

Выбор рациональных значений скорости и дистанции между автомобилями в плотном транспортном потоке



В. И. Куватов,
доктор техн. наук,
профессор, заведующий
лабораторией Института
проблем транспорта
им. Н. С. Соломенко РАН



Д. В. Козьмовский,
канд. техн. наук, старш.
научн. сотрудник ИПТ
им. Н. С. Соломенко РАН



И. Г. Малыгин,
доктор техн. наук,
профессор, заместитель
по науке директора ИПТ
им. Н. С. Соломенко РАН

Анализ формул оценки безопасной дистанции между автомобилями дает возможность убедиться, что данные формулы неточны и их использование в ряде случаев ведет к неправильному выбору дистанции. Это, в свою очередь, становится причиной повышения опасности попутных столкновений или неполного использования пропускной способности сети автомобильных дорог. Новая формула является более точной, позволяет снизить опасность попутных столкновений и в максимально возможной степени использовать резерв пропускной способности.

Начиная с 2005 г. автомобильный парк России бурно растет. По данным агентства «Автостат», в 2005 г. в России на 1 тыс. жителей приходилось 176 машин, в 2010 г. — 231, а на начало 2012 г. — более 250 автомобилей. При этом темпы роста значительно различаются по регионам [4]. Транспортная инфраструктура, как в столице, так и в регионах, развивается существенно медленнее, отставая от темпов автомобилизации и испытывая поэтому повышенные нагрузки.

Увеличение нагрузки на транспортную инфраструктуру ведет к обострению противоречия между низкой пропускной способностью большинства автодорог и возрастанием транспортных потоков по ним. Существуют два основных пути разрешения этого противоречия: расширение сети автомобильных дорог и повышение качества управления транспортными потоками. Последнее предполагает, в частности, целесообразное распределение транспортных потоков по сети во времени и в пространстве и повышение пропускной способности автодорог за счет рациональной организации движения [3; 5; 6].

Мы ставили цель разработать методику, которая могла бы обеспечить повышение пропускной способности автомобильных дорог за счет выбора рациональных значений скорости и дистанции между автомобилями в плотном потоке разнотипных транспортных средств.

Данная цель достижима при наличии в составе математического, программного и информационного обеспечения дорожно-транспортных информационно-управляющих систем (ДТИУС) современных моделей, созданных на основе информационно-коммуникационных технологий. Эти системы позволяют:

- в реальном времени собирать информацию о дорожной обстановке;
- на основе этой информации выработать рекомендации участникам дорожного движения;
- отображать информацию, касающуюся всех участников дорожного движения, на динамических информационных табло ДТИУС;
- избирательно доводить полезную информацию до каждого конкретного участника дорожного движения.

Ниже приведена математическая модель, перечень информационно-коммуникационных технологий и организация их применения в ДТИУС.

Как известно, пропускная способность автомобильной дороги рассчитывается по формуле

$$N = V / (l_2 + \Delta S + l_0),$$

где V — средняя скорость движения потока автомобилей;

l_2 — длина второго автомобиля;

l_0 — минимально допустимый зазор (для легковых автомобилей колеблется в пределах 1–3 м);

ΔS — расстояние между двумя следующими друг за другом автомобилями минус зазор.

Величину $D = l_2 + \Delta S + l_0$ называют динамическим габаритом второго автомобиля [5]. Динамический габарит выбирают так, чтобы в случае экстренного торможения первого автомобиля второй успел остановиться до того, как расстояние между ним и первым автомобилем окажется меньше минимально допустимого зазора. Такой выбор обеспечивает минимум риска попутных столкновений и устойчивость [7] транспортных потоков.

Формула динамического габарита показывает, что он должен быть тем больше, чем выше скорость. Поэтому пропускная способность автомобильных дорог будет различной в зависимости от соотношения между скоростью и динамическим габаритом транспортных средств. Отсюда возникает задача определения такого динамического габарита и такой скорости, при которых пропускная способность дороги окажется максимальной.

Существует ряд способов выбора динамического габарита — от простого, когда дистанция до впереди идущего транспортного средства должна быть равна половине скорости, до сложных, когда расчет ведется по различным формулам, например:

$$D = l_2 + 1.2V + 6.1 + l_0 \quad [2]$$

$$\text{и } D = l_2 + Vt_p + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} \right) + l_0 \quad [1],$$

где a_1, a_2 — замедление первого и второго автомобиля соответственно;

t_p — время реакции водителя второго автомобиля плюс время срабатывания тормозной системы автомобиля (обычно оно равно 1–2 с).

В первых двух способах не учитываются тормозные свойства автомобилей. В последнем они учтены, но не всегда корректно. Действительно, пусть: $l_2 = 5$ м, $V = 25$ м/с (90 км/ч), $a_1 = 4$ м/с², $a_2 = 8$ м/с², $t_p = 1$ с, $l_0 = 3$ м. Подставив эти данные в последнюю формулу, получим $D = -6,0625$ м. Между тем динамический габарит автомобиля по определению должен быть больше его длины и тем более не должен принимать отрицательных значений.

Причина некорректности формулы состоит в том, что она определяет не кратчайшее расстояние между автомобилями, а расстояние между автомобилями после того, как оба они остановились. Это расстояние будет кратчайшим, если вначале остановился первый автомобиль, а затем второй. Если же оба автомобиля остановятся одновре-

менно или вначале остановится второй автомобиль, то кратчайшее расстояние наступит раньше, чем остановится второй — и тем более первый — автомобиль. В этом случае вычисления окажутся неверными.

В [5] показано, что динамический габарит автомобиля i , следующего за автомобилем j , в зависимости от того, какой автомобиль остановится первым в случае экстренного торможения, должен рассчитываться по одной из двух различных формул. В математическом виде это выглядит так:

$$D_{ij} = l_i + l_0 + \begin{cases} Vt_p + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{a_i} - \frac{1}{a_j} \right), & \text{если } \frac{V}{a_j} < t_p + \frac{V}{a_i} \\ \frac{a_1 a_2 t_p^2}{2(a_1 - a_2)}, & \text{если } \frac{V}{a_j} \geq t_p + \frac{V}{a_i} \end{cases}, \quad (1)$$

где a_p, a_j — замедление первого и второго автомобиля соответственно;

l_i — длина второго автомобиля.

Если первым остановится автомобиль j , то вычисления необходимо проводить по верхней части формулы (1), в противном случае — по нижней части.

Аргументами в пользу формулы (1) являются, в частности, замедления первого и второго автомобилей. В прежней практике данные параметры не учитывались из-за сложности их определения, из-за отсутствия технологий и механизмов обмена информацией как между автомобилями, так и между автомобилями и ДТИУС.

Однако современный автомобиль и современная ДТИУС сильно отличаются от своих предшественников времен создания руководства [1]. Оснащение бортовым компьютером практически каждого автомобиля, постоянный процесс интеллектуализации транспорта, внедрение систем динамической стабилизации, экстренного торможения, адаптивного круиз-контроля, технологий глобального позиционирования и беспроводной передачи данных позволяют пересмотреть традиционный подход к оценке пропускной способности.

Учет новых параметров транспортного потока на современном уровне развития информационных технологий:

- повышает точность оценок динамического габарита и пропускной способности автомобильных дорог;

- создает условия для снижения аварийности, связанной с попутными столкновениями, за счет выбора рациональных значений минимально допу-

стимой безопасной дистанции между автомобилями;

- создает условия для повышения пропускной способности за счет выбора рациональных значений минимально допустимой безопасной дистанции между автомобилями;

- позволяет добиться повышения скорости потока транспортных средств.

На практике для оценки пропускной способности принято весь транспортный поток приводить к однородному потоку легковых автомобилей с помощью переводных коэффициентов, которые показывают, насколько динамический габарит автомобиля отличается от динамического габарита легкового автомобиля. В расчетах обычно используются следующие значения переводных коэффициентов: грузовые автомобили — от 1,5 до 3,5 (в среднем 2,5), автопоезда — от 3,0 до 5,0 (в среднем 4).

Для иллюстрации приведем пример. Пусть по дороге прошло 3 тыс. легковых автомобилей, 1500 грузовых автомобилей и 2300 автопоездов. Применяя переводные коэффициенты, получим 15 950. Таким образом, 6800 автомобилей трех типов оказываются эквивалентны 15 950 легковым автомобилям. Однако подход с применением переводных коэффициентов страдает определенной погрешностью, так как не учитывается, что динамический габарит автомобиля зависит не только от его тормозных свойств, но и от тормозных свойств автомобиля, идущего впереди.

В [1] используется другой, более адекватный подход. Суть его заключается в следующем. Транспортные средства разделяются на n типов. Пусть установлено, что в среднем за единицу времени по дороге проходит x_i автомобилей типа i . Вероятность того, что очередной автомобиль будет автомобилем типа i , рассчитывается по формуле $P_i = x_i / \sum_{j=1}^n x_j$. Вероятность того, что два следующих друг за другом автомобиля будут автомобилями типа i и типа j , — по формуле $P(i, j) = P(j, i) = P_i P_j$.

Тогда средний интервал между автомобилями рассчитывается по формуле:

$$l_{\text{расч}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i P_j l_{ij}, \quad (2)$$

где l_{ij} — интервал между автомобилями, когда первым идет автомобиль типа j , а вторым — типа i .

Формула (2) не вызывает сомнений, если интервалы l_{ij} рассчитаны правильно. В [1] эти интервалы считаются за-

Таблица. Интервалы между автомобилями

Тип зазды идущих автомобилей	$l_{\text{расч}}$ (м), для автомобилей		
	Легковых	Грузовых	Автопоездов
Легковые	7,3	9,3	13,2
Грузовые	9,0	9,7	14,1
Автопоезда	13,0	14,2	17,3

данными, см. табл. Однако в цифрах, представленных в таблице, не учитывается, что интервалы между автомобилями должны зависеть от скорости движения транспортных средств и их тормозных свойств. Более того, из таблицы следует, что чем хуже тормозные свойства автомобиля, идущего вторым, тем меньше безопасное расстояние между ним и впереди идущим автомобилем, что в общем случае неверно. Использование табличного способа было связано с недостаточным развитием систем управления транспортным потоком во время создания данного подхода.

В современных условиях применение табличного способа не всегда оправдано. В качестве альтернативы можно предложить методику, основанную на использовании формулы (2), в которой расчетные интервалы l_{ij} заменены на динамические габариты D_{ij} . Необходимые данные для расчета D_{ij} предполагается получать в результате обмена между идущими друг за другом автомобилями информацией о параметрах движения и тормозных свойствах автомобилей непосредственно или через ДТИУС.

С учетом формулы (2) средний динамический габарит потока из n транспортных средств определяется по формуле:

$$D = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i P_j D_{ij}, \quad (3)$$

при условии, что величины D_{ij} рассчитываются по формуле (1). Теперь, в соответствии с классической формулой расчета пропускной способности, можно найти среднестатистическую пропускную способность дороги:

$$N = \frac{V}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i P_j D_{ij}}, \quad (4)$$

Из полученной формулы следует, что среднестатистическая пропускная способность дороги зависит от средней скорости движения по ней транспортных средств. При этом отметим, что скорость входит и в числитель, и в знаменатель (в неявном виде) полученного выражения. С другой стороны, скорость

ограничена некоторым минимальным V_{\min} и максимально допустимым V_{\max} . Поэтому рациональная методика поиска скорости, при которой пропускная способность будет максимальной, связана с перебором скорости от V_{\min} до V_{\max} с дискретностью ΔV и расчетом для каждого значения $V = i\Delta V$ среднего динамического габарита и пропускной способности по формулам (2), (4) и (5) соответственно. Значение скорости и динамического габарита, при которых пропускная способность окажется максимальной, и будут рациональными.

Подведем итоги. Используемые в описанном выше методе параметры скорости потока автомобилей, времени реакции водителя и тормозных свойств автомобилей не являются принципиально новыми, но в традиционной оценке пропускной способности дороги они ранее не применялись. Причиной этого была сложность получения данных параметров в реальном масштабе времени, обусловленная отсутствием соответствующих информационно-коммуникационных технологий.

Предлагаемый метод целесообразно использовать при строительстве новой (модернизации старой) автодороги, при организации дорожного движения по существующей автодороге, при оценке возможности передислокации требуемого числа автотранспортных средств между двумя пунктами за заданное время.

Представляется, что разработанный метод может эффективно применяться как механизм саморегулирования транспортного потока автомобилей. В этом случае бортовые компьютеры каждой пары автомобилей в потоке обмениваются данными о тормозных свойствах и скоростном режиме (непосредственно или через ДТИУС), рассчитывают динамические габариты и выдают рекомендации водителю. Кроме того, они несут коррективы в управление системами адаптивного круиз-контроля и экстренного торможения.

Скорость, при которой пропускная способность дороги будет максимальной, должна рассчитываться в соот-

ветствии с представленным методом и высвечиваться на динамических информационных табло вдоль дороги, установку которых можно осуществлять при их экономической целесообразности.

При оценке возможности передислокации требуемого числа автотранспортных средств между двумя пунктами за заданное время известны количество автотранспортных средств каждого вида, их скоростные и тормозные характеристики, характеристики дороги и длина пути. Используя приведенные формулы, можно составить оптимальный вариант расположения автотранспортных средств в колонне, выбрать оптимальную скорость и дистанции между ними, оценить минимум времени, необходимого для передислокации. ■

Литература

1. Министерство автомобильных дорог РФ. Руководство по оценке пропускной способности автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1982.
2. Бабков В. Ф. Автомобильные магистрали для скоростного движения. Обзорная информация. ЦБНТИ Минавтодор РСФСР. Вып. 3. М., 1975.
3. Белый О. В. Проблемы формирования и организации транспортных потоков. СПб.: ЭЛМОР, 2010.
4. Ключевые цифры. Автомобильная статистика. М.: Аналитическое агентство «Автостат», 2012.
5. Куватов В. И., Козьмовский Д. В., Малыгин И. Г. Метод расчета динамического габарита автомобиля в условиях разнородного потока транспортных средств // Транспорт: наука, техника, управление. 2012. № 11. С. 23–26.
6. Куватов В. И., Козьмовский Д. В. Оценка теоретической пропускной способности участка автомобильной дороги в условиях разнородного потока транспортных средств // Мат-лы Междунар. научн. конф. «Современный транспорт: инфраструктура, инновации, интеллектуальные системы». СПб., 2012. С. 140–147.
7. Синешук Ю. И., Пантиховский О. В., Синешук М. Ю. Информационно-логическая модель анализа и обеспечения устойчивости функционирования систем управления сложными организационно-техническими объектами // Управление рисками в техносфере. 2012. № 2 (22). С. 6–12.