

УДК 656.13.08

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАДЕРЖЕК АВТОМОБИЛЕЙ НА АВТОМАГИСТРАЛЯХ

Е.В. Запорожцева, ассистент, ХНАДУ

*Аннотация.* Освещается критерий, оценивающий состояние движения транспортных потоков по полосам многополосных автомагистралей и условия движения автомобилей в потоке. Одновременно это критерий устойчивости дорожного движения, работоспособности всей системы транспортного потока и показатель комбинированной неравномерности распределения транспортного движения.

*Ключевые слова:* транспортный поток, интенсивность, скорость, плотность.

## РОЗПОДІЛ ЗАТРИМОК АВТОМОБІЛІВ НА АВТОМАГІСТРАЛЯХ

О.В. Запорожцева, ассистент, ХНАДУ

*Анотація.* Освітлюється критерій, що оцінює стан руху транспортних потоків по смугах багатосмугових автомагістралей та умови руху автомобілів у потоці. Одночасно це критерій стійкості дорожнього руху, працездатності всієї системи транспортного потоку і показник комбінованої нерівномірності розподілу транспортного руху.

*Ключові слова:* транспортний потік, інтенсивність, швидкість, щільність.

## DISTRIBUTION OF VEHICLES DELAYS ON MOTORWAYS

H. Zaporozhtseva, assistant, KhNAHU

*Abstract.* The criterion for assessing the state of traffic flows on multi-lane highways and conditions of vehicular traffic in the stream is highlighted in the given article. At the same time it is a measure of traffic performance stability as well as the efficiency of the entire system of the traffic flow and the combined index of uneven distribution of traffic.

*Key words:* transport stream, intensity, speed, closeness.

### Введение

Планируемое в Украине расширенное строительство новых многополосных скоростных автомагистралей, а также совершенствование методов управления движением современных насыщенных транспортных потоков требуют глубокого анализа состояний транспортных потоков на существующих многополосных магистралях и создания научной базы для решения проблем движения. Как при анализе существующего состояния транспортных потоков на многополосных автомагистралях, так и при экспертизе проектов транспортных коридоров необходимо иметь критерий, объективно оценивающий

движение автомобилей в потоке по их полосам.

### Анализ публикаций

В литературе данное состояние не описывается, хотя на данную тему есть большое количество публикаций, но в них не учитывается движение транспортного потока как целое.

Поэтому воспользуемся методикой В.И. Гука [1] и учтем, что интенсивность транспортного потока в общем случае не равняется нулю, если распределение интервалов в потоке не равняется нулю и распределенные по ав-

томагистралами транспортного коридора автомобили не находятся в состоянии затора.

### Цель и постановка задачи

Рассмотрим, как распространяется транспортный поток по автомагистрали с учетом взаимного влияния автомобилей, которые движутся, то есть раскроем макроскопическое явление на основе микроскопического движения одиночных автомобилей.

Рассмотрим движение транспортного потока по полосе автомагистрали протяженностью  $x$  между пересечениями в разных уровнях.

### Оценка состояния комфортности движения

Учтем, что число автомобилей, которые занимают полосу движения за время  $\Delta t$ , равняется числу автомобилей, которые расположены на участке автомагистрали на расстоянии  $V \Delta t$ , где  $V$  – скорость движения автомобилей. Поэтому количество автомобилей  $\lambda$ , которые движутся по выделенному участку полосы между пересечениями в разных уровнях, будет равняться плотности потока  $Q$  на длину  $V \Delta t$

$$\lambda = Q \cdot V \cdot \Delta t. \quad (1)$$

Интенсивность транспортного потока за время  $\Delta t$  равняется

$$N = \frac{Q \cdot V \cdot \Delta t}{\Delta t} = Q \cdot V. \quad (2)$$

Теперь определим длину участка дороги  $V \cdot \Delta t = \Delta x$ . Для условий транспортных коридоров ее можно принять равной средней длине свободного пробега автомобилей без задержек при смене полосы  $\Delta x = l_{\text{ср}}$  [2].

Изменение плотности на этом единичном участке дороги тогда будет

$$\Delta Q = \frac{dQ}{dx} \cdot \Delta x = \frac{dQ}{dx} \cdot l_{\text{ср}}. \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), получим

$$N = l_{\text{ср}} \cdot V \frac{dQ}{dx}, \quad (4)$$

где  $\frac{dQ}{dx}$  определен как градиент плотности (производная плотности). Откуда видно, что интенсивность транспортного потока пропорциональна градиенту плотности (неравномерному изменению плотности в пространстве на единицу длины дороги). Разделив интенсивность на градиент плотности, получим

$$\frac{N}{\frac{dQ}{dx}} = l_{\text{ср}} \cdot V = \beta. \quad (5)$$

Показатель  $\beta$  характеризует «комфортное состояние движения» автомобилей или неравномерность распределения по полосе автомагистрали, т.е. функционирование участка транспортного коридора между съездами у пересечений в разных уровнях. Одновременно он является объективным критерием количественной оценки качества организации дорожного движения, как произведение средней дальности пробега без задержек у съездов на среднюю скорость потока. Чем  $\beta$  больше, тем выше качество организации дорожного движения, поскольку увеличивается дальность движения без торможений на более высокой скорости.

Для определения показателя функционирования дорожного движения теперь необходимо определить среднюю длину свободного пробега автомобилей без задержек  $l_{\text{ср}}$ .

Рассмотрим особенности движения по автомагистрали. Пусть на автомагистрали находится  $N_m$  автомобилей. Каждый автомобиль расходует на движение по участку время  $T_{\text{ср}}$ . Данное допущение верно, если учесть среднюю дальность расположения пересечений в разных уровнях. За время движения один автомобиль задержится  $n$  раз у съездов с автомагистрали. Среднее число задержек тогда будет равняться

$$n = \frac{T_{\text{ср}}}{t_{\text{ср}}}, \quad (6)$$

где  $t_{\text{ср}}$  – среднее время проезда без задержки.

Следовательно, вероятность задержки  $i$ -го автомобиля за время  $dt$  будет

$$P = \frac{dt}{t_{\text{cp}}}. \quad (7)$$

Определим теперь, сколько автомобилей из числа  $N_m$  задержится во время интервала  $dt$ .  $N_m$  автомобилей, которые двигаются по участку автомагистрали в интервале  $dt$ , получают столько же задержек, сколько один автомобиль за время  $N_m dt$ . Число задержек одного автомобиля за большее время  $N_m dt$  равняется  $N_m dt / t_{\text{cp}}$ .

Если число задержек  $N_m$  автомобилей за  $dt$  равняется

$$n = N dt / t_{\text{cp}}, \quad (8)$$

то вероятность задержки для одного автомобиля равняется  $P_3 = 1 / N_m$  части этой величины или

$$\frac{dt}{t_{\text{cp}}} = \left( \frac{1}{N} \right) \left( \frac{N dt}{t_{\text{cp}}} \right). \quad (9)$$

Таким образом, определим относительное число автомобилей, которые задержались за время  $dt = \frac{dt}{t_{\text{cp}}}$ . (Если  $t_{\text{cp}} = 1$  мин, за секунду задержится 1/60 часть автомобилей).

Пусть  $N_m(t)$  – число автомобилей, которые не задержались при смене полосы на подходе к съезду с автомагистрали.

$N_m(t + dt)$  меньше  $N_m(t)$  на число автомобилей, которые задержались.

Учитывая, что  $dN_m = N_m(t) dt / t_{\text{cp}}$ , получим

$$N_{i-j}(t + dt) = N_{i-j}(t) - N_{i-j}(t) \frac{dt}{t_{\text{cp}}}; \quad (10)$$

$N_m(t + dt)$ , согласно правил дифференцирования, запишем в виде  $N_m(t) + (dN_m / dt)(dt)$ .

Тогда уравнение (10) приведем к виду

$$\frac{dN_m(t)}{dt} = - \frac{N_m(t)}{t_{\text{cp}}}. \quad (11)$$

Число автомобилей, которые задержались на перекрестках, пропорционально числу автомобилей и среднему времени движения без задержек  $t_{\text{cp}}$ . Уравнение (11) перепишем в виде

$$\frac{dN_m(t)}{N_m(t)} = - \frac{dt}{t_{\text{cp}}}. \quad (12)$$

Проинтегрируем

$$\ln N_m(t) = - \frac{t}{t_{\text{cp}}} + \ln A$$

или

$$N_m(t) = A e^{-t/t_{\text{cp}}}, \quad (13)$$

где  $A = N_0$  – полное число автомобилей, потому что при  $t=0$  все автомобили ожидают следующей задержки, то есть

$$N_m(t) = N_0 e^{-t/t_{\text{cp}}}. \quad (14)$$

Вероятность, что автомобили не задержатся, равна

$$P(t) = \frac{N_m(t)}{N_0} = e^{-t/t_{\text{cp}}}. \quad (15)$$

Вероятность того, что автомобиль не задержится за время  $t$ , равна

$$P_0 = (1 - P) \exp(-t / t_{\text{cp}}),$$

где  $t_{\text{cp}}$  – среднее время между задержками.

Вероятность того, что автомобиль не задержится за время  $t_{\text{cp}}$ , равна  $e^{-1} = 0,37$ , так как вероятность эта начинается с очевидной задержки при  $t=0$  и уменьшится по мере того, как  $t$  будет становиться все больше и больше.

Среднее время до следующей задержки равно [1, 3]

$$\begin{aligned} \bar{t}_{\text{cp}} &= \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \frac{N_m e^{-t/t_{\text{cp}}}}{t_{\text{cp}}} dt = \\ &= \frac{N_0}{N_0 t_{\text{cp}}} \int_0^{\infty} t e^{-t/t_{\text{cp}}} dt = \frac{t}{t_{\text{cp}}} e^{-t/t_{\text{cp}}} = \bar{t}_{\text{cp}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Средняя длина свободного движения без задержек

$$l_{\text{ср}} = t_{\text{ср}} \cdot V, \quad (17)$$

где  $V$  – средняя скорость движения автомобилей (корень из среднеквадратичного значения).

Вероятность того, что автомобиль задержится, пройдя расстояние  $dx$ , равна  $dx / l_{\text{ср}}$ . Так как вероятность задержки за время  $dt$  равна  $dt / t_{\text{ср}}$ , то вероятность того, что автомобиль пройдет расстояние  $x$  до следующей задержки, равна  $e^{-x/l_{\text{ср}}}$ . Среднее расстояние, которое автомобиль проходит без задержки, зависит от количества автомобилей на автомагистрали, от геометрических размеров транспортных коридоров и пересечений в разных уровнях, от режима организации движения на съездах и въездах, от зоны влияния прилегающего города.

Теперь, зная среднюю длительность движения автомобиля без задержек и среднюю скорость движения автомобилей по автомагистрали определенного класса (скоростной, непрерывной, регулируемой), возможно легко оценить качество организации дорожного движения. Так, для скоростной дороги  $\beta = 1000\text{--}1500 \text{ км}^2/\text{ч}$ ; для магистрали с непрерывным движением  $\beta = 800\text{--}1200 \text{ км}^2/\text{ч}$ ; для магистрали с регулируемым движением в системе АСУ-Д  $\beta = 300\text{--}600 \text{ км}^2/\text{ч}$ ; с жесткой регуляцией  $\beta = 60\text{--}120 \text{ км}^2/\text{ч}$  [1].

Как критерий устойчивости дорожного движения, показатель провозимости  $\beta$  транспортного потока является составной частью уравнений движения в виде волн плотности, где им учитывается доля неравномерного распределения плотности, поскольку интенсивность  $N$  транспортного потока зависит как от плотности  $Q$ , так и от ее градиента  $dQ / dx$ , что определяет изменение плотности на единицу длины участка дорог

$$N = N(Q) - \beta \frac{dQ}{dx}.$$

## Выводы

Таким образом, показатель функционирования городского движения или провозимости  $\beta$  имеет триединое содержание:

Во-первых, им характеризуется работоспособность всей системы транспортного коридора с учетом дальности поездки водителя и скорости сообщения при этой поездке (5), где дальность поездки зависит от компактности плана автомагистрали и вида выбранного транспорта.

Во-вторых, описывается движение потока автомобилей с учетом их задержек через определенное расстояние при смене полосы движения и при неравномерном распределении автомобилей по участкам улиц и дорог (16), (17).

В-третьих, в уравнениях, описывающих движение транспортного потока в виде волн скорости, показатель  $\beta$  указывает на комбинированную неравномерность распределения транспортного движения [1–3], когда скорость волны потока меньше скорости свободного движения, или на неустойчивость движения, когда скорость волны потока превышает скорость свободного движения и водитель не видит условий движения достаточно далеко.

## Литература

1. Гук В.И. Элементы теории транспортных потоков и проектирования улиц и дорог / учебн. пособие для вузов / В.И. Гук. – К.: УМК ВО, 1991. – 256 с.
2. Крауфорд Ф. Волны. Берклеевский курс физики / Ф. Крауфорд; пер. с англ. – М.: Наука, 1974. – Т.3. – 528 с.
3. Гук В.І. Транспортні потоки: теорія та її застосування в урбаністиці: наукове видання / В.І. Гук, Ю.М. Шкодовський. – Х.: Золоті сторінки, 2009. – 232 с.

Рецензент: Е.Б. Угненко, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2013 г.