

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОЛОСЫ ДВИЖЕНИЯ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ И ГОРОДСКИХ УЛИЦАХ

Наглюк И.С., Макаричев А.В., Горбачёв П.Ф., Горбачёва Е.А., ХНАДУ

**Аннотация.** Приведен новый подход к определению пропускной способности полосы движения на автомобильных дорогах и городских улицах, основанный на вероятностной оценке минимальной дистанции между автомобилями, выбираемой водителями в плотном транспортном потоке.

**Ключевые слова:** пропускная способность, полоса движения, динамический габарит, случайная величина, закон распределения.

### Вступление

Пропускная способность (ПС) полосы движения (ПД) на автомобильных дорогах и городских улицах является важнейшим показателем, характеризующим функционирование путей сообщения автомобильного транспорта. Он необходим для выполнения работ по проектированию, строительству и ремонту автомобильных дорог (АД), значения ПС используются при выборе рациональных вариантов организации дорожного движения (ОДД) и при решении других вопросов планирования развития автомобильных дорог.

Ещё одним важным вариантом использования ПСПД является аналитическое моделирование городских или региональных транспортных систем. В таких моделях она используется для расчёта скорости транспортных средств (ТС) в потоке и перераспределения транспортных потоков (ТП).

Значение ПС в транспортных моделях сложно переоценить, так как оно оказывает решающее влияние на основные этапы расчётов в них. Повышение уровня точности существующих транспортных моделей за счёт объективного подхода к расчёту ПСПД, создающего возможности для определения параметров модели с помощью натуральных наблюдений, является актуальным вопросом.

### Анализ публикаций

Общепринятое определение ПСПД сводится к тому, что под этой величиной понимают максимально возможное количество автомобилей, которое может пройти через поперечный разрез полосы за единицу времени. Обычно для ее характеристики используется детерминированная оценка максимального количества ТС, приведенных к

легковому автомобилю. Базовой величиной для всех расчетов является ПС прямого участка ПД без поперечных и продольных наклонов, неограниченной длины и шириной не менее нормативного значения 3,75 м, укрепленных обочинами шириной не менее 3 м, сухим, ровным, шероховатым покрытием, расстоянием видимости более 800 м, при благоприятных погодных-климатических условиях (эталонная полоса). К настоящему времени разработано большое количество математических моделей для расчёта ПСПД, которые в большей степени отражают субъективные взгляды авторов, чем объективную характеристику дорожной инфраструктуры, которую можно использовать в соответствующих транспортных расчётах.

Это утверждение вполне относится и к нормативной литературе, в которой в качестве ПСПД городской магистрали непрерывного движения принимается значение расчётной интенсивности в 1200 прив. авт./ч [2]. При этом общепринятым в мире и в Украине, в том числе, значением потока насыщения, который представляет собой интенсивность разезда автомобилей с регулируемого перекрёстка на разрешающий сигнал светофора, является значение 1900 прив. авт./ч [1]. То есть расчётная ПСПД без пересечений с другими потоками более чем в полтора раза ниже интенсивности движения (ИД), достигаемой участниками движения при разгоне с нулевой скорости за ограниченное время. Априори очевидным является тот факт, что отсутствие ограничений по скорости и времени достижения участниками движения желаемой скорости и дистанции до предыдущего автомобиля в потоке может привести к увеличению ИД потока разъезжающихся от

светофора автомобилей на свободной от всяких помех ПД.

Это противоречие подтверждается достаточно свежими исследованиями фактической ИД на междугородных автомагистралях, проведенными в США [1] и Австралии [3]. В первом случае фактическая ИД колеблется в значительных пределах от 1460 авт./ч в Балтиморском тоннеле «Форт Макгенри» до 2650 авт./ч на четырёхполосной магистрали в Вирджинии. И тут, с одной стороны, нужно учитывать, что тоннель не обеспечивает идеальных условий движения, а с другой стороны, то, что приведенные значения отражают фактическую ИД, а не её максимальное значение, т.е. ПСПД. И второй факт подтверждается очевидной тенденцией к снижению зафиксированных значений ИД с увеличением количества полос на автомагистрали [1]. Из этого можно сделать вывод о близости ПСПД на междугородной магистрали в США к 2700 авт./ч. Во втором отчёте приводится значительно более узкий диапазон значений – от 1900 до 2100 авт./ч [3]. Однако и эти данные подтверждают возможность превышения пропускной способностью ПД интенсивности потока насыщения.

Однако результаты наблюдений в [1] и [3] являются только иллюстрацией реального процесса движения ТП на автомагистралях, не показывают причин достижения зафиксированных значений, не гарантируют их повторения в других наблюдениях и потому не могут использоваться в качестве расчётного значения ПСПД на междугородных автомагистралях, тем более на городских улицах.

Поэтому рядом авторов были сделаны попытки оценить реальную ПСПД с помощью имитационного моделирования процесса движения ТС по магистрали [4–6]. Эти исследования показали, что ПСПД на автомагистралях может значительно отличаться от украинских нормативов и даже на скорости ТП, равной 60 км/ч, значительно превышать уровень в 2000 авт./ч [4]. К сожалению, теоретическое обоснование полученных результатов на уровне руководства по использованию VISSIM не позволяет считать полученные результаты надёжной основой для определения ПСПД.

#### **Цель и постановка задачи**

Целью работы является теоретическая оценка ПСПД на автомобильных дорогах и городских улицах, основанная на объективных характеристиках ТП и очевидных допу-

щениях и создающая возможность бесспорного прогнозирования ПС для эталонной ПД.

Достижение поставленной цели возможно за счёт отказа от попыток точной оценки искомого значения и перехода к интервальной характеристике ПС. При этом основой для расчёта ПС должна стать объективная оценка решений о скорости и дистанции до впереди следующего автомобиля, принимаемых водителями в составе плотного ТП. Именно эти решения, а не время реакции водителей или длина тормозного пути автомобиля при экстренном торможении, определяют динамический габарит каждого автомобиля в потоке и ПСПД в целом.

Хотя характеристики тормозных качеств автомобиля, безусловно, оказывают влияние на выбор скорости и дистанции движения, но сами решения являются субъективными и, с учётом большого количества участников движения, должны рассматриваться как случайные величины. Последнее утверждение в полной мере относится к дистанции до впереди идущего автомобиля, а вот скорость движения вполне можно использовать в качестве аргумента функции распределения случайной дистанции.

Такая возможность основывается на допущении о незначительных колебаниях скорости движения ТС в условиях плотного потока. В самом деле, в плотном потоке участники движения обычно соблюдают скорость ТП на полосе движения, а приближение к желаемой водителем скорости движения в таких условиях осуществляется за счёт выбора соответствующей ПД.

#### **Построение математической модели ПСПД**

Для получения теоретической оценки ПСПД процесс движения ТС в потоке рассматривается с точки зрения неподвижного наблюдателя, находящегося на обочине автодороги.

Процесс движения автомобилей даже по одной полосе представляет собой довольно сложное явление. ТС могут двигаться друг за другом на разных дистанциях с разными скоростями, отставая от впереди идущего автомобиля, или же до определенной дистанции приближаясь к нему. Даже если автомобили движутся с равными скоростями, то дистанции между соседними автомобилями могут отличаться друг от друга в зависимости от предпочтений их водителей и состояния их ТС. С точки зрения неподвиж-

ного стороннего наблюдателя или фиксирующего технического устройства, процесс движения ТС по одной полосе в одном направлении и без обгонов представляется как процесс смены временных интервалов. На одном из них автомобиль в перпендикулярном сечении перед наблюдателем на полосе движения отсутствует, т.е. в перпендикулярном сечении полоса свободна. А на соседнем временном интервале автомобиль перед наблюдателем в перпендикулярном сечении на полосе имеет место быть. Такое чередование временных промежутков появления автомобиля перед наблюдателем в перпендикулярном сечении на полосе и его отсутствия может быть описано с точки зрения альтернирующих процессов восстановления. В нем чередуются периоды времени, когда перпендикулярное сечение полосы перед наблюдателем свободно от автомобилей, и периоды занятости его корпусом автомобиля.

Таким образом, процесс движения автомобилей по полосе можно представить как поле связанных с местоположением сторонних наблюдателей альтернирующих процессов отсутствия и присутствия автомобилей перед наблюдателем. Циклом наблюдения при этом является продолжительность пары соседних промежутков времени в этом альтернирующем процессе. Он состоит из свободного периода и периода занятости автомобилем полосы перед наблюдателем. По окончании предыдущего цикла начинается следующий цикл и так далее. Считается, что продолжительности циклов являются положительными, одинаково распределенными случайными величинами  $\zeta$ , а наборы продолжительностей  $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n, \dots$  непересекающихся циклов являются независимыми в совокупности.

Случайная величина продолжительности цикла складывается, во-первых, из времени проезда ТС своего габарита, то есть продолжительности периода занятости автомобилем полосы перед наблюдателем, которая определяется как отношение длины транспортного средства  $L(\omega)$  к скорости движения  $V$

$$\gamma = \frac{L(\omega)}{V}. \quad (1)$$

Пусть скорость движения ограничена сверху величиной  $V_{\max}$ ,  $V \leq V_{\max}$ , а математическое ожидание длины транспортного

средства равно  $L_1 = ML(\omega)$ . Тогда минимум среднего времени периода занятости

$$\gamma_1(V_{\max}) = \frac{L_1}{V_{\max}} \quad (2)$$

полосы перед наблюдателем определяет величину, обратную максимуму величины

$$I_1(V_{\max}) = \frac{V_{\max}}{L_1}, \quad (3)$$

т.е. числа транспортных средств, проезжающих за единицу времени мимо наблюдателя со скоростью  $V$  с габаритом  $L_1$ , равным средней длине ТС

$$\max_{V \leq V_{\max}} I_1(V) = \max_{V \leq V_{\max}} \frac{V}{L_1} = \frac{V_{\max}}{L_1} = I_1(V_{\max}). \quad (4)$$

Эта величина по существу является абсолютной верхней оценкой ПСПД. Она равна максимальному числу автомобилей длины  $L_1$ , проезжающих за единицу времени на максимальной скорости мимо наблюдателя без зазора между автомобилями, как одно целое. Эта величина является обратной времени проезда средней длины транспортного средства на максимальной скорости

$$I_{1,\max} = \left( \frac{L_1}{V_{\max}} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Само собой разумеется, без жесткого сцепления автомобилей, как, например, вагонов в поезде, вряд ли удастся достигнуть безопасности такого движения, да и ПД вряд ли позволит это осуществить. Для безопасного движения автомобилей в полосе со скоростью  $V$  необходимо обеспечить хотя бы какое-то минимальное расстояние между автомобилями, которое является вторым элементом случайной величины продолжительности цикла альтернирующего процесса

$$R_{\min} = V \cdot T_d, \quad (6)$$

где  $T_d$  – разница во времени между началом торможения заднего и переднего автомобилей. Включает в себя время реакции водителя и время срабатывания тормозной системы заднего автомобиля.

Дистанция  $R_{\min}$  позволяет за время задержки  $T_d$ , начать торможение автомобиля, следующего за начавшим в нулевой момент времени торможение впереди идущим автомобилем. И двигаясь, согласно закону движения, за впереди идущим автомобилем со сдвигом во времени на величину  $T_d$  продолжать безопасное движение с соблюдением заданного минимального зазора между автомобилями  $d_1$  вплоть до их полной остановки.

Время задержки  $T_d$  включает в себя время реакции водителя и срабатывания тормозной системы автомобиля.

Продemonстрируем такие законы движения в случае начала равнозамедленного, с замедлением  $a$ , движения впереди идущего автомобиля. Пусть

$$S(0) = L_1 + d_1. \quad (7)$$

Запишем выражение для минимального отклонения положения соседних автомобилей в движении со скоростью  $V$  по полосе

$$D_{\min} = D(0) = S(0) + S_d(V) = S(0) + V \cdot T_d, \quad (8)$$

где  $S_d(V) = V \cdot T_d$  – проезжаемое со скоростью  $V$  расстояние за время задержки  $T_d$  сзади идущим автомобилем.

Пусть  $X_1(t)$  – координата носа первого автомобиля в момент времени  $t$  и  $X_1(0) = D_{\min}(0)$ . В момент времени  $t=0$  передний автомобиль начал торможение со скорости  $V$  с замедлением  $a$ . Закон его движения от момента  $t=0$  до момента  $t_{1,stop}$  его полной остановки имеет вид

$$X_1(t) = \begin{cases} D(0) + Vt - a \frac{t^2}{2}, & 0 \leq t \leq t_{1,stop} = \frac{V}{a} \\ D(0) + \frac{V^2}{2a}, & t_{1,stop} \leq t \end{cases}. \quad (9)$$

Второй автомобиль с координатой  $X_2(t)$  в момент времени  $t$  в начальный момент времени  $t=0$  имел координату  $X_2(0) = 0$  и двигался со скоростью  $V$  вплоть до момента времени  $T_d$ . Второй автомобиль начал аналогичное торможение спустя время  $T_d$  задержки, и его закон движения имеет вид

$$X_2(t) = \begin{cases} Vt, & 0 \leq t \leq T_d \\ Vt - \frac{a(t-T_d)^2}{2} = \\ = T_d + \frac{V}{a}, & T_d \leq t \leq t_{2,stop}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $t_{2,stop}$  – момент полной остановки второго автомобиля. Разность в местоположении второго и первого автомобилей на полосе определяется как разность

$$D(t) = X_2(t) - X_1(t), \quad (11)$$

и закон ее изменения с течением времени имеет вид (12).

Выходя из зависимости (12), разность в местоположениях первого и второго автомобилей в момент их полной остановки  $t_{2,stop}$  равна их так называемому статическому габариту  $S(0)$ , (13).

То есть различие в местоположении соседних автомобилей на величину  $D_{stop} = S(0) + VT_d$  в движении по полосе со скоростью  $V$  дает возможность получить относительный максимум ИД только при ограничении на скорость движения  $V \leq V_{\max}$ .

$$D_{\min}(t) = \begin{cases} D(0) - \frac{at^2}{2}, & 0 \leq t \leq T_d \\ D(0) - \frac{at^2}{2} + \frac{a(t-T_d)^2}{2}, & T_d \leq t \leq t_{1,stop} = \frac{V}{a} \\ D(0) - \frac{V^2}{2a} + \frac{a(t-T_d)^2}{2}, & t_{1,stop} \leq \\ \leq t \leq t_{2,stop} = T_d + t_{1,stop} = T_d + \frac{V}{a}, \end{cases} \quad (12)$$

$$D(t_{2,stop}) = D(0) + \frac{V^2}{2a} - V\left(T_d + \frac{V}{a}\right) + \frac{a(t_{2,stop} - T_d)^2}{2} = D(0) - VT_d = S(0). \quad (13)$$

Значение ПСПД равно величине, обратной отношению значения  $D_{stop}$  к величине  $V_{\max}$

$$\begin{aligned}
 I_{2,\max} &= \left[ \inf_{V \leq V_{\max}} \left( \frac{D_{\text{stop}}}{V} \right) \right]^{-1} = \\
 &= \left[ \inf_{V \leq V_{\max}} \left( \frac{S(0)}{V} + T_d \right) \right]^{-1} = \quad (14) \\
 &= \left[ \frac{S(0)}{V_{\max}} + T_d \right]^{-1} = \frac{V_{\max}}{S(0) + T_d V_{\max}}.
 \end{aligned}$$

Это значение представляет собой верхнюю оценку ПСПД, которая в реальности может быть достигнута только в случае очень однородного состава участников движения, склонных к рискованному стилю вождения. Эта ПСПД является монотонно возрастающей функцией с пределом  $T_d^{-1}$ , то есть рост скорости ТП будет всегда приводить к повышению этой оценки ПСПД, рис. 1.

Возможно, что именно такой состав ТП из водителей, склонных к риску, обеспечил величину ИД, равную 2650 авт./ч на четырёхполосной магистрали в Вирджинии [1], которую в этом случае нужно принимать в качестве ПСПД. Однако состав водителей и их способ вождения, которые реализуются в набор дистанций между автомобилями в плотном ТП, являются предметом дальнейших исследований. В данной работе оценка [1] принимается как некое очень высокое значение ПСПД, значение которой в реальности будет меньше для большинства автодорог и городских улиц.

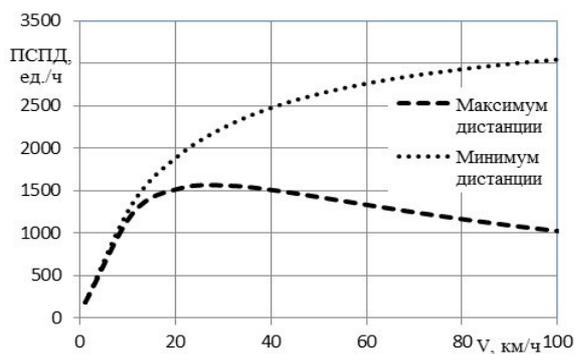


Рис. 1. ПСПД для времени реакции водителя и тормозной системы  $T_d = 1$  с

Минимальная оценка ПСПД принимается из условия однородного состава участников движения, склонных к очень осторожному стилю вождения. Принимается, что такие водители соблюдают дистанцию, которая позволит избежать наезда на неподвижное

препятствие в случае его внезапного мгновенного появления вместо впереди идущего автомобиля. Эта ситуация носит название «упавшего груза», но может возникать и в других ситуациях, например, в случае столкновения впереди идущего автомобиля со встречным автомобилем. В этом случае водитель, начав спустя время  $T_d$ , после возникновения на его пути неподвижного препятствия, торможение с замедлением  $a$ , должен избежать столкновения, проехав расстояние

$$D_{\max}(t) = S(0) + VT_d + \frac{V^2}{2a}. \quad (15)$$

Для этого случая также существует аналитическая зависимость ПСПД от скорости ТП

$$I_{3,\max} = \left[ \inf_V \left( \frac{D_{\max}}{V} \right) \right]^{-1} = \left[ \frac{S(0)}{V} + T_d + \frac{V}{2a} \right]^{-1}. \quad (16)$$

Соблюдение всеми участниками движения гарантированно безопасной, максимальной дистанции приводит к появлению экстремума в интенсивности плотного потока, и здесь существует значение скорости ТП, при которой достигается максимум ИД (рис. 1)

$$V_{I_{3,\max}} = \sqrt{2aS(0)}. \quad (17)$$

Таким образом, зависимостями (12) и (15) количественно определены границы дистанции, при которых обеспечивается безопасность движения в обычных (12) и критических (15) условиях экстренного торможения. Однако они являются слишком широкими границами для определения ПСПД и не обеспечивают возможности их использования в практике дорожного и транспортного планирования (рис. 1).

Так как эти дистанции основываются на крайних оценках состава водителей, разумно предположить, что реальный состав водителей в ТП будет складываться из всех их типов, с точки зрения выбранной дистанции безопасности: осторожных, обычных и рискованных. Предугадать, из какого состава водителей будет складываться ТП на ПД в критический момент, для которого рассчитывается ПСПД, практически невозможно, поэтому правильным является подход, основанный на предположении, что все дистанции между

ТС случайным образом распределены в пределах, заданных зависимостями (12) и (15). События, состоящие в появлении на ПД водителей, соблюдающих дистанцию, меньшую чем (12), и большую, чем (15), при этом считаются редкими, не вносящими существенных корректив в ИД ТП на ПД за рассматриваемые на практике периоды – час или сутки.

При этом подходе знание вида и параметров распределения дистанции между ТС в плотном ТП обеспечит получение реальной оценки ПСПД. Для получения точечной оценки ПСПД можно ввести понятие «стандартного ТП», параметры распределения дистанций между ТС в котором послужат основой расчёта стандартизованных значений реальной ПСПД. С этой целью расстояние между передними бамперами двух следующих друг за другом ТС представляется в виде суммы

$$\begin{aligned} D(V) &= D_{\min} + Z(\omega) = S(0) + VT_d + Z(\omega) = \\ &= S(0) + VT_d + \frac{V^2}{2a}k(\omega), \end{aligned} \quad (18)$$

где  $k(\omega) = \frac{2a}{V^2}Z(\omega)$ , а  $Z(\omega)$  является неотрицательной случайной величиной дистанции безопасности между автомобилями с функцией распределения  $F(x) = P\{Z(\omega) \leq x\}$  и с математическим ожиданием

$$Z_1 = MZ(\omega) = \int_{x \geq 0} x dF(x) < \infty.$$

$$\text{Пределы} \left[ 0; \frac{V^2}{2a} \right].$$

Тогда среднее значение коэффициента  $k(\omega)$  определяется как отношение

$$k_1 = Z_1 \frac{2a}{V^2}.$$

Функция распределения  $G(x)$  случайного коэффициента  $k(\omega)$  выражается через функцию распределения  $F(x)$  случайной величины  $Z(\omega)$  по зависимости

$$\begin{aligned} G(x) &= P\{k(\omega) \leq x\} = P\left\{\frac{Z}{V^2}2a \leq x\right\} = \\ &= P\left\{Z \leq \frac{V^2}{2a}x\right\} = F\left(Z \leq \frac{V^2}{2a}x\right). \end{aligned} \quad (19)$$

Но определение параметров стандартного ТП требует проведения обширных натурных исследований на соответствующих дорогах и улицах, проведение которых возможно только при наличии соответствующего финансирования. На начальном этапе вполне достаточным выглядит вариант интервальной оценки ПСПД, то есть определение границ, в которых с высокой вероятностью находится искомое значение ПСПД. Для её получения необходимо сузить теоретические границы интервала значений ПСПД (12) и (15) до реальных значений, путем принятия разумных допущений о виде распределения случайных дистанций в плотном ТП.

Основной предпосылкой для этих допущений является высказанное ранее утверждение о незначительном количестве водителей, соблюдающих в плотном потоке дистанции меньше, чем (12), и больше, чем (15), которым можно пренебречь. Тогда в терминах дистанции безопасности  $Z(\omega)$

$$Z(\omega) \in \left[ 0; \frac{V^2}{2a} \right]. \quad (20)$$

Теперь остаётся только сделать предположение относительно характера распределения  $Z(\omega)$  внутри интервала (20). Самым простым вариантом является допущение о её равномерном распределении. В этом случае  $k_1 = 1$ , и для времени реакции водителя и тормозной системы  $T_d = 1$  с, ПСПД достигает значения 1881.3 ед./час (рис. 2).

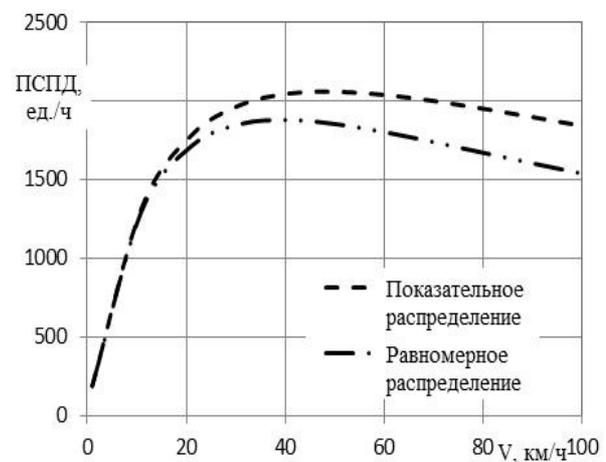


Рис. 2. ПСПД для случайной дистанции между ТС в плотном ТП

С учётом реальных значений ПСПД [1, 3], равномерное распределение может считаться таковым, которое задаёт нижнюю границу реальной ПСПД. В качестве верхней границы может быть принято показательное распределение безопасной дистанции  $Z(\omega)$ , при котором водители с большей вероятностью будут склонны к рисковому стилю вождения.

Так как показательное распределение является бесконечным справа, то для определения его параметра необходимо задать правую границу распределения, исходя из условия, что вероятность попадания безопасной дистанции правее неё является практически невозможным событием. В качестве границы такого маловероятного события принимается значение 5 %, и тогда параметр показательного распределения определяется исходя из условия, что  $P\left\{Z > \frac{V^2}{2a}\right\} = 0,05$ , а  $k_1 = 1,5$ , и ПСПД достигает значения 2061,3 ед./час (рис. 2).

Полученная интервальная оценка ПСПД значительно выше нормативных показателей, принятых в Украине [2], и приближается к значениям ИД, зафиксированным на междугородных магистралях в США и Австралии [1, 3], но не достигает их. В данной модели это обусловлено заданным с большим запасом временем реакции водителя и автомобиля, равным 1 с, а также априорным характером распределения безопасной дистанции  $Z(\omega)$ . Однако приведенная интервальная оценка ПСПД имеет широкие возможности для настройки на реальные параметры транспортного потока и может учитывать особенности функционирования каждой отдельной ПД и её роли в транспортной системе. Например, при задании времени реакции водителя и автомобиля, равного величине 0,5 с, что является вполне приемлемым [7], ПСПД находится в пределах от 2888 до 2547 ед./ч.

Дополнительными параметрами настройки модели являются средняя длина ТС, вид и параметры распределения безопасной дистанции  $Z(\omega)$ , реальные значения которых можно установить с помощью натуральных наблюдений.

Также стоит обратить внимание на то, что любое случайное распределение безопасной дистанции  $Z(\omega)$  будет приводить к наличию экстремума в функции ПСПД

$$I_{4,\max} = \max_{V>0} \left( \frac{S(0)}{V} + T_d + \frac{V}{2a} k_1(\omega) \right) = \left[ \frac{S(0)}{V} + T_d + \frac{V}{2a} k_1(\omega) \right]^{-1} = J(V_{\max}). \quad (21)$$

Этот максимум интенсивности движения достигается на некоторой скорости  $V_{\max} = \arg \max J(V)$ , которую можно получить дифференцированием ПС (21) по скорости  $V$ . Дифференцирование и приравнивание производной к 0 приводит к уравнению

$$\frac{S(0)}{V^2} = \frac{k_1(p)}{2a}. \quad (22)$$

Из этого уравнения определяется оптимальная скорость движения  $V_{\max} = \sqrt{\frac{2aS(0)}{k_1(p)}}$ , которая позволяет достигнуть искомой пропускной способности

$$I_{4,\max} = \left[ T_d + \sqrt{\frac{S(0)k_1(p)}{2a}} \right]^{-1}. \quad (23)$$

Эта возможность также является очень важной для планирования развития автомобильных дорог и городских улиц, поскольку даёт прямые указания к установлению разрешённой скорости движения на них.

### Выводы

В настоящее время существует большое количество моделей расчёта ПСПД, дающих очень широкий диапазон значений искомого показателя, каждое из которых не может считаться более предпочтительным, чем остальные из-за априорного характера моделей, обусловленных невозможностью проведения непосредственных натуральных наблюдений за ПСПД.

Разработанный подход к описанию ПСПД на основе представления дистанций между ТС как случайных величин, определяемых каждым водителем самостоятельно, позволяет описать широкий диапазон значений ПСПД путём задания параметров модели, которые могут быть определены с помощью натуральных наблюдений за реальным ТП на автомобильных дорогах и городских улицах. Это создаёт возможности для определения не только интервальной, но и точной оценки

ПСПД при задании параметров стандартного ТП.

### Литература

1. Highway Capacity Manual / Washington: TRB, 2010. – 1134 p.
2. Вулиці та дороги населених пунктів: ДБН В.2.-3-5-2001. – Чинний від 2001-10-01. – К.: Держбуд України, 2001. – 51 с.
3. NSW Roads and Traffic Authority «Traffic Volume Data for Sydney Region 1999: Volume 1», RTA Traffic and Transport Directorate, Sydney 2000. – 639 p.
4. Laufer J. Freeway capacity, saturation flow and the car following behavioural algorithm of the VISSIM microsimulation software / J. Laufer // 30<sup>th</sup> Australasian Transport Research Forum, Maunsell Australia 2008. – P. 1–14.
5. Fellendorf M. Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM / M. Fellendorf and P. Vortisch, J. Barceló (ed.) // Fundamentals of Traffic Simulation, 63 International Series in Operations Research & Management Science 145, Springer Science+Business Media, LLC 2010. – P. 63–93.
6. Song G. Comparative analysis of car-following models for emission estimation / G. Song, Yu L., Xu L. // Transportation Research Record 36, Washington D.C., January, 2013. – P. 1–26.
7. Гаврилов А. А. Моделирование дорожного движения / А. А. Гаврилов – М. : Транспорт, 1980. – 187 с.

### References

1. Highway Capacity Manual (2010). Washington: TRB, 1134.
2. Vulytsi ta dorohy nasele-nykh punktiv [State Standart 2.3-5:2017. Streets and roads of settlements]. DBN V.2.3-5:2017. Kiev: Derzhbud (2001). 51.
3. NSW Roads and Traffic Authority «Traffic Volume Data for Sydney Region 1999: Volume 1», RTA Traffic and Transport Directorate, Sydney (2000). 639.
4. Laufer, J. (2008). Freeway capacity, saturation flow and the car following behavioural algorithm of the VISSIM microsimulation software. 30<sup>th</sup> Australasian Transport Research Forum, Maunsell Australia, 1-14.
5. Fellendorf, M. Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM. Fundamentals of Traffic Simulation, 63 International Series in Operations Research & Management Sci-

ence 145, Springer Science+Business Media, LLC (2010), 63-93.

6. Song, G. Yu L., Xu L. (2013). Comparative analysis of car-following models for emission estimation. Transportation Research Record 36, Washington D.C., January, 1-26.
7. Gavrilov, A.A. (1980). *Modelirovanie dorozhnogo dvizheniya* [Modeling of traffic], Moscow: Transport, 187 [in Russian].

**Наглиук Иван Сергеевич, д.т.н., проф.,  
кафедра организации и безопасности  
дорожного движения,  
707-37-06, oibdkhadi@ukr.net**

**Макаричев Александр Владимирович,  
д.ф.-м.н., доц.,  
0984683197, amsol2904@gmail.com**

**Горбачёв Пётр Фёдорович, д.т.н., проф.,  
0503032622, gorbachov.pg@gmail.com**

**Горбачёва Елена Александровна,  
аспирант,  
кафедра транспортных систем и  
логистики  
0503001143, goeal@gmail.com**

**Харьковский национальный  
автомобильно-дорожный университет,  
61002, Украина, г. Харьков,  
ул. Ярослава Мудрого, 25,**

### DETERMINING OF LANE CAPACITY OF INTERCITY ROADS AND URBAN STREETS

**Nahlyuk I., Makarychev A., Horbachov P.,  
O. Gorbachova, KhNAHU**

**Abstract. Problem.** The capacity of intercity roads and urban streets is an important basic input required for planning, analysis and operation of roadway systems. It is used when choosing rational options in organizing traffic and for solving other issues concerning intercity roads and urban streets development planning. There are many mathematical models for calculating lane capacity but they are not an actual assessment of transport facilities that can be used in relevant traffic calculations. **Goal.** It is required to develop a new effective method which is based on objective characteristics of the traffic flow with obvious assumptions and provides an opportunity for enough accurate and indisputable forecasting of capacity on the benchmark lane. **Methodology.** The goal can be achieved by abandoning attempts to obtain the exact point value in favor of an interval assessment of lane capacity. At the same time, the basis should be drivers' decision-making regarding the car speed and the distance from the vehicle ahead

in dense traffic flow. Then the distance from the vehicle ahead is random while the car speed can be viewed as an argument of distribution function moments of random distance. **Results.** The received interval assessment of the lane capacity has wide possibilities for tuning to real parameters of the traffic and can take into account peculiarities of an operation of each separate road lane and its role in the transport system. **Originality.** The new method of the interval assessment of road lane capacity which is based on random distances between vehicles in the traffic is developed. **Practical value.** The developed method creates opportunities for determining not only the interval, but also an accurate estimation of the lane capacity when specifying the parameters of the standard traffic.

**Key word:** lane capacity, road lane, dynamic dimensions, random variable, distribution law.

### ВИЗНАЧЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ СМУГИ РУХУ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ І МІСЬКИХ ВУЛИЦЯХ

Наглюк І.С., Макарічев О.В., Горбачов П.Ф.,  
Горбачова О.О., ХНАДУ

**Анотація.** Наведено новий підхід до визначення пропускної здатності (ПЗ) смуги руху на автомобільних дорогах і міських вулицях, оснований на ймовірнісній оцінці мінімальної дистанції між автомобілями, що обирається водіями у транспортному потоці (ТП). ПЗ смуги руху на автомобільних дорогах і міських вулицях є найважливішим показником, що характеризує функціонування шляхів сполучення автомобільного транспорту. Він необхідний для виконання робіт із проектування, будівництва і ремонту автомобільних доріг, значення ПЗ

використовуються при виборі раціональних варіантів організації дорожнього руху та при вирішенні інших питань планування розвитку автомобільних доріг. До цього часу розроблено велику кількість математичних моделей для розрахунку ПЗ смуги руху, які в більшій мірі відображають суб'єктивні погляди авторів, ніж об'єктивну характеристику дорожньої інфраструктури, яку можна використовувати у відповідних розрахунках.

Ефективним способом є теоретична оцінка ПЗ смуги руху на автомобільних дорогах і міських вулицях, основана на об'єктивних характеристиках транспортного потоку і очевидних припущеннях, яка створює можливість безспірного прогнозування ПЗ для еталонної смуги руху. Поставлена мета досягається за рахунок відмови від точкової оцінки і переходу до інтервальної характеристики ПЗ. Основою для розрахунку ПЗ при цьому є об'єктивна оцінка рішень про швидкість і дистанцію між автомобілями, що приймаються водіями у складі цільного ТП. Саме ці рішення, а не час реакції водіїв або довжина гальмівного шляху автомобіля при екстремому гальмуванні, визначають динамічний габарит кожного автомобіля в потоці та ПЗ смуги руху в цілому. З урахуванням великої кількості учасників руху дистанція між автомобілями розглядається як випадкова величина, а швидкість вважається аргументом функції розподілу випадкової дистанції, оскільки в умовах цільного потоку учасники руху зазвичай дотримуються швидкості руху транспортного потоку на обраній смузі руху.

**Ключові слова:** пропускна здатність, смуга руху, динамічний габарит, випадкова величина, закон розподілу.