

Н.В. Смирнова

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
Харьков, Украина

ЗАВИСИМОСТЬ МИНИМАЛЬНО БЕЗОПАСНОЙ ДИСТАНЦИИ ОТ СКОРОСТИ И ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЙ

Проведен анализ дистанций и интервалов между транспортными средствами, оценена величина безопасного интервала согласно рекомендациям по практике безопасного вождения, определена величина динамического габарита по критериям эффективности и безопасности движения. Определена вероятность наличия во встречном потоке интервала, достаточного для выполнения обгона, а также зависимость минимально безопасной дистанции между транспортными средствами от интенсивности встречного потока, его средней скорости и сцепных свойств проезжей части.

Ключевые слова: динамический габарит, интервал, дистанция, расстояние видимости, обгон, транспортное средство.

N.V. Smirnova

Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkov, Ukraine

DEPENDENCE OF THE MINIMUM SAFE DISTANCE ON THE SPEED AND ROAD CONDITIONS

The analysis of distances and intervals between vehicles has performed, value of the safe interval that recommended for safe driving was assessed, the dynamic distance on efficiency and safety movement criteria was determined. Probability of the overtaking safe interval existence in the counter flow was found. The dependency of the minimum safe distance between vehicles on the oncoming flow intensity, its mean velocity and coupling properties of the roadway was determined.

Keywords: dynamic distance, interval, distance, range of vision, overtaking, vehicle.

Моделирование движения транспортных потоков невозможно без анализа дистанций и интервалов между транспортными средствами (далее – автомобилями): дистанции характеризуют взаимное положение автомобилей в пространстве (вдоль дороги), интервалы – то же, во времени. Дистанции измерять гораздо сложнее, чем интервалы.

На двухполосных дорогах самый сложный маневр автомобилей в транспортном потоке – это обгон с выездом обгоняющего автомобиля на встречную полосу. Начиная обгон, водитель оценивает, как дале-

ко находится встречный автомобиль. Водитель начинает обгон, если во встречном потоке есть интервал, достаточный для выполнения обгона. Завершив обгон, водитель возвращается на свою полосу. Если такого интервала нет, то водитель не начинает обгон и вынужден снизить скорость до скорости впереди идущего автомобиля. Если видимость встречной полосы мала, то водитель не видит встречного автомобиля, и тоже не начинает обгон.

Для анализа дистанций необходимо на плане дороги мгновенно зафиксировать поток автомобилей (например, на аэроснимке); для анализа интервалов достаточно фиксировать секундомером моменты пересечения автомобилями контрольного створа, перпендикулярного оси дороги на выбранном участке. Подсчитав при этом интенсивность потока Q , авт./ч, найдем средний интервал между автомобилями $t_{cp} = 3600/Q$ с. Подсчитав количество автомобилей на участке 1 км – плотность потока R (авт./км), найдем среднюю дистанцию $l_{cp} = 1000/R$ м. Очевидно, что этих средних значений совершенно недостаточно для дальнейшего моделирования движения потока.

Поэтому прежде всего определим минимально безопасные дистанции и интервалы (рис. 1).

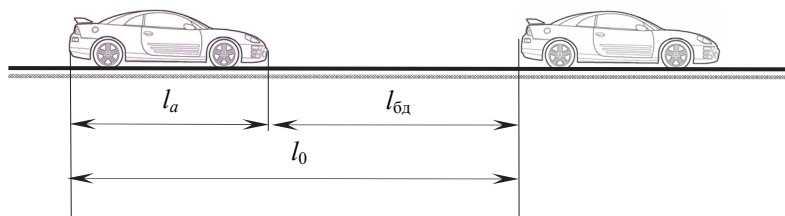


Рис. 1. Статический l_a и динамический l_0 габариты автомобиля

С минимально безопасной дистанцией (БД) $l_{бд}$ на рис. 1 связано понятие динамического габарита автомобиля l_0 . Водитель должен соблюдать БД для обеспечения безопасного движения за впереди идущим автомобилем и может уменьшать ее лишь при маневрах смены полосы для выполнения обгона. Величина БД, главным образом, зависит от скорости движения, времени реакции водителя и сцепных свойств проезжей части. Если по мере приближения к впереди идущему автомобилю фактическая дистанция до него становится меньше величины БД, ранее выбранной водителем, то он вынужден снижать ско-

рость и тем самым корректировать БД для обеспечения безопасного движения. Таким образом, БД в совокупности со статическим габаритом l_a – это «виртуальная» длина автомобиля при движении, его динамический габарит l_0 . С уменьшением скорости величина БД сокращается и достигает минимальной дистанции запаса $l_{зап}$ в заторах. Поэтому максимальную плотность потока можно определить величиной $R_{max} = 1000/(l_a + l_{зап})$ авт./км. Согласно рекомендациям безопасного вождения расстояние $l_{зап}$ до впереди движущегося автомобиля должно быть не менее 1–1,5 м, а между автобусом или троллейбусом и грузовым автомобилем большой грузоподъемности – не менее 3–4 м.

Режим движения потока с дистанциями, равными динамическому габариту l_0 , – это режим пропускной способности с интенсивностью Q_{max} . Очевидно, что пропускной способности соответствует плотность потока $R_m = 1000/l_0$. Поскольку величина l_0 зависит от скорости, то и пропускная способность Q_{max} и соответствующая ей плотность потока R_m также зависят от скорости потока.

Как показано на рис. 2, при плотности потока R меньше R_m (или соответственно при интенсивности меньше Q_{max}) дистанции между автомобилями больше динамических габаритов за счет свободных дистанций $l_{св}$.

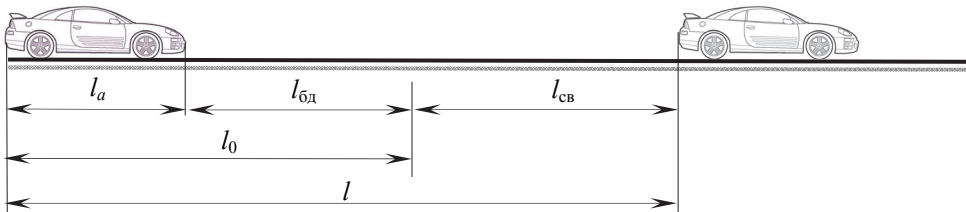


Рис. 2. Дистанции при интенсивности потока меньше пропускной способности

В общем случае дистанция между автомобилями – это сумма динамического габарита l_0 и свободной дистанции $l_{св}$.

При известных средних значениях l_0 и $l_{св}$ плотность потока

$$R = 1000 / (l_0 + l_{св}) \text{ авт./км} \quad (1)$$

или

$$r = 1 / (l_0 + l_{св}) \text{ авт./м.} \quad (2)$$

Каждой дистанции в пространстве соответствует интервал во времени по известной зависимости (принимая постоянной скоростью v прохождения дистанции) $t = l/v$, с теми же индексами: минимально безопасный интервал $t_{бд}$, динамический габарит t_0 , свободный интервал $t_{св}$ и т.д. В дальнейшем будем полагать, что для любого автомобиля в любой точке дороги и в любой момент времени лишь свободный интервал $t_{св}$ является случайной величиной; все остальные присущие автомобилю интервалы (и соответствующие дистанции) функционально зависят от скорости движения и показателей дорожных условий.

Величину динамического габарита l_0 чаще всего оценивают по расстоянию S_0 , которое проходит автомобиль до полной остановки перед препятствием:

$$S_0 = S_p + S_T + S_3, \quad (3)$$

где S_p – путь, пройденный за время реакции водителя; S_T – путь торможения; S_3 – запас.

Такие оценки используют для нормирования минимального расстояния видимости дороги, обоснования минимальных радиусов вертикальных выпуклых кривых, а также обоснования конструктивных решений при проектировании дорог и т.п. [1, 2]. По сути, аналогичный подход положен в основу экспертных расчетов при расследовании ДТП:

$$S_0 = S_p + S_2 + S_3 + S_4, \quad (4)$$

где S_2 – путь, пройденный за время запаздывания срабатывания тормозной системы; S_3 – путь, пройденный за время нарастания замедления j до максимального; S_4 – путь движения юзом с максимальным замедлением j .

При проектировании дорог тормозной путь рассчитывают из того условия, что кинетическая энергия mv^2 в начале торможения полностью расходуется на работу $S_T(P_{mk} + P_i + P_f + P_w)$ сил сопротивления движению на пути торможения, что дает $S_T = v^2/(2g(\phi + i + f))$. При экспертизе ДТП [3] путь движения юзом, как неуправляемого движения с заблокированными колесами, в формуле (4) рассчитывают из условия равнозамедленного движения до остановки с замедлением j , что дает $S_{ю} = v^2/(2j)$. Величину расчетного максимального замедления j_{max} при ДТП оценивают из равенства силы инерции mj силе сцепления колес с проезжей частью ϕG (m и G – масса и вес автомобиля), что дает $j_{max} = \phi \cdot g$.

Практикуемые оценки динамического габарита l_0 по остановочному пути S_0 не соответствуют ситуациям движения автомобилей в потоке:

- *во-первых*, а) зависимости (3) и (4) основаны на полном использовании сцепных свойств проезжей части и максимальном замедлении автомобиля (случай экстренного торможения), б) при движении в потоке при взаимодействии с другими автомобилями водитель практически всегда применяет служебное торможение с частичным использованием сцепных свойств и замедлением j в 2–5 раз меньше максимально возможного j_{\max} ;

- *во-вторых*, а) зависимости (3) и (4) предусматривают полную остановку автомобиля, б) при движении в потоке полная остановка предусмотрена только за пределами транзитной полосы движения или в экстренных случаях ДТП или при плотности потока, близкой к насыщению (затору);

- *в-третьих*, а) в зависимости (3) препятствие неподвижное, б) при движении в потоке водитель реагирует на движущийся впереди автомобиль и на режим его движения, в первую очередь на «стоп-сигналы», управляемые впереди движущимся водителем; если передний автомобиль тормозит, то и следующий за ним – тоже, т.е. автомобили тормозят совместно.

С учетом изложенного для оценки величины динамического габарита l_0 исследуем массовый случай, когда автомобиль догнал впереди идущего и для безопасного движения водитель принял дистанцию $l_{\text{бд}}$ от бампера своего автомобиля до заднего бампера впереди идущего автомобиля. Таким образом, при скорости v (м/с) динамический габарит

$$l_0 = l_a + l_{\text{бд}} = l_a + vt_{\text{бд}}. \quad (5)$$

Величину безопасной дистанции $l_{\text{бд}}$ (равной $vt_{\text{бд}}$) водитель принимает такой, чтобы не «пропустить» момент торможения впереди идущего автомобиля, т.е. водитель реагирует на «стоп-сигналы» так, чтобы не запоздать с необходимым торможением. Согласно такой общепринятой практике вождения время движения по отрезку динамического габарита – это минимально безопасный интервал t_0 во времени между автомобилями в потоке, т.е.

$$t_0 = l_a / v + t_{\text{бд}}. \quad (6)$$

Величину безопасного интервала $t_{бд}$ и безопасной дистанции $l_{бд}$ оценим также согласно рекомендациям по практике безопасного вождения и одновременного (с учетом реакции на «стоп-сигналы») торможения с передним автомобилем [4]. При сухом покрытии (коэффициент сцепления шины с дорожным покрытием $\varphi = 0,4 \dots 0,6$) рекомендуется «держат дистанцию в метрах, равную половине скорости в километрах», т.е. принимать $l_{бд} = v \cdot 3,6/2$ и тогда $t_{бд} = l_{бд} / v \approx 2$ с; при загрязненном и мокром покрытии ($\varphi = 0,2 \dots 0,3$) рекомендуется «держат дистанцию в метрах, равную скорости в километрах», т.е. $t_{бд} \approx 4$ с; при скользком покрытии, гололеде ($\varphi = 0,05 \dots 0,15$) «держат дистанцию, равную удвоенной скорости в километрах», т.е. $t_{бд} \approx 8$ с. Представим эти рекомендации в виде таблицы, в которой не заполнены ячейки для реальных скоростей при грязном и мокром покрытии и гололеде.

Зависимость безопасной дистанции от коэффициента сцепления

Коэффициент сцепления	Безопасная дистанция, м, в зависимости от скорости, км/ч									Интервал $t_{бд}$, с все скорости
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	
0,4–0,6	10	20	30	40	50	60	70	80	90	1,8 (0,55)
0,2–0,3	20	40	60	80	100	120	140	–	–	3,6 (0,28)
0,05–0,15	40	80	120	160	–	–	–	–	–	7,2 (0,14)

Интервалы между автомобилями в потоке неравномерны во времени и в пространстве. Количество интервалов, достаточных для выполнения различных маневров обгона, встраивания в транзитный поток на перекрестках или при слиянии полос и т.п., определяет скоростные режимы отдельных автомобилей и транспортных потоков в целом, а также величину пропускной способности отдельных участков дорог с учетом возможностей выполнения указанных маневров. В решении этих задач используются закономерности распределения вероятностей интервалов между автомобилями в потоке.

В любой точке дороги и в любой момент времени интервалы между автомобилями случайны. Проще было бы моделировать движение потока при постоянных интервалах. Именно таков традиционный подход к расчету пропускной способности при проектировании дорог. При этом считают, что все автомобили потока движутся с постоянной скоростью и с постоянными дистанциями и интервалами.

Такая «колонная» модель потока совершенно не соответствует структуре потока при интенсивностях меньше пропускной способности. Реальный поток при таких интенсивностях неоднороден по скоростям и неравномерен во времени и в пространстве. Кроме того, при постоянных интервалах лишь в отдельные редкие дни организованного движения колонн однородных автомобилей улучшается регулярность потока, однако полной синхронности движения автомобилей не отмечается. Если бы представилась возможность решить эту задачу, перед участниками движения возникли бы непреодолимые трудности из-за невозможности выполнять обгоны и смены рядов движения. Это можно пояснить на следующем примере. Водитель выполняет обгон в среднем за 10 с. Если принять, что скорость встречного автомобиля такая же, как обгоняющего, то для безопасного обгона необходим интервал между автомобилями встречного потока не менее 20 с. При регулярном движении встречного потока обгоны стали бы невозможны, если бы интенсивность потока превысила $3600/20 = 120$ авт./ч. Все автомобили потока прямого направления достигли бы скорости самого тихоходного автомобиля и ждали бы окончания участка с регулярным движением. На двухполосных дорогах именно неравномерность интервалов между автомобилями дает возможность водителям существенно сокращать время движения вследствие наличия во встречных потоках больших интервалов (больше среднего), достаточных для обгонов.

Таким образом, для адекватного моделирования движения транспортного потока необходимо описывать распределение неравномерных интервалов между автомобилями методами теории вероятностей. Полную информацию о распределении интервалов дает функция плотности распределения вероятностей. Впервые *Kinzer* (1933), *Adams* (1936) и *Greenshilds* (1947) обратили внимание на случайный характер распределения интервалов в автомобильном потоке и для их описания использовали закон Пуассона. И в настоящее время распределение интервалов между автомобилями описывают экспоненциальным распределением

$$h(t) = qe^{-qt}, \quad (7)$$

где $h(t)$ – плотность распределения вероятностей интервалов между автомобилями; q – интенсивность потока, авт./с, при известной часовой интенсивности $q = Q/3600$.

Экспоненциальное распределение интервалов $h(t)$ – это свойство пуассоновского (простейшего) потока. Согласно закону Пуассона вероятность появления точно k автомобилей в интервале t

$$p(k) = \frac{(pt)^k}{k!} e^{-pt}. \quad (8)$$

Принимая $k = 0$ (нет ни одного автомобиля в интервале t) и учитывая, что $0! = 1$, получают $p(0) = e^{-pt}$, что совпадает с вероятностью $P(\xi > t)$ из формулы (7):

$$P(\xi > t) = \int_t^\infty p e^{-p\xi} d\xi = e^{-pt}. \quad (9)$$

Пуассоновская модель распределения интервалов не согласуется с действительностью, так как предполагает существование в потоке интервалов менее динамического габарита t_0 (заштрихованная часть на рис. 3). Такие малые интервалы не соответствуют критерию безопасности движения, и необходима другая, более адекватная модель, не допускающая интервалов менее t_0 .

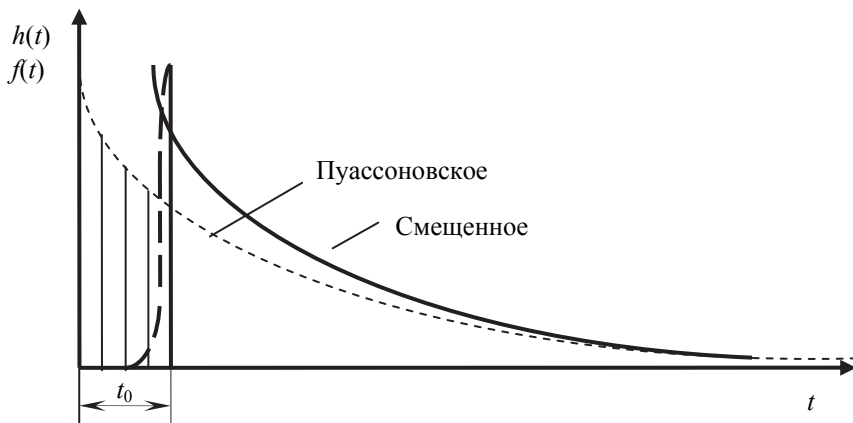


Рис. 3. Пуассоновское и смещенное распределение интервалов в потоке

Такая модель может быть названа смещенным экспоненциальным распределением. В пуассоновском распределении $t > 0$, а в смещенном $t > t_0$; в смещенном также присутствует экспоненциальная часть, что позволяет записать выражение для плотности смещенного распределения в виде

$$f(t) = q' e^{-q'(t-t_0)}, \quad (10)$$

где q' – параметр смещенного распределения, имеющий ту же размерность, что и q , т.е. авт./с.

Определим физический смысл параметра q' и найдем его связь с параметром q . Часовая интенсивность Q определяется как количество автомобилей Q в единице времени 1 ч. В этом временном интервале выделим все минимально безопасные интервалы t_0 , в одном часе они занимают часть qt_0 или Qt_0 , с. Оставшаяся часть часа $1 - qt_0$ или $(3600 - Qt_0)$ с – это все свободные интервалы, и их количество тоже равно Q . Интенсивность свободных интервалов логично определять отношением их количества (это Q) к тому отрезку времени, который они занимают, т.е. как отношение Q к $(3600 - Qt_0)$. Обозначим эту интенсивность как q' ; она имеет размерность авт./с. Поделим и числитель, и знаменатель в этом отношении на 3600, и, учитывая, что $Q/3600 = q$, получим выражение для q' – интенсивности свободных интервалов (авт./с):

$$q' = \frac{q}{1 - qt_0}. \quad (11)$$

Поскольку для транспортных потоков размерность интенсивности свободных интервалов q' – это авт./с, то величину q' часто называют фиктивной интенсивностью потока.

Переходя к определению плотности как количеству R автомобилей потока на отрезке 1 км (r , авт./м), учитываем, что в реальном потоке среднее расстояние между автомобилями $l = 1000/R$ (или $l = 1/r$), а средняя величина свободного расстояния $l_{св}$ (см. рис. 2), такая, что $l_{св} = l - l_0$. Эти соотношения аналогично (11) дают выражение для фиктивной плотности потока (авт./м):

$$r' = \frac{r}{1 - rl_0}. \quad (12)$$

Вследствие многих случайных факторов величина t_0 для каждого автомобиля отклоняется от среднего значения, и поэтому реальная граница плотности слева не отвесная, а такая, как показано на рис. 3 пунктиром. Нетрудно убедиться в корректности выражения (10), так как соблюдается известное условие равенства единице интеграла по плотности распределения вероятностей:

$$P(t_0 < t < \infty) = \int_{t_0}^{\infty} q' e^{-q'(t-t_0)} dt = 1. \quad (13)$$

Другими словами, если пуассоновское распределение описывает распределение интервалов, считая автомобили идеально малыми точками, такими, что $t_0 = 0$, то смещенное распределение описывает распределение интервалов (свободных) между «большими» точками, размер которых на оси времени равен реальным t_0 (не нулевым). Поэтому параметр смещенного распределения q' можно назвать фиктивной интенсивностью и поток таких больших точек можно считать пуассоновским.

Такая уточненная модель распределения интервалов позволяет оценить возможность выполнения обгонов, что необходимо для моделирования движения транспортных потоков на участках дорог с различными дорожными условиями.

Вероятность наличия во встречном потоке интервала $\tau_{\text{обг}}$ между автомобилями, достаточного для выполнения обгона, находится интегрированием (13) в соответствующих пределах:

$$p_{\tau_{\text{обг}}} = \int_{\tau_{\text{обг}}}^{\infty} q'_{\text{л}} e^{-q'_{\text{л}}(t-t_{\text{ол}})} dt = e^{-q'_{\text{л}}(\tau_{\text{обг}}-t_{\text{ол}})}, \quad (14)$$

где $t_{\text{ол}}$ – безопасный интервал между автомобилями на встречной полосе при средней скорости потока на этой полосе $v_{\text{л}}$; $q'_{\text{л}}$ – фиктивная интенсивность потока на встречной полосе.

Величина

$$t_{\text{ол}} = \frac{l_a}{v_{\text{л}}} + \frac{1}{\phi}, \quad (15)$$

где l_a – средняя длина автомобиля в потоке; ϕ – коэффициент сцепления.

Для расчета по формуле (14) численных значений вероятности наличия во встречном потоке интервала $\tau_{\text{обг}}$ между автомобилями, достаточного для выполнения обгона, предварительно найдем время обгона на $t_{\text{обг}}$ согласно схеме обгона на рис. 4.

За время обгона $t_{\text{обг}}$ обгоняющий автомобиль пройдет путь

$$S_{\text{обг}} = S_2 + S_{12} + S_1, \quad (16)$$

где S_2 – дистанция следования обгоняющего автомобиля за обгоняемым в момент начала обгона, $S_2 = v_2 \cdot t_0$; S_1 – дистанция следования об-

гоняемого автомобиля за обгоняющим в момент окончания обгона, $S_1 = v_1 \cdot t_0$; S_{12} – путь, пройденный обгоняемым автомобилем за время обгона $t_{обг}$, $S_{12} = v_1 \cdot t_{обг}$; $S_{обг}$ – путь, пройденный обгоняющим автомобилем за время обгона $t_{обг}$, $S_{обг} = v_2 \cdot t_{обг}$.

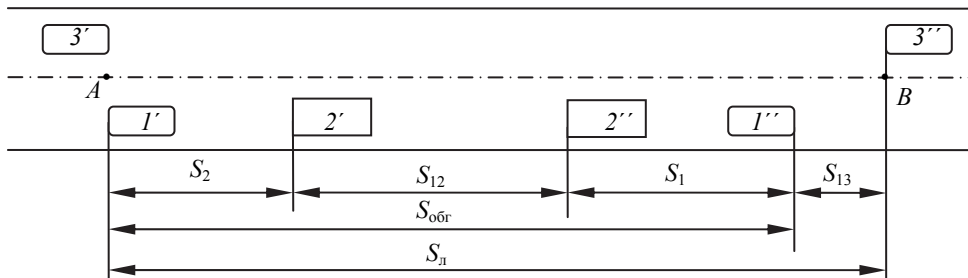


Рис. 4. Схема к расчету времени обгона: 1 – обгоняемый автомобиль; 2 – обгоняющий; 3 – встречный; один штрих – положение в момент начала обгона, два штриха – в его конце

Для безопасного обгона должно выполняться условие: на расстоянии $S_{л}$ на встречной, левой, полосе не должно быть автомобилей встречного потока; это расстояние от точки A , в которой разминулись автомобили 2 и 3', до точки B , в которой находится встречный автомобиль 3'' в конце обгона.

Величину безопасного интервала t_0 , соответствующего дистанциям S_1 и S_2 , примем равным среднему значению для всех автомобилей потока прямого направления при его средней скорости. При вычислении среднего значения $t_{обг}$ принято, что средняя скорость обгоняемого автомобиля $v_1 \approx 0,5(v_2 - v_{min})$, так как обгоняющий автомобиль обгоняет все автомобили, скорость которых ниже v_2 , в том числе и самые тихоходные, скорость которых близка к нулю и скорость которых находится в диапазоне от v_{min} до v_2 . Упрощая, т.е. принимая $v_{min} \approx 0$, получим $v_1 \approx 0,5v_2$. Подставляя это значение в (16) и решая полученное уравнение, найдем, что $t_{обг} = t_0(v_2 + v_1)/(v_2 - v_1)$, а при $v_1 \approx 0,5v_2$ получим $t_{обг} \approx 3t_0$. Учитывая, что в конце обгона (см. рис. 4) между обгоняющим и встречным автомобилями должна быть обеспечена безопасная дистанция S_{13} , и оценивая интервал во времени, соответствующий этой дистанции, величиной t_0 , окончательно получим величину интервала $t_{обг}$ между автомобилями во встречном потоке, достаточного для выполнения обгона:

$$\tau_{\text{обг}} \approx 4t_0 = 4(l_a / v + 1 / \varphi). \quad (17)$$

Анализ всех факторов, определяющих величину этого интервала и вероятность его наличия в потоке, показывает их зависимость в основном от интенсивности встречного потока, его средней скорости и сцепных свойств проезжей части. Вероятность наличия во встречном потоке интервала $\tau_{\text{обг}}$, достаточного для выполнения обгона, находится по формуле (14) как зависимость этой вероятности от интенсивности встречного потока и интервала $\tau_{\text{обг}}$.

Список литературы

1. Белятынский А.А., Таранов А.М. Проектирование кривых при строительстве и реконструкции автомобильных дорог. – Киев: Вища школа, 1989.
2. Бируля А.К. Исследование закономерностей автомобильного движения для установления расчетных характеристик проектируемых дорог // Труды Харьковского автомобильно-дорожного института. – 1962. – Вып. 9. – С. 8–20.
3. Илларионов В.А. Экспертиза дорожно-транспортных происшествий: учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1989. – 255 с.
4. Циганков Е.С. Золотые правила безопасного вождения. – М., 2007. – 49 с.

References

1. Beliatynskii A.A., Taranov A.M. Proektirovanie krivykh pri stroitel'stve i rekonstruktsii avtomobil'nykh dorog [Design curves in the construction and reconstruction of roads]. Kiev: Vishcha shkola, 1989.
2. Birulia A.K. Issledovanie zakonomernostei avtomobil'nogo dvizheniia dlia ustanovleniia raschetnykh kharakteristik proektiruemykh dorog [Study traffic patterns to determine the design characteristics of the proposed roads]. *Trudy Khar'kovskogo avtomobil'no-dorozhnogo institute*, 1962, vol. 9, pp. 8-20.
3. Illarionov V.A. Ekspertiza dorozhno-transportnykh proisshestvii [Examination of road accidents]. Moscow: Transport, 1989, 225 p.
4. Tsigankov E.S. Zolotyie pravila bezopasnogo vozhdneniia [The Golden rules of safe driving]. Moscow, 2007, 49 p.

Получено 15.10.2014

Об авторах

Смирнова Наталья Владимировна (Харьков, Украина) – кандидат технических наук, доцент кафедры изысканий и проектирования дорог и аэродромов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (61002, Украина, г. Харьков, ул. Петровского, 25, e-mail: nataliav-smirnova@yandex.ua).

About the authors

Smirnova Natal'ia Vladimirovna (Kharkov, Ukraine) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Researches and Designing of Highways and Airports, Kharkiv National Automobile and Highway University (25, Petrovskii st. Kharkov, 61002, Ukraine, e-mail: nataliav-smirnova@yandex.ua).