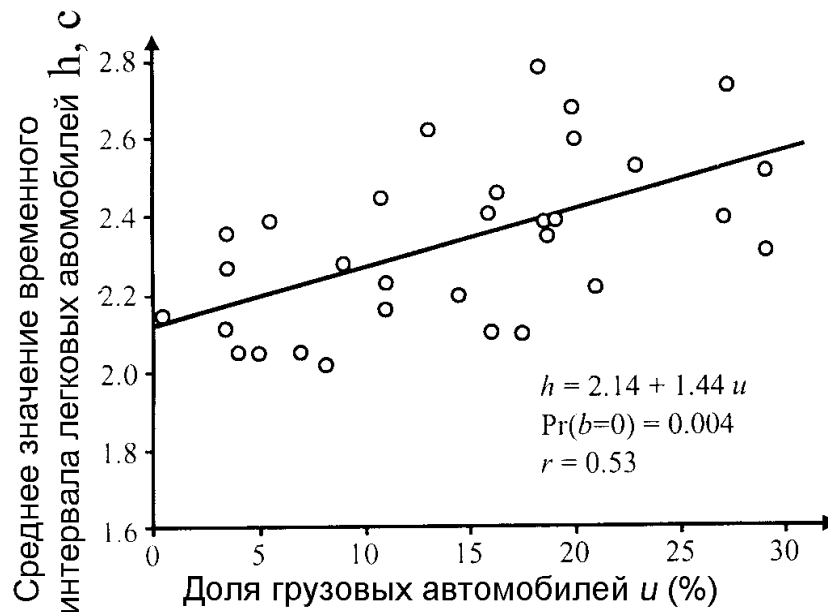


Рис. 4. Влияние грузовых автомобилей на величину временного интервала легковых автомобилей

Таким образом, данные, представленные в табл. 1 не соответствуют действительности и не описывают в полной мере влияние грузовых автомобилей на пропускную способность перекрестка.

Исходная формула, определявшая понятие коэффициента приведения, была использована для установления более точных значений коэффициентов приведения

$$n \cdot h_{pc}(u) + m \cdot h_{hv}(u) = n \cdot h_{pc}(u=0) + E \cdot m \cdot h_{pc}(u=0), \quad (8)$$

где n - количество легковых автомобилей в исследуемом потоке;

m - количество грузовых автомобилей в исследуемом потоке;

E - коэффициент приведения к легковому автомобилю для грузовых транспортных средств.

Левая часть уравнения выражает время, требуемое для разъезда на перекрестке очереди транспортных средств, которая состоит из n легковых и m грузовых автомобилей. Доля грузовых автомобилей в потоке равна $u=n/(n+m)$. Правая часть уравнения выражает время, требуемое для разъезда на перекрестке эквивалентной очереди транспортных средств, состоящей только из легковых автомобилей ($u=0$).

Функция $h_{pc}(u)$ описывает зависимость между временными интервалами легковых автомобилей и долей грузовых автомобилей в очереди. Разделив обе части уравнения на $(n+m)$ и сделав некоторые преобразования, можно получить следующее:

$$(1-u) \cdot h_{pc}(u) + u \cdot h_{hv}(u) = (1-u) \cdot h_{pc}(u=0) + E \cdot u \cdot h_{pc}(u=0), \quad (9)$$

где u - доля грузовых автомобилей в очереди.

Таким образом, если, например:

$$\begin{aligned} u &= 0,13, \\ h_{hv}/h_{pc} &= 1,7 \text{ (см. табл.1), и} \\ h_{pc} &= 2,14 + 1,44 \cdot u \text{ (см. рис. 4),} \end{aligned}$$

то можно получить следующее:

$$\begin{aligned} h_{pc}(0,13) &= 2,33, \\ h_{hv}(0,13) &= 1,7 \cdot h_{pc}(0,13) = 3,96, \text{ и} \\ h_{pc}(u=0) &= 2,14. \end{aligned}$$

При этом новое значение коэффициента приведения к легковому автомобилю будет равно $E = 2,4$.

По мнению А. Тарко, новая величина коэффициента приведения для грузовых автомобилей E учитывает оба из перечисленных в этом разделе факторов влияния грузовых автомобилей на пропускную способность перекрестка. Это значение значительно выше, чем 1,7 (без учета зависимости $h_{pc}(u)$).

В своей диссертационной работе А.Г. Левашев (2004 г.) основное внимание уделил определению коэффициентов приведения к легковому автомобилю для движения на регулируемом пересечении в прямом направлении для типов транспортных средств, наиболее часто встречающихся в городах РФ.

На первом этапе было необходимо все транспортные средства разделить на группы. Исходя из анализа исследовательских работ авторов разных стран, направленных на определение коэффициентов приведения, можно сделать вывод, что не всегда исследователи выбирают широкую классификацию типов транспортных средств. Так, например, в современном американском руководстве по пропускной способности дорог (Highway Capacity Manual) принято подразделять все типы транспортных средств на легковые и грузовые транспортные средства [4]. При этом грузовыми транспортными средствами считаются те, которые имеют больше, чем 4 колеса.

Аналогично американскому руководству, такая же классификация используется в новейшем германском руководстве по проектированию средств регулирования дорожного движения (*Handbuch fuer die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen, 2001*) [3]. Очевидно, это связано с тем, что исследователи, стремились разработать наиболее удобный способ учета доли грузовых транспортных средств. Доля грузовых автомобилей в германском руководстве учитывается приведением потока насыщения коэффициентами, представленными в табл.2.

В американском руководстве по пропускной способности дорог (HCM 2000) для всех видов транспортных средств, отличающихся от легковых автомобилей предлагается усредненный коэффициент приведения к легковому автомобилю, равный 2,0.

Таблица 2.

Приведение потока насыщения в зависимости от доли грузовых автомобилей в германском руководстве HBS 2001 [3]

Доля грузовых автомобилей (SV)	Коэффициент приведения
< 2%	1,0
2 – 15 %	$1 - 0,0083 \cdot e^{0,21 \cdot SV}$
> 15%	$1/(1 + 0,015 \cdot SV)$

С другой стороны в исследовательской работе, которую провели Kockelman K.M. и Raheel A.S. [5], основной целью было определение коэффициентов приведения к легковому автомобилю для автомобилей, незначительно отличающихся от легковых автомобилей и имеющих также четыре колеса, как и у легковых автомобилей (автомобили типа “Джип”). Результаты данного обследования представлены в табл. 3.

Таблица 3.

Коэффициенты приведения по результатам работы Kockelman K.M. и Raheel A.S. [5]

Тип автомобиля	Движение прямо	Движение налево	Движение направо
“Джип” (Small Suv)	1,07	0,96	1,08
Автобус малой вместимости (Van)	1,34	1,06	1,19
Автомобиль с кузовом на базе легкового автомобиля (Pickup)	1,14	1,08	1,16

Таблица 4.

Классификация типов транспортных средств

Тип транспортного средства	Пассажиرو-вместимость, чел	Грузоподъемность, кг	Длина, м	Идентификационный номер
Легковой автомобиль	до 4	–	–	1
Микроавтобус	5 – 12	–	–	2
Грузовой автомобиль, до 2-х тонн	–	до 2000	до 6,5	3
Автобус средней вместимости	13 – 60	–	–	4
Грузовой автомобиль, от 2-х до 6-и тонн	–	2000 – 6000	до 8	5
Автобус большой вместимости	более 61	–	–	6
Грузовой автомобиль, более 6 тонн	–	более 6000	до 10	7
Сочлененный автобус троллейбус	–	–	–	8
Автопоезд	–	–	–	9

По результатам обработки статистических данных, исследователи сделали следующий вывод: величина временного интервала, а также коэффициента приведения к

легковому автомобилю для автомобилей типа “Джип” отличается от соответствующих значений для легкового автомобиля. Следовательно, предложенная в американском руководстве классификация типов транспортных средств изначально закладывает определенную погрешность при определении величины потока насыщения для реальных условий, а также при определении величины пропускной способности элементов регулируемого перекрестка.

А.Г. Левашев считает, что классификации транспортных средств для движения на регулируемом перекрестке, представленные в американском и германском руководствах имеют смысл. Тем не менее, в рамках данного исследования, по мнению автора, для транспортных средств, которые зачастую преобладают на регулируемых пересечениях (микроавтобусы, грузовые автомобили средней грузоподъемности, автобусы) следует определить коэффициенты приведения отдельно.

На основании вышеописанного автором была предложена следующая классификация типов транспортных средств (табл. 4).

Одним из факторов, влияющих на выбор регрессионной модели определения коэффициентов приведения к легковому автомобилю различных типов транспортных средств, были имеющиеся в распоряжении возможности проведения полевых обследований. Поскольку для определения коэффициентов приведения необходимо обследование транспортного потока на подходе к перекрестку в сечении, где находится стоп-линия, то, например, проведение такого обследования, которое провел J. Sosin (определение коэффициентов приведения на основе длины очереди), в данном случае, возможно, исказило бы некоторые данные. Поскольку при определении величины задержки необходимо обследовать всю очередь транспортных средств, не уделяя при этом должного внимания сечению, где находится стоп-линия.

Выбирая регрессионную модель определения коэффициентов приведения, автор руководствовался тем, что при увеличении числа переменных в линейной регрессионной модели требуется проведение большего числа натуральных обследований с целью сбора достаточного (статистически значимого) материала, описывающего в достаточной мере каждую переменную модели. Таким образом, исходя из экономической целесообразности (минимум затрат на проведение обследований), для определения коэффициентов приведения А.Г. Левашев предлагает использовать следующую модель:

$$T = \alpha + \sum_{j=1}^{j=m} \beta_j \cdot X_j + \varepsilon, \quad (10)$$

где T – время, необходимое для разезда очереди транспортных средств на перекрестке, после включения зеленого сигнала, с;

α – величина задержки (стартовая задержка), связанная с разгоном автомобилей до скорости, которая преобладает при насыщении, с;

β_j – параметры регрессионной модели, выражающие величины временных интервалов транспортных средств типа j , с;

X_j – количество транспортных средств типа j в очереди;

ε – ошибка, отражающая дополнительное время, вызванное дополнительными факторами, которые не участвуют в модели, с.

Число уравнений в регрессионном анализе будет соответствовать числу обследованных очередей (циклов регулирования). Каждое из уравнений, участвующих в регрессии будет содержать в себе следующие исходные данные:

1. Время, затраченное очередью на проезд перекрестка;
2. Количество каждого типа транспортных средств в очереди.

Возникает вопрос, что представляет собой параметр T в уравнении (10).

Многие исследователи использовали в качестве начального момента отсчета момент времени, когда включается зеленый сигнал. В тоже время разными исследовате-

лями по-разному определяется момент окончания периода T . Так, например, в американском руководстве по пропускной способности дорог 1985 года предлагалось использовать в качестве момента пересечения автомобилем стоп-линии момент проезда над стоп линией его задней оси. В новом издании 2000 года этого же руководства этот момент уже считается по моменту прохождения переднего бампера транспортного средства над стоп-линией.

А.Г. Левашев предлагает при определении параметра T в качестве начального момента использовать не момент включения зеленого сигнала, как это часто принимается, а момент начала движения первого транспортного средства в очереди с целью исключения из модели величины дополнительного времени, требуемого для реакции водителя на смену светофорного сигнала. Автор считает, что, поскольку каждый водитель обладает собственной реакцией, отличающейся от реакции других водителей, исключение этого периода из расчетов позволит сократить величину параметра ε в рассматриваемой модели.

В качестве конечного момента при определении параметра T автор предлагает использовать момент прохождения над стоп-линией заднего бампера транспортного средства. Такой выбор позволяет избежать ошибки, которая может быть вызвана в связи с неполным учетом длины последнего в очереди транспортного средства.

В рассматриваемую очередь следует включать те транспортные средства, которые в течение красного сигнала испытывали полную или почти полную остановку.

Следующим этапом является определение коэффициентов приведения к легковому автомобилю по следующей формуле:

$$k_i = \frac{\beta_i}{\beta_{\text{легк}}}, \quad (11)$$

где k_i – коэффициент приведения к легковому автомобилю;

$\beta_{\text{легк}}$ – временной интервал легкового автомобиля, который определяется по регрессионной модели (10), с.

Следует отметить, что регрессионная модель (10) одновременно включает в себя еще один параметр, исследуемый в данной работе, – стартовая задержка. Это еще раз подчеркивает экономическую целесообразность выбранной регрессионной модели.

Библиография

1. Врубель Ю.А. О потоке насыщения. Белорус. политех. ин-т. Минск, 1988. – 7 с. – Рук. деп. в ЦБНТИ Минавтотранса РСФСР, № 663 – ат 89.
2. Branston D., Van Zulien H.J. The estimation of saturation flow, effective green time and passenger car equivalents at traffic signals by multiple liner regression. *Transp. Res.*, 1987, v 12, p. 47 – 53.
3. Handbuch fuer die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen (HBS 2001). - Forschungsgesellschaft fuer Strassen und Verkehrswesen, Koeln, Januar 2002.
4. Highway Capacity Manual. // TRB, Washington, DC, 2000. – 1134 p.
5. Kockelman K.M. and Raheel A.S. Effect of vehicle type on the capacity of signalized intersections. – The University of Texas at Austin, 1999. - 23 p. http://www.ce.utexas.edu/prof/kockelman/public_html/ASCELDTShabih.pdf
6. Shanteau R.M. Using cumulative curves to measure saturation flow and lost time. // *ITE Journal*, 1988, v15, N10, p. 27 – 31.
7. Sosin J.A., Delays at intersections controlled by fixed cycle traffic signals. // *Traffic Eng. and Contr.*, 1980, v21, N5, p. 264 – 265.
8. Webster F.V., Cobbe B.M. Traffic Signals | Road Research Technical Paper N56, HMSQ, London, 1966 – 111 p.