

УДК 625.724+51-74

РАСЧЁТ СКОРОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В ЗОНЕ ИХ СЛИЯНИЯ**Маркуц В.М.***Тюмень, e-mail: vmarkuc@yandex.ru*

Обеспечение безопасности движения, пропускной способности и расчётной скорости на автомагистралях, оценки различных планировочных схем транспортных развязок и пересечений, а также создание благоприятных условий вхождения автомобиля в основной транспортный поток с заданным коэффициентом снижения скорости является основной задачей в проектировании автомобильных дорог. Для этого необходимо оценить величину интервала в приоритетном потоке, которая принимается водителем автомобиля нерприоритетного потока, когда обеспечивается безопасное вхождение автомобилей второстепенного направления в основной транспортный поток. Кроме того следует определить величину снижения скорости транспортно-го потока основного направления при различных коэффициентах скорости на основном направлении и соответствующих коэффициентах скорости на съезде в зависимости от уровней удобства движения автомобилей в зоне слияния транспортных потоков, если такое предусмотрено техническим заданием на проектирование.

Ключевые слова: безопасность движения, пропускная способность, расчётная скорость, автомагистраль, транспортный поток, транспортная развязка, методика, расчётные формулы, коэффициент скорости, уровни удобства

CALCULATION OF SPEED TRAFFIC FLOWS IN THE AREA OF MERGERS**Markuts V.M.***Tyumen, e-mail: vmarkuc@yandex.ru*

Ensuring the safety of traffic, highway capacity and rated speed to highway and at the confluence of traffic flows, evaluation of various planning schemes road junction and intersections from the point of view of traffic safety and to ensure the maximum possible throughput, as well as to create favorable conditions for entry into the vehicle the main traffic flow with a given ratio speed reduction is a major challenge in the design of highways. It is necessary to estimate the amount of space a priority stream that is taken car driver apriority flow, which provides secure entry vehicles secondary areas in the main traffic flow. Car drivers main traffic flow without inconveniences are exposed, that is, they do not have to reduce speed, and even more so to resort to manoeuvre, to avoid an accident. Also, you should determine the amount of reduction in the rate of traffic flow at various mainstream of the coefficient of velocity in the core area and the corresponding coefficients of the velocity at the convention, depending on the levels of comfort of the vehicles at the confluence of traffic flows, if provided technical design assignment.

Keywords: traffic safety, throughput, design speed, highway, traffic flow, transportation, methods, formulas, speed ratio, the levels of comfort

При проектировании автомобильных дорог требуется не только обеспечить удобство и безопасность движения одиночных автомобилей, но и высокую расчётную скорость всего транспортного потока. Пересечения автомобильных дорог, и в частности, зоны слияния и маневрирования транспортных потоков, являются одним из узких мест, где происходит наибольшее число дорожно-транспортных происшествий, наблюдается снижение скорости автомобилей и значительно уменьшается пропускная способность. Обеспечение безопасности движения, пропускной способности и расчётной скорости на автомагистралях и в местах слияния транспортных потоков, оценки различных планировочных схем транспортных развязок и пересечений с точки зрения безопасности движения и максимально возможной пропускной способности, а также создания благоприятных условий вхождения автомобиля в основной транспортный поток с заданным коэффициентом снижения скорости является основной задачей в проектировании автомобильных дорог. При этом необходимо оценить величину интер-

вала в приоритетном потоке, которая принимается водителем автомобиля нерприоритетного потока, при котором обеспечивается безопасное вхождение автомобилей второстепенного направления в основной транспортный поток. Водители автомобилей основного транспортного потока при этом не испытывают неудобств, то есть им не приходится снижать скорость движения, а тем более прибегать к маневрированию, чтобы избежать дорожно-транспортного происшествия. Кроме того следует определить величину снижения скорости транспортного потока основного направления, если такое предусмотрено техническим заданием на проектирование при различных коэффициентах скорости на основном направлении и соответствующих коэффициентах скорости на съезде в зависимости от уровней удобства движения автомобилей в зоне слияния транспортных потоков. Решению этих задачи посвящена настоящая работа.

1. Определение безопасной величины граничного интервала

Слияние двух транспортных потоков, один из которых является приоритетным,

то есть основным, а другой второстепенным, возможно при условии, что в основном потоке имеются достаточные для осуществления такого маневра промежутки времени. Согласно определению Е.М. Лобанова [4] такие интервалы носят название приемлемых или граничных интервалов. И такие интервалы в транспортных потоках имеются даже при значительной интенсивности движения. К примеру, средняя величина интервала в транспортном потоке интенсивностью 600 авт/час составляет $3600/600 = 6$ с. Однако из табл. 1, где показано распределение интервалов в трёх минутных диапазонах времени, видно, что даже при высокой плотности движения имеются довольно значительные интервалы времени между автомобилями.

Такая неравномерность распределения автомобилей в пространстве и времени даёт возможность осуществления безопасного маневрирования в зонах слияния транспортных потоков, при обгонах и транспорт-

ных пересечениях в одном уровне. К примеру, если для вливания в основной поток магистрали необходим интервал не менее 5 сек., то как видно из таблицы 1, в первом минутном диапазоне таких интервалов оказалось три, во втором два, в третьем – пять. В промежутках между ними находятся интервалы менее приемлемых, суммарная длительность которых составляет время задержки или время поиска приемлемого интервала. Время задержки или время поиска приемлемого интервала в трёх минутных промежутках составляет соответственно в первой минуте: $(0.2 + 2.2 + 0.2) = 2.6$ с, $(0.6 + 1.8 + 1.8 + 2.4) = 6.6$ с; во второй минуте $(0.9 + 4.7 + 3.8 + 0.2 + 2.7 + 0.3 + 2.3 + 0.3 + 1.2 + 1.3) = 17.7$ с; в третьей минуте 2.4 с, $(6.2 + 0.1) = 6.3$ с. Эти значения показывают, что время задержки или время поиска приемлемого интервала может изменяться в больших пределах, и подчинено вероятностным законам, что говорит о его зависимости от множества случайных факторов.

Таблица 1

Распределение интервалов времени (с) между автомобилями в транспортном потоке интенсивностью 600 авт/ч

№ автомобиля	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
№ минуты	1	8.3	0.2	2.2	0.2	23.2	0.6	1.8	1.8	2.4	18.2	3.7	-	-	-	-
	2	0.9	4.7	3.8	0.2	2.7	0.3	2.3	0.3	1.2	1.3	19.4	12.9	3.3	2.9	3.2
	3	2.4	10.4	6.2	0.1	7.9	9.5	11.6	0.3	1.2	1.8	4.2	0.6	4.8	-	-

Величина интервала в приоритетном потоке, которая принимается водителем автомобиля нерприоритетного потока, зависит от множества факторов, составляющих единую систему – дорога, автомобиль, водитель. К их числу относятся: дорожные условия на пересечении; интенсивность и состав движения транспортного потока; разность скоростей движения транспортных средств, приближающихся к пересечению; планировка пересечения, психофизиологические качества и стаж работы водителя, оценивающего интервал; состояние покрытия и погодные условия, а также время суток. В зависимости от индивидуальных особенностей и квалификации интервал, принятый одним водителем, может быть отвергнут другим. Величина граничного промежутка времени в большей степени зависит от скорости приближающихся транспортных средств по главной дороге [3]. Экспериментальные исследования показывают, что величина используемых временных интервалов уменьшается с ростом интенсивности движения на главной дороге [5].

Несмотря на то, что величина граничного интервала во многом зависит от психофизиологические качеств водителей транспортных средств, существует такая их величина, которая определяется лишь дорожными условиями и состоянием транспортных средств. При этом обеспечивается безопасное вхождение автомобилей второстепенного направления в основной транспортный поток, водители автомобилей которого не испытывают неудобств, то есть им не приходится снижать скорость движения, а тем более прибегать к маневрированию, чтобы избежать дорожно-транспортного происшествия. В соответствии с требованиями руководства по оценке пропускной способности автомобильных дорог для различных типов развязок и автомагистралей рекомендуются различные уровни удобства движения автомобилей в зоне слияния транспортных потоков. Для дорог и транспортных развязок высокого класса скорость транспортного потока должна быть обеспечена максимально возможной (80 км/ч). Для остальных категорий дорог

и типов транспортных развязок скорость транспортного потока может быть снижена. Это определяется коэффициентом скорости S равным отношению фактической скорости на основной полосе и максимально возможной.

1.1. Определение интервала безопасности между первым автомобилем приемлемого интервала и автомобилем съезда

Взаимодействие автомобилей в зоне слияния транспортных потоков происходит следующим образом. Автомобиль, въезжающий со съезда, движется по участку задержки переходно-скоростной полосы в ожидании приемлемого интервала на основной полосе, где автомобили движутся

с постоянной скоростью V_m . Величина приемлемого интервала при этом складывается из величин t_1 и t_2 , где t_1 – это величина интервала безопасности между первым автомобилем приемлемого интервала и автомобилем съезда, а t_2 – интервал безопасности для второго автомобиля этого интервала. Таким образом, водитель второстепенного направления, увидев приемлемый интервал, вливается в этот поток. При этом он держится на таком расстоянии от первого автомобиля, выбранного им безопасного интервала, чтобы между ними был безопасный интервал t_1 , который складывается из трёх слагаемых (рис. 1).

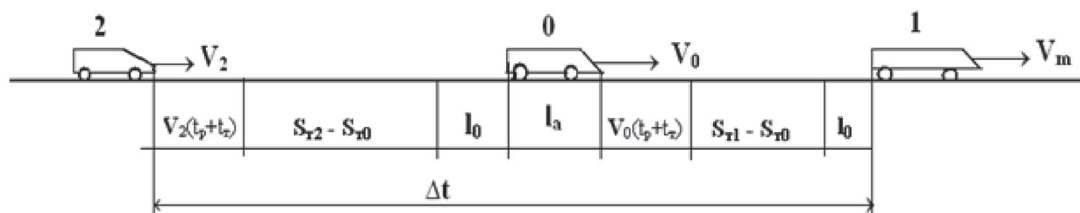


Рис 1 Схема к определению безопасной величины граничного интервала времени в зонах слияния транспортных потоков

$$t_1 = (t_{pm} + t) + \frac{la + l_0}{V_m} + \frac{S_{t0} - S_{t1}}{V_m} \quad (1)$$

Здесь первый член $t_{pm} + t$ – время реакции водителя автомобиля съезда и приведения в действие тормозной системы (1 с); $la + l_0$ – статический габарит автомобиля и минимальный зазор безопасности между останавливающимися автомобилями (3.0 – 4.5) м; $S_{t0} - S_{t1}$ – разность тормозных путей переднего автомобиля – S_{t1} и заднего – S_{t0} автомобиля, то есть автомобилей магистрали и съезда. Так как

$$S_{t0} - S_{t1} = \frac{(K_0 - K_1)(V_m)^2}{2g(m\phi + \psi)}$$

Отсюда:

$$t_1 = 1 + \frac{la + l_0}{V_m} + \frac{(K_0 - K_1)V_m}{2g(m\phi + \psi)} \quad (2)$$

где K_0 и K_1 – коэффициенты эксплуатационных условий торможения заднего и переднего автомобиля. Для городских условий $K_0 - K_1$ рекомендуется принимать равным 0.7 [1], в остальных случаях 1.4 [2, с. 88] или по эмпирической зависимости [2, с. 51-52].

$$K_0 = \kappa_{обз} \kappa_{э} (0.87 + 0.013)V_m \quad (3),$$

где $\kappa_{обз}$ – коэффициент обзорности, принимается для легковых автомобилей равным 1.8; $\kappa_{э}$ – коэффициент эксплуатационных условий торможения, принимается для легковых автомобилей равным 1.44.

$$K_1 = \kappa_{э} (0.87 + 0.013)V_m \quad (4).$$

Коэффициент сцепления шины с поверхностью дороги ϕ принимают равным 0.7 или 0.3 соответственно для сухой или мокрой загрязнённой поверхности покрытия. Коэффициент сцепного веса m принимается равным 1. Дорожное сопротивление $\psi = f + (-) i$, где f – коэффициент сопротивления качению принимают равным 0.02, i – продольный уклон дороги. Например, для условий сухой поверхности асфальтобетонного покрытия на горизонтальном участке автомобильной магистрали при скорости основного потока $V_m = 20$ м/с (72 км/ч) безопасный интервал времени между первым автомобилем магистрали и автомобилем съезда $t_1 = 1 + 0.375 + 2.041 = 3.4$ с.

1.2 Определение интервала безопасности между вторым автомобилем приемлемого интервала и автомобилем съезда

Несколько по-другому складывается ситуация интервала безопасности t_2 для вто-

рого автомобиля этого интервала. Довольно часто водители, вливающиеся в основной поток, заботятся, главным образом, о своём переднем бампере и потому стараются обеспечить себе интервал безопасности t_1 . Конечно, задний бампер их также волнует, но уже в меньшей степени, в надежде на то, что водитель второго автомобиля сумет обезопасить свой передний бампер, если перед ним вдруг появится автомобиль второстепенного направления. Поэтому величина интервала безопасности t_2 определяется по двум критериям: из уравнения равномерного движения, когда водитель автомобиля второстепенного направления выберет при вливании в основной поток достаточно большой интервал, либо, выбрав меньший интервал, он «подрезает» задний автомобиль, заставляя его двигаться равнозамедленно. В первом случае из уравнения равномерного движения:

$$t_2 = \frac{L_2}{V_m} \quad (5)$$

где L_2 – это динамический габарит второго автомобиля приемлемого интервала; V_m – скорость транспортного потока на основной магистрали.

Динамический габарит определяется из уравнения:

$$L_2 = (t_p + t_m)V_m C_2 + l_0 + (S_{m2} - S_{m0}). \quad (6)$$

$$\Delta\tau = \Delta t - \left[2(t_{pm} + t) + \frac{2l_0 + l_{am}}{V_m} + \frac{S_0 - S_{m1}}{V_m} \right]. \quad (9)$$

Так как второй автомобиль движется равнозамедленно, то

$$S_{m2} - S_{m0} = \frac{b(\Delta\tau)^2}{2}, \quad (10)$$

где b – тормозное замедление, равное

то из (9) и (10) имеем:

$$\frac{[K_2(V_m C_2)^2 - K_0(V_m C_c)^2]}{2g(m\phi + \psi)} = \frac{g(m\phi + \psi)(\Delta\tau)^2}{2}, \quad (13)$$

Откуда получаем:

$$t_{2.2} = 1 + \frac{l_0}{V_m C_c} + \frac{(C_2)^2 K_2 - (C_c)^2 K_0}{2g(m\phi + \psi)} V_m. \quad (14)$$

Формула (14) справедлива для случая снижения скорости второго автомобиля интервала и автомобиля съезда. При сни-

Здесь l_0 – зазор безопасности (принимается равным 3 м.), C_2 – коэффициент скорости второго автомобиля, $(S_{m2} - S_{m0})$ – разность тормозных путей второго автомобиля интервала и автомобиля съезда:

$$S_{m2} - S_{m0} = \frac{(K_2 - K_0)(V_m C_2)^2}{2g(m\phi + \psi)} \quad (7)$$

С учётом формул (6) и (7) интервал безопасности t_2 из условий равномерного движения равен:

$$t_{2.1} = 1 + \frac{l_0}{V_m C_2} + \frac{(K_2 - K_0)V_m C_2}{2g(m\phi + \psi)}. \quad (8)$$

В другом случае водитель второго автомобиля в приемлемом интервале, увидев въезжающий автомобиль со съезда, может действовать следующим образом: двигаться с постоянной скоростью основного потока V_m , если между ними существует безопасный интервал; снижать скорость (вплоть до полной остановки) или переместиться влево (если имеется возможность). Следующие за ним автомобили повторяют этот маневр, что приводит к возникновению на дороге так называемой ударной волны. Оценить величину снижения скорости автомобилей основного потока можно следующим образом. Из расчётной схемы на рис. 1 видно, что для торможения, то есть снижения скорости водителю второго автомобиля из полной величины граничного интервала остаётся время равное:

$$b = g(m\phi + \psi). \quad (11)$$

Так как

$$S_{m2} - S_{m0} = \frac{[K_2(C_2)^2 - K_0(C_c)^2](V_m)^2}{2g(m\phi + \psi)}, \quad (12)$$

жения скорости только второго автомобиля интервала из (13) при равенстве коэффициента съезда C_c единице получаем:

$$t_{2,3} = 1 + \frac{l_o}{V_m} + \frac{(C_2)^2 K_2 - K_o}{2g(m\phi + \psi)} V_m. \quad (15)$$

Необходимо отметить, что снижение скорости автомобилей на съезде происходит только при значительном замедлении движения автомобилей на основном направлении.

Итак, скорость второго автомобиля (и следующих за ним) зависит от скорости автомобиля съезда, с которой он въезжает на магистраль и от того остатка от

«приемлемого» интервала для торможения. Чтобы автомобили магистрали не снижали скорость, необходимо выполнить условие: $V_2 = V_0 = V_m$, тогда из (18) имеем:

$$\Delta\tau = \frac{\sqrt{K_2 - K_0}}{g(m\phi + \psi)} V_m. \quad (16)$$

Из (9) находим необходимую величину граничного интервала, при котором автомобили основного потока движутся с постоянной скоростью V_m :

$$\Delta t = 2(t_{pm} + t) + \frac{2l_0 + l_a}{V_m} + \frac{K_0 - K_1}{2g(m\phi + \psi)} V_m + \frac{\sqrt{K_2 - K_0}}{g(m\phi + \psi)} V_m \text{ или}$$

$$\Delta t = 2(t_p + t) + \frac{2l_0 + l_a}{V_m} + \left[\frac{K_0 - K_1}{2} + \sqrt{K_2 - K_0} \right] \frac{V_m}{g(m\phi + \psi)} \quad (17)$$

При благоприятных условиях: ($\phi = 0.7$, $i = 0$, $m = 1$); $2l_0 + l_a = 10,5$ м; $K_2 - K_0 = 1.4$;

$$V_m = 20 \text{ м/с}; \Delta t = 7,8 \text{ с.}$$

2. Оценка скорости транспортных потоков в зоне их слияния

Так как скорость второго автомобиля приемлемого интервала $V_2 = V_m C_2$, то из (13) имеем:

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{K_2}} \sqrt{K_0(V_0)^2 + [g(m\phi + \psi) \Delta\tau]^2}. \quad (18)$$

При $\Delta\tau$, приближающемся к нулю, когда автомобиль съезда буквально «подрезает» второй автомобиль приемлемого интервала, тому приходится проводить экстренное торможение. Скорость его при этом снижается и определяется в соответствии с уравнением:

$$V_2 = V_0 \sqrt{\frac{K_0}{K_2}}. \quad (19)$$

Из уравнения (14) при равенстве числителя нулю

$$K_2(C_2)^2 = K_0(C_c)^2 \quad (20)$$

определяем коэффициент снижения скорости автомобиля съезда C_c при заданном коэффициенте снижения скорости вторым автомобилем интервала на основной полосе движения. Из уравнений (3), (4), имея ввиду, что для формулы (3)

$$K_0 = \kappa_y(0.87 + 0.013)V_m, \text{ а}$$

$$K_2 = \kappa_{обз} \kappa_y(0.87 + 0.013)V_m \text{ или}$$

$$C_c = 1.342 C_2, \quad (21)$$

принимая $\kappa_{обз}$ – коэффициент обзорности, принимается для легковых автомобилей равным 1.8; κ_y коэффициент эксплуатационных условий торможения, принимается для легковых автомобилей равным 1.44.

Оказалось, что снижение скорости на съезде происходит при коэффициентах скорости на основном направлении от 0.7 до 0.35.

Для случая снижения скорости второго автомобиля, находящегося в зоне приемлемого интервала, и автомобиля съезда значение t_2 рассчитывается по формуле (14), но с учётом дополнительного интервала безопасности t , равного

$$t = \frac{1 - C_2}{g(m\phi + \psi)} V_m. \quad (22)$$

Например, при коэффициенте скорости на основном направлении 0.35 и скорости 60 км/час дополнительный интервал безопасности равен 1.53 с. Это время замедления скорости от V_m до $V_m C_2$. Дополнительный интервал безопасности необходим второму автомобилю приемлемого интервала для торможения. В табл. 2 и 3 приведены значения приемлемых интервалов, при различной скорости на основной полосе (60 и 80 км/ч), при различных коэффициентах скорости на основном направлении и соответствующих коэффициентах скорости на съезде.

Предложенная методика оценки скорости транспортных потоков в зоне их слияния гораздо проще и доступнее для инженеров и студентов по сравнению с рекомендуемой в [2, с. 226-229].

Таблица 2

Расчёт приемлемого интервала при скорости на основной полосе магистрали 60 км/ч и различных условиях движения

Условия движения	Коэффициент скорости	C_c	0.463	0.529	0.660	0.789	0.918	1	1	1
		C_2	0.35	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Равномерное без дополнительного интервала безопасности	t_1		2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92
	t_2		1.39	1.34	1.27	1.23	1.20	1.38	1.97	2.65
	Δt		4.31	4.26	4.19	4.15	4.12	4.30	4.89	5.57
Равномерное с дополнительным интервалом безопасности	t_1		2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92
	t_2		2.92	2.75	2.45	2.17	1.91	1.38	1.97	2.65
	Δt		5.84	5.67	5.37	5.09	4.83	4.30	4.89	5.57
Равноускоренное без дополнительного интервала безопасности	t_1		2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92
	t_2		1.39	1.34	1.27	1.23	1.20	2.14	3.11	3.81
	Δt		4.31	4.26	4.19	4.15	4.12	5.06	6.03	6.73
Равноускоренное с дополнительным интервалом безопасности	t_1		2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92	2.92
	t_2		2.92	2.75	2.45	2.17	1.91	2.14	3.11	3.81
	Δt		5.84	5.67	5.37	5.09	4.83	5.06	6.03	6.73

Таблица 3

Расчёт приемлемого интервала при скорости на основной полосе магистрали 80 км/ч и различных условиях движения

Условия движения	Коэффициент скорости	C_c	0.463	0.529	0.660	0.789	0.918	1	1	1
		C_2	0.35	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Равномерное без дополнительного интервала безопасности	t_1		3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44
	t_2		1.29	1.26	1.21	1.17	1.15	1.38	2.24	3.23
	Δt		4.73	4.70	4.65	4.61	4.59	4.82	5.68	6.67
Равномерное с дополнительным интервалом безопасности	t_1		3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44
	t_2		3.34	3.15	2.78	2.43	2.09	1.38	2.24	3.23
	Δt		6.78	6.59	6.22	5.87	5.53	4.82	5.68	6.67
Равноускоренное без дополнительного интервала безопасности	t_1		3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44
	t_2		1.29	1.26	1.21	1.17	1.15	2.39	3.77	4.77
	Δt		4.73	4.70	4.65	4.61	4.59	5.83	7.21	8.21
Равноускоренное с дополнительным интервалом безопасности	t_1		3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44	3.44
	t_2		3.34	3.15	2.78	2.43	2.09	2.39	3.77	4.77
	Δt		6.78	6.59	6.22	5.87	5.53	5.83	7.21	8.21

Выводы

На основе анализа взаимодействия автомобилей в зоне слияния транспортных потоков при различных условиях движения получены расчётные формулы для определения безопасной величины граничного интервала времени с учётом уровней удобства движения автомобилей в зоне их слияния, а также коэффициентов скорости на основном и второстепенном направлениях. Получены расчётные формулы для оценки скорости транспортных потоков в зоне их слияния с учётом параметров дорожных условий, коэффициентов эксплуатационных условий торможения автомобилей, коэффициентов снижения скорости автомобилей основного и второстепенного направлений.

Список литературы

1. Бабков В.Ф. Современные автомобильные магистрали. – М. Транспорт, 2-е изд. 1974. – 280 с.
2. Бусленко Н.П., Шрейдер Ю.А. Метод статистических испытаний. – Государственное изд. физико-математической литературы, 1961. – 226 с.
3. Крбашян В.Г. Влияние планировки пересечений в одном уровне горных автомобильных дорог на безопасность движения: дисс. к.т.н. – М. – 1983. – 210 с.
4. Лобанов Е.М. Сильянов В.В. и др. Пропускная способность автомобильных дорог. – М., Транспорт, 1970. – 152 с.
5. Шилакадзе Г.А. и др. Определение суточной интенсивности движения экспресс – способом // Автомобильные дороги. № 6, 1988, с.15.