

ВЛИЯНИЕ РАДИУСА КРИВОЙ В ПЛАНЕ НА ПЛОТНОСТЬ ПРИ ЗАТОРЕ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Гусев В.А.

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия (410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, СГТУ имени Гагарина Ю.А.), e-mail:gusev88888@mail.ru

С ростом автомобилизации увеличивается плотность и интенсивность транспортных потоков. Для планирования и оценки эффективности работы автомобильной дороги необходимо знать параметры транспортного потока. В статье рассматриваются формулы и методы определения плотности при заторе на кривых малого радиуса. При проектировании кривых малого радиуса применяется уширение проезжей части, что позволяет водителям очень плотно вставать при заторах, рассасывание которых занимает значительное время. С помощью фото- и видеосъемки проведены экспериментальные исследования для определения степени влияния радиуса кривых в плане на плотность при заторе и представлены результаты по определению данного показателя на кривых малого радиуса. При этом был получен и обоснован вывод, что чем меньше радиус, тем выше плотность при заторе. Полученные результаты использованы для разработки математических моделей теории риска в транспортном потоке.

Ключевые слова: транспортный поток, плотность при заторе, кривая в плане.

INFLUENCE CURVE RADII ON DENSITY AT CONGESTION CARS

Gusev V.A.

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia (410054, Saratov, Politechnicheskaya, 77), e-mail:gusev88888@mail.ru

With the growth of car ownership increases the density and intensity of traffic flows. For planning and evaluating the performance of the highway to know the parameters of the traffic flow. The article deals with the formulas and methods for determining the jam density on tight curves. In the design of tight curves used widening of the carriageway, which allows drivers to get up very tightly with congestion, its takes considerable time for re-sorting. With camera and video experimental studies to determine the impact radius of the curves in terms of the density of the wort and when presented with the results of determination of the indicator on the tight curves. Thus was obtained and proved the conclusion that the smaller the radius the higher the density at the mash. Semi-obtained results are used to develop mathematical models of the risk theory in traffic.

Ключевые слова: traffic flow, density at the mash, the curve in design.

Знания характеристик транспортного потока необходимы для проектирования автомобильных дорог, оценки эффективности работы транспортной отрасли, проведения экономического анализа и долгосрочного планирования.

Характеристики транспортного потока постоянно изменяются в зависимости от состава движения и геометрических параметров автомобильных дорог. При различных уровнях удобства движения транспортные средства по-разному влияют друг на друга [6].

В мировой практике изучение закономерностей движения автомобилей и плотности при заторе началось в 30-х годах прошлого столетия. С ростом автомобилизации возрастает плотность транспортных потоков, что приводит к увеличению дорожно-транспортных происшествий, т.к. в условиях плотных транспортных потоков при экстренном торможении расстояние между транспортными средствами оказывается недостаточным для предотвращения наезда на впереди идущий автомобиль. Отмеченное состояние транспортного потока назы-

вается плотным или насыщенным, а дорога при этом работает с высокой загрузкой вплоть до уровня пропускной способности или до заторного состояния.

Основными характеристиками транспортного потока являются: интенсивность, плотность, скорость движения, состав транспортных средств, частота обгонов, длина пачек автомобилей, задержки движения, интервалы между автомобилями во времени и по длине [3, 6]. Как показывают выполненные исследования, все эти параметры влияют на плотность транспортного потока при заторе.

Плотность транспортного потока является пространственной характеристикой, определяющей степень стесненности движения на полосе дороги, т.е. плотность – это число транспортных средств, приходящихся на 1 км протяженности дороги, и имеет размерность авт/км.

Для обеспечения безопасности движения на автомобильных дорогах необходимо вести наблюдения, анализировать и систематизировать данные о плотности, скорости и интенсивности движения, предзаторных и заторных состояниях транспортного потока.

Измерения параметров транспортного потока выполняют различными методами [2]. Эти измерения проводят:

- в точке (например, измеряют скоростемером мгновенную скорость автомобиля и интервал во времени между одиночными автомобилями);
- на коротком интервале (измеряют скорость свободного движения и плотность при заторе);
- по длине маршрута (измеряют среднюю эксплуатационную скорость, ведут аэрофото съемку заторов);
- методом движущегося наблюдателя (измеряют при помощи оборудования ходовой лаборатории многие из перечисленных параметров транспортного потока, исключая плотность при заторе).

Особенности формирования плотности при заторе на кривых малого радиуса

Плотность при заторе является одним из параметров, входящим в математические модели теории транспортных потоков [6].

Плотность при заторе – это максимальное количество транспортных средств, остановленных (по той или иной причине) на одном километре дороги. Значение плотности при заторе зависит от геометрических элементов участка дороги (кривая в плане конкретного радиуса, затяжной подъем, спуск с определенным продольным уклоном, конкретная ширина полосы движения, на которой наблюдается затор и др.) и состава транспортных средств, находящихся в заторе. Если длина участка меньше одного километра, то плотность при заторе определяют по формуле:

$$q = \frac{n \cdot 1000}{L}, \quad (1)$$

где n – количество остановившихся автомобилей на участке затора, L – длина участка, на котором наблюдается затор, м.

С другой стороны, каждый автомобиль на дороге при заторе занимает участок длиной S_i , который измеряется от заднего бампера впереди стоящего автомобиля до заднего бампера данного автомобиля рис. 1 и вычисляется по формуле

$$S_i = \ell_i + d_i, \quad (2)$$

где ℓ_i – длина самого автомобиля, м; d_i – дистанция до впереди стоящего автомобиля, м.

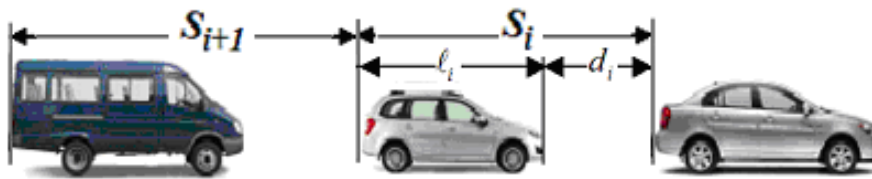


Рис. 1. Пространство дороги, занимаемое автомобилем в транспортном потоке

Очевидно, что $L = \sum_{i=1}^n S_i$ на длине участка с определенными геометрическими элементами дороги и тогда плотность при заторе определяют по формуле

$$q = \frac{n \cdot 1000}{\sum_{i=1}^n S_i}. \quad (3)$$

Одним из элементов автомобильных дорог, влияющим на плотность при заторе, являются кривые в плане малого радиуса, имеющие свою особенность. При радиусах кривых в плане величиной менее 1000 м в строительных нормах и правилах [4] предусмотрено уширение проезжей части, чтобы длинномерное транспортное средство могло развернуться на повороте и вписаться в кривую. Водители используют уширение проезжей части на кривых малого радиуса, то есть при заторах останавливают автомобили не друг за другом, а – «елочкой», а при небольших габаритах автомобилей встают на одной полосе проезжей части в два ряда (см. рис. 2).



Рис. 2. Примеры заторных состояний транспортных потоков на кривых

На съезде могут образовываться заторы из-за высокой интенсивности движения на основной дороге. С увеличением плотности движения на любом участке автомобильной дороги, а на кривых особенно, от водителей требуется повышенное внимание и точность действий. Кроме того, повышается эмоциональная и психофизиологическая напряженность водителей, и, как следствие, увеличивается вероятность дорожно-транспортных происшествий, которое может произойти из-за допущенной водителем ошибки или технического отказа автомобиля.

Экспериментальные исследования на кривых малого радиуса

На автомобильных дорогах в Саратовской области проводились натурные исследования степени влияния радиуса кривой на плотность при заторе. Были использованы видеосъемка, фотосъемка, определение плотности на коротком участке дороги.

Для определения плотности использовали два подхода: непосредственный подсчет количества автомобилей на участках с уширением покрытия по формуле (1) и измерение расстояний между автомобилями в заторе с фиксацией марки автомобиля [5] на участках без уширения покрытия по формуле (3).

Измерения плотности при заторе выполнялись в часы «пик», когда водители и пассажиры спешат на работу или с работы и заторы возникают, практически, регулярно. При подсчете количества автомобилей при заторе учитывалась неполная длина автомобиля, попавшая на снимок фотографии с затором в пределах выбранного участка дороги на кривой в плане.

Параметры транспортного потока и образовавшиеся плотности при заторе носят случайный характер, поэтому для расчетов использовали средние значения величин [см. формулу (2)], установленные методами математической статистики. На каждой кривой было выполнено от 40 до 80 измерений интервалов между автомобилями и длин автомобилей. Сним-

ки автомобилей в заторах делали сбоку под прямым углом или, если позволяла развязка, сверху.

Воспользовавшись формулами (1) и (3), получили значения плотностей на кривых радиусами 34, 58, 72 и 150 м. Результаты измерений и средняя плотность при заторе на обследуемых кривых представлены в табл.1.

Таблица 1

Плотности при заторе на кривых малого радиуса

Радиус кривой, м	Длина измеряемого участка кривой, м	Среднее количество легковых автомобилей, авт.	Средняя плотность легковых автомобилей, авт/км
34	60	4,9	82,7
58	100	7,6	75,9
72	100	7,3	73,0
150	80	4,9	61,2

Для построения математических моделей теории транспортных потоков получим аппроксимирующую функцию плотности при заторе методом наименьших квадратов [1]. Используем полином второй степени.

$$y_i^{meop} = A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2. \quad (4)$$

Согласно этому методу коэффициенты A_0, A_1, A_2 , полинома (4) определяют таким образом, чтобы сумма квадратов разностей значений, получаемых экспериментально y_i , и теоретических значений y_i^{meop} , получаемых по функции (4), была бы наименьшей при заданном диапазоне значений аргумента:

$$S_m = \sum_{i=1}^n [y_i^{meop} - y_i]^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

Промежуточные вычисления проводим с надлежащим количеством десятичных знаков. Составим разность S_m

$$S_m = \sum_{i=1}^n [y_i^{meop} - y_i]^2 = \sum_{i=1}^n [(A_0 + A_1 x_i + A_2 x_i^2) - y_i]^2,$$

найдем частные производные и приравняем их к нулю

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_m}{\partial A_0} &= 2 \sum_{i=1}^n [(A_0 + A_1 x_i + A_2 x_i^2) - y_i] = 0; \\ \frac{\partial S_m}{\partial A_1} &= 2 \sum_{i=1}^n [(A_0 + A_1 x_i + A_2 x_i^2) - y_i] x_i = 0; \\ \frac{\partial S_m}{\partial A_2} &= 2 \sum_{i=1}^n [(A_0 + A_1 x_i + A_2 x_i^2) - y_i] x_i^2 = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Получим систему уравнений

$$\begin{cases} nA_0 + A_1 \sum_{i=1}^n x_i + A_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i = 0, \\ A_0 \sum_{i=1}^n x_i + A_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + A_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 - \sum_{i=1}^n x_i y_i = 0, \\ A_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + A_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + A_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 - \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Запишем ее в нормальном виде:

$$\begin{cases} A_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 + A_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + A_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i, \\ A_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 + A_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + A_0 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ A_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 + A_1 \sum_{i=1}^n x_i + nA_0 = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (8)$$

Найденная система уравнений (8) служит для нахождения коэффициентов A_0 , A_1 , A_2 многочлена (4). Решение этой системы определяет параболу, которая представляет найденную экспериментально функцию. Результаты вычислений представим в табл. 2.

Таблица 2

Расчет по методу наименьших квадратов

n	x_i	y_i	x_i^4	x_i^3	x_i^2	$x_i^2 \cdot y_i$	$x_i \cdot y_i$	$y_i^{теор}$	$y_i^{теор} - y_i$
1	34	82,7	1336336,00	39304,0	1156,0	95601,20	2811,80	81,8681	-1,7806
2	58	75,9	7311616,00	140608,0	2704,0	205233,60	3946,80	77,5664	1,8970
3	72	73,0	37015056,00	474552,0	6084,0	444132,00	5694,00	72,0721	0,2867
4	150	61,2	506250000,0	3375000,0	22500,0	1377000,00	9180,00	61,2934	-0,4031
Σ	314	292,8	551913008,0	4029464,0	32444,0	2121966,80	21632,60	292,8	0

Система уравнений относительно A_0 , A_1 , A_2 :

$$\begin{cases} 551913008A_2 + 4029464A_1 + 32444A_0 = 2121966,8; \\ 4029464A_2 + 32444A_1 + 314A_0 = 21632,6; \\ 32444A_2 + 314A_1 + 4A_0 = 292,8. \end{cases}$$

Решая ее, находим: $A_0 = 91,1$; $A_1 = -0,29$; $A_2 = 0,0006$.

Тогда зависимость плотности при заторе от величины радиуса кривой в плане принимает вид:

$$q_0^{зам} = 91,1 - 0,29 \cdot R + 0,0006 \cdot R^2. \quad (9)$$

На рис. 3 представлены экспериментальные данные и полученные теоретические значения плотности при заторе.

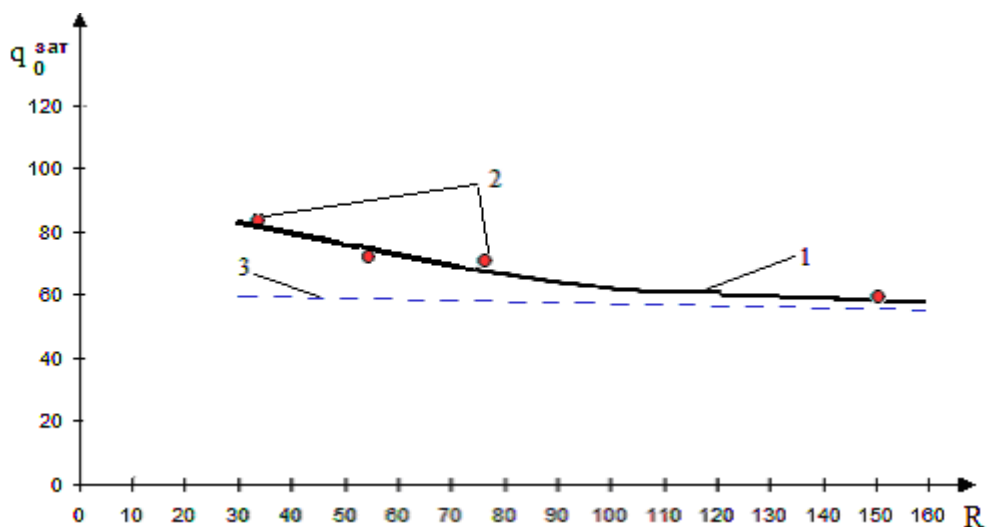


Рис. 3 Зависимость плотности при заторе легковых автомобилей от радиуса кривой в плане: 1 – результаты расчета по формуле (9); 2 – экспериментальные данные; 3 – ожидаемое изменение плотности при заторе на кривых с малыми радиусами при сохранении ширины покрытия на одной полосе движения, соответствующей прямолинейному участку дороги (3,00÷3,75 м)

Уравнение (9) представляет собой экспериментально установленную математическую модель, учитывающую влияние ширины покрытия и радиуса кривой в плане на плотность при заторе легковых автомобилей. Точка минимума параболы достигается при $R=241$ м. На кривых радиусом менее 241 м ширина проезжей части увеличивается относительно нормативной ширины, на кривых радиусом более 241 м (уширение присутствует, но оно небольшое) водители останавливают транспортные средства в заторе строго друг за другом, практически, используя всю ширину покрытия, когда нет возможности для водителей предельно увеличить плотность при заторе (встать «елочкой»). Если предположить, что кривые малого радиуса были бы спроектированы без уширения покрытия с шириной проезжей части для различных категорий дорог 3,00÷3,75 м (как прямолинейные участки), то увеличение плотности при заторе не происходило бы. Но подтвердить экспериментально это невозможно.

Выводы

В соответствии с нормами проектирования известно, что, чем меньше радиус кривой в плане, тем больше требуемая ширина проезжей части. При появлении заторов или пробок на кривых в плане малого радиуса водители используют всю ширину покрытия при остановке. Другими словами, водители увеличивают плотность автомобилей в заторе путем занятия всего пространства проезжей части, т.е. расположением автомобилей «елочкой» или в два ряда, если ширина покрытия позволяет это сделать.

Полученная зависимость имеет минимум по плотности при заторе. На кривых с радиусами больше 240 м плотность при заторе легковых автомобилей начинает увеличиваться и

доходит до плотности 112-115 авт/км (на прямолинейном участке трассы). Поэтому левая ветвь параболы отражает зависимость плотности затора от величины малого радиуса и уширения покрытия, а правая ветвь – отражает заметное увеличение радиуса кривой в плане, другими словами, наблюдается значительное улучшение дорожных условий. Если бы отсутствовало уширение покрытия на кривых малых радиусов, то увеличение плотности при заторе просматривалось по всей зависимости «радиус – плотность при заторе».

Эти исследования позволяют установить влияние допустимой величины риска (при проектировании автомобильных дорог допустимый риск равен $1 \cdot 10^{-4}$, при эксплуатации – $1 \cdot 10^{-3}$) на исходные данные формул теории транспортного потока.

Список литературы

1. Бронштейн Н.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1980. – 976 с.
2. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.
3. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
4. СП 34.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85*. Автомобильные дороги. М., 2012. – 106 с. (Зарегистрирован Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии. Росстандарт. Дата введения 2013-07-01.)
5. Технические характеристики автомобилей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.avto-avto.ru/encyclopedia/tech/> (дата обращения 25.09.2014).
6. Столяров В.В. Проектирование автомобильных дорог с использованием теории риска: в 2 ч. Ч.1. / В.В. Столяров. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1994. – 184 с.

Рецензенты:

Кокодеева Н.Е., д.т.н., зав. кафедрой «Транспортное строительство» ФГБОУ ВПО Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина, г. Саратов;

Овчинников И.Г., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Транспортное строительство» ФГБОУ ВПО Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина, г. Саратов.