

Гантимурова Юлия Олеговна,  
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: juliapoltavskaya@mail.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ С УЧЕТОМ «УЗКИХ МЕСТ» В ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКАХ

Gantimurova J.O.

### MODELING TRAFFIC PARAMETERS TAKEN INTO ACCOUNT OF «BOTTLENECK» IN TRAFFIC FLOW

**Аннотация.** В статье рассматривается макро модель транспортного потока с учетом статического «узкого места» с целью изучения влияния на условия дорожного движения. Аналитические результаты показывают, что предложенная модель может качественно описывать равновесный поток и снижение пропускной способности в случае образования транспортного затора.

**Ключевые слова:** транспортный поток, «узкие места», динамические параметры, условия дорожного движения, пропускная способность.

**Abstract.** The article examines a macromodel of traffic flow considering a static bottleneck in order to study the impact on traffic conditions. Analytical results show that the proposed model can qualitatively describe the equilibrium flow and capacity reduction in the event of traffic congestion.

**Keywords:** traffic flow, bottlenecks, dynamic parameters, traffic conditions, capacity.

На сегодняшний день разработано множество моделей транспортных потоков для изучения условий дорожного движения. Существующие модели нельзя использовать для исследования влияния ограниченной доступности транспортного потока [1, 2]. В реальной системе дорожного движения широко распространены «узкие места» («бутылочное горлышко»), которые приводят к сложным транспортным ситуациям (остановки движения, очереди, заторы). Поэтому для описания «узких мест» были разработаны модели и методы, позволяющие учитывать данную особенность транспортного потока. Авторы M.J. Cassidy и R.L. Bertini [3] применили эмпирические данные для изучения формирования и разгрузки очередей на автострадах; Y. Ishibashi и M. Fukui [4] использовали модель клеточного автомата для изучения влияния «узкого места» на параметры движения на скоростных дорогах. Авторами D.H. Ni и I.D. Leonard [5] предложена кинематическая модель для изучения приоритетности входа транспортного средства в место слияния потока; C.F. Daganzo и J.A. Laval [6] использовали кинематическую теорию для изучения влияния «узкого места» на транспортный поток. Автором B.S. Kerner [7] была использована теория трехфазного транспортного потока для изучения пространственно-временных особенностей в результате возникновения узких мест на магистралях. Помимо вышеперечисленных исследований, существуют и другие подходы к моделированию «узких мест» [8]. Предложенные модели [3-8] не могут описать влияние ограниченной доступности на свойства потока, поскольку условия, возникающие при этом явлении, не учитываются в динамическом уравнении транспорт-

ного потока. Рассмотрим модель, которая может быть применена для изучения влияния статического пространственного «узкого места» на транспортный поток.

Макромодель транспортного потока может быть представлена следующим уравнением:

$$p_t + (pv_e(p))_x = 0, \quad (1)$$

где  $p$  – плотность транспортного потока;  $v_e(p)$  – равновесная скорость потока.

Уравнение (1) позволяет воспроизвести формирование и распространение волны сгущения плотности транспортных средств, но оно не может быть применимо для исследования неравновесных свойств транспортного потока, поскольку скорость в модели не может отклоняться от заданных значений  $v_e(p)$ . Чтобы устранить этот недостаток, были разработаны модели градиента плотности (2) и скорости (3):

$$p_t + (pv)_x = 0, \quad v_t + vv_x = \frac{v_e(p)-v}{T} - \frac{v}{pT}p_x, \quad (2)$$

где  $T$  – время реакции,  $v = -(1/2)v'_e(p)$  – коэффициент упреждения.

$$p_t + (pv)_x = 0, \quad v_t + vv_x = \frac{v_e(p)-v}{T} - c_0v_x, \quad (3)$$

где  $c_0$  – скорость распространения волны сгущения плотности транспортных средств.

Чтобы определить динамические параметры транспортного потока при ограниченной доступности предлагается модель (4):

$$p_t + f(x, y(t), p)_x = 0, \quad p(0, x) = p_0(x), \quad y(t) = \omega(p(t, y)), \quad y(0) = y_0 \quad (4)$$

где  $y = y(t)$ ,  $\omega(p)$  – положение и скорость движения соответственно,  $f$  – функция, описывающая поток:

$$f(x, y(t), p) = pv(p)\varphi(x - y(t)), \quad (5)$$

где  $\varphi(x - y(t))$  – функция, отражающая снижение пропускной способности «узкого места»;  $v(p)$  – средняя скорость, удовлетворяющая условиям:

1)  $v: [0, p_j] \rightarrow [0, v_f]$  – плавная убывающая функция, где  $p_j$  – плотность затора,  $v_f$  – скорость свободного потока (т.е. максимальная скорость);

2)  $v(0) = v_f, v(p_j) = 0$ ;

3)  $\frac{d^2(pv(p))}{dp^2} < 0$ .

Кроме того,  $\varphi(\varepsilon)$  удовлетворяет следующим условиям:

1)  $\varphi: (-\infty, +\infty) \rightarrow [\beta, 1]$  – гладкая функция, где  $0 < \beta < 1$ ;

2)  $\beta \leq \varphi(\varepsilon) \leq 1, \forall \varepsilon \in R$ ;

3)  $\varphi(\varepsilon) = 1$  при  $(-\infty, 2\delta) \cup (2\delta, +\infty)$ , где  $\delta > 0$ ;

4)  $\varphi(\varepsilon) = \beta$  при  $(-\delta, \delta)$ ;

5)  $\varphi(\varepsilon)$  уменьшается до  $\beta$  при  $(-2\delta, -\delta)$  и увеличивается до 1 при  $(\delta, 2\delta)$ .

Уравнение (5) показывает, что с появлением «узкого места» уменьшается поток, что соответствует действительным условиям дорожного движения. Таким образом уравнение (4) можно использовать для изучения влияния «узких

мест» на динамические свойства транспортного потока. Однако, исходя из определения  $\varphi(x - y(t))$ , данная функция должна обладать следующими свойствами:

1)  $\varphi(x - y(t)) < 1$  когда  $0 < x - y(t) < 2\delta$ , тогда «узкое место» в точке  $y(t)$  влияет на поток в точке  $x$ , что нарушает свойство анизотропии транспортного потока, поэтому уравнение (4) не может быть использовано для оценки влияния «узкого места» на транспортный поток в данном случае [9];

2)  $\varphi(x - y(t)) < 1$  когда  $-2\delta < x - y(t) < 0$ , тогда «узкое место» в точке  $y(t)$  влияет на поток в точке  $x$ , что соответствует условиям дорожного движения, поэтому уравнение (4) можно использовать для оценки влияния «узкого места» на транспортный поток;

3)  $\varphi(x - y(t)) = 1$  когда  $|x - y(t)| \geq 2\delta$ , тогда «узкое место» в точке  $y(t)$  не влияет на поток в точке  $x$ , поскольку расстояние между «узким местом» и точкой  $x$  велико; уравнение (4) можно использовать для оценки влияния «узкого места» на транспортный поток.

Уравнение (5) показывает, что появление «узкого места» на улично-дорожной сети создает поток  $\tilde{q} = pv(1 - \varphi(x - y(t)))$ . Уравнение (4) не учитывает поток  $\tilde{q}$ ; и нарушает закон сохранения транспортных потоков. Следовательно, уравнение (4) не может полностью оценить влияние «узкого места» на динамические свойства транспортного потока. Для упрощения процесса моделирования рассматривается только влияние статического «узкого места» (его положение зафиксировано как  $x_0$ ) на транспортный поток. Таким образом, на основании вышеприведенных моделей (1) – (5) можно разработать макромодель транспортного потока со статическим «узким местом»:

$$p_t + (pv)_x = 0, \quad v_t + vv_x = \frac{v_e(p) - v}{T} + c_0 v_x + F, \quad (6)$$

где  $F$  – эффект трения, вызванный потоком  $\tilde{q}$ , который определяется следующим образом:

$$F = -\mu s(x, t)pv, \quad (7)$$

где  $\mu$  — коэффициент трения;  $s(x, t) = (\tilde{q}/L_0)$  ( $L_0$  – протяженность «узкого места»).

Значения  $F$  и  $s(x, t)$  являются функциями и могут быть связаны со многими факторами (статической структурой «узкого места», интенсивностью движения) в реальной системе дорожного движения, и допускается их упрощение, поскольку будет оказано незначительное влияние на численные результаты моделирования.

По сравнению с другими моделями уравнение (6) лучше описывает сложные явления дорожного движения, возникающие в результате возникновения «узких мест», поскольку оно учитывает параметры транспортного потока в динамических уравнениях, но имеет ограничение: не исследуется влияние статического узкого места на стабильность транспортного потока с аналитической

точки зрения, поскольку функция, отражающая снижение пропускной способности, является разрывной. Посредством применения эмпирических данных для изучения влияния «узких мест» на транспортный поток (включая калибровку) данное ограничение может быть устранено.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Ветрогон, А. А.** Транспортное моделирование как инструмент для эффективного решения задач в области управления транспортными потоками / А. А. Ветрогон, М. Н. Крипак. – Текст: непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 3 (59). – С. 82-91.
2. **Пиров, Ж. Т.** Влияние распределения транспортных потоков на скорость сообщения на сегментах городских улиц с регулируемым движением / Ж. Т. Пиров, А. Ю. Михайлов. – Текст : непосредственный // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 2. – С. 115-124.
3. **Cassidy, M. J.** Some traffic features at freeway bottlenecks / M. J. Cassidy, R. L. Bertini // *Transportation Research Part B: Methodological*. – Volume 33, Issue 1. – 1999. – pp. 25–42.
4. **Fukui, M.** Traffic flow in 1D cellular automaton model including cars moving with high speed // M. Fukui, Y. Ishibashi // *Journal of the Physical Society of Japan*. – Vol. 65. – 1996. – pp. 1868–1870.
5. **Ni, D. H.** A simplified kinematic wave model at a merge bottleneck / D. H. Ni, I. D. Leonard // *Applied Mathematics Modelling*. – vol. 29(11). – 2005. – pp. 1054–1072.
6. **Daganzo, C. F.** Lane-changing in traffic streams / C.F. Daganzo, J. A. Laval // *Transportation Research Part B*. – vol. 40. – 2006. – pp. 251–264.
7. **Kerner, B. S.** A theory of traffic congestion at heavy bottlenecks / B. S. Kerner // *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. – vol. 41(21). – 2008. – 215101.
8. **Tang, T. Q.** A macro model for traffic flow with consideration of static bottleneck / T. Q. Tang, P. Li, Y.H. Wu, H. J. Huang // *Communications in Theoretical Physics*. – Vol. 58, No. 2. – 2012. – pp. 300–306.
9. **Лебедева, О. А.** Оценка пропускной способности участка улично-дорожной сети путем применения модели максимизации энтропии / О. А. Лебедева, И. М. Кулакова. – Текст : непосредственный // *Вестник Ангарского государственного технического университета*. – 2023. – № 17. – С. 255-261.