

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ РЕАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА В ГОРОДЕ

Предложена модель транспортного потока, базирующаяся на модели Танаки, но учитывающая ограничение скорости в городе.

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

Транспортная стратегия Российской Федерации определяет приоритеты государственной транспортной политики Российской Федерации, основные направления развития опорной транспортной инфраструктуры страны, приоритетные задачи институциональных реформ на транспорте, а также основные задачи развития транспортной системы и направления их решения на отдельных видах транспорта с учетом их специфики. Определена миссия государства в сфере функционирования и развития транспортной системы и пять стратегических целей, направленных на ее реализацию. Одной из них является повышение комплексной безопасности и устойчивости транспортной системы. Ее реализация позволит обеспечить эффективную работу аварийно-спасательных служб, гражданской обороны, подразделений специальных служб и повысить уровень мобилизационной готовности и, таким образом, создать необходимые условия для соответствующего уровня общенациональной безопасности.

Успешное достижение поставленных Транспортной стратегией РФ целей предполагает наличие необходимого алгоритмического обеспечения. Широкое распространение в задачах исследования транспортной безопасности получила модель транспортного потока (ТП) Танаки [1], основанная на продольном динамическом габарите безопасной езды. В то же время, как показывают натурные исследования, модель Танаки при малых плотностях транспортного потока практически не работает. Ставится задача адаптации этой модели к реальным городским условиям, предполагающим ограничение скорости.

Формальная запись динамического габарита, как известно, имеет вид:

$$L(V) = m_2 \cdot V^2 + m_1 \cdot V + m_0, \quad (1)$$

что позволяет в итоге выразить как плотность транспортного потока:

$$q(V) = 1/L(V) = 1/(m_2 \cdot V^2 + m_1 \cdot V + m_0), \quad (2)$$

так и его интенсивность N :

$$N(V) = V \cdot q(V) = V / (m_2 \cdot V^2 + m_1 \cdot V + m_0) \quad (3)$$

(здесь m_0, m_1, m_2 – коэффициенты; V – скорость транспортного потока, м/с).

Технология оценки m_0, m_1 и m_2 подробно рассмотрена в работе [2], и в соответствии с ней значения коэффициентов можно предвычислить и рассчитать затем $q(V)$ и $N(V)$.

Следует, однако, заметить, что в условиях ограничения скорости транспортного потока (в городе $V \leq 60$ км/ч) поведение кривых $q(V)$ и $N(V)$ существенно меняется, и вопрос о том, как они деформируются, остается пока открытым. Несмотря на то, что в литературе имеются многочисленные регрессионные кривые зависимости скорости от интенсивности ТП (см., например, [3, 4]), аналитического описания поведения $V(N)$ во всем диапазоне разрешенных скоростей найти не удалось.

Наше решение задачи базируется на двух постулатах:

- скорость транспортного потока не может превышать заданный предел (в нашем случае $V_{\text{огр}} = 60$ км/ч);

- продольный габарит безопасной езды $L(V)$ нарушаться не должен.

Это по умолчанию означает, что водители переходят на габарит безопасной езды постепенно, по мере нарастания плотности транспортного потока.

Если проследить (в условиях строгого соблюдения габарита безопасной езды) поведение скорости ТП (V_L) в зависимости от его плотности (q), то, в соответствии с (2), V_L является решением квадратного уравнения $m_2 \cdot V_L^2 + m_1 \cdot V_L + m_0 - 1/q = 0$, т.е.

$$V_L(q) = \frac{-m_1 + \sqrt{m_1^2 - 4 \cdot m_2 \cdot (m_0 - 1/q)}}{2 \cdot m_2} \cdot \text{м/с} \quad (4)$$

Если же учитывать ограничение скорости, то ее реальное значение можно трактовать как

$$V(q) = M(q) \cdot V_L(q), \quad (5)$$

где $M(q)$ – поправочный множитель, характеризующий стратегию поведения водителей при нарастании плотности транспортного потока.

Очевидно, что с ростом q множитель $M(q)$ должен стремиться к 1, и равенство его 1 означает, что водитель перешел на габарит безопасной езды. Помимо этого при синтезе множителя $M(q)$ необходимо выполнить еще одно условие: при малых значениях q он должен обеспечить такой характер зависимости V от N , как это предписывает регрессионное уравнение, полученное по экспериментальным данным (как правило, это квадратичный полином). Этим

двум условиям отвечает, разумеется, не единственный вид модели $M(q)$, но на первом шаге итерации мы остановились на варианте

$$M(q) = \left[1 - \left(1 - \frac{q}{q_{\max}} \right)^k \right]^\gamma, \quad (6)$$

где q_{\max} – максимальная плотность транспортного потока, $q_{\max} = \frac{1}{m_0}$;

k – коэффициент, в общем случае зависящий преимущественно от m_2 ;

γ – константа, $\gamma=0,6$.

Проанализируем далее поведение коэффициента k .

Из соотношений (5) и (6) следует $\left[1 - \left(1 - \frac{q}{q_{\max}} \right)^k \right]^\gamma = \frac{V(q)}{V_L(q)}$, что после несложных преобразований дает

$$k = \frac{1}{\ln \left(1 - \frac{q \cdot m_0}{1000} \right)} \cdot \ln \left[1 - \left(\frac{2 \cdot m_2 \cdot V_{\text{орп}}}{3.6 \cdot \left(-m_1 + \sqrt{m_1^2 - 4 \cdot m_2 \cdot (m_0 - 1000/q)} \right)} \right)^\gamma \right], \quad (7)$$

где $V_{\text{орп}}$ – ограничение по скорости, км/ч; q – плотность ТП, авт./км; q_0 – значение плотности, соответствующее максимальному значению скорости $V(q) = V_{\text{орп}}$ в соотношении (5), авт./км.

Анализ громоздкого соотношения (7) показывает, что все переменные, кроме m_2 , достаточно стабильны, поэтому разумно сформировать выборку, рассчитанную по (7), для ряда фиксированных значений m_2 , а затем найти уравнения регрессии, связывающее k и m_2 . Это позволит существенно упростить ситуацию. Результаты такой обработки (при $m_0=6,7$ м; $m_1=0,65$ с; $V_{\text{орп}}=58$ км/ч; $q_0=4,6$ авт./км) представлены на рисунке 1. Как видим, k и m_2 (при $0,025 \leq m_2 \leq 0,2$) связаны практически линейно (коэффициент детерминации $R^2=0,9999$). Уравнение регрессии имеет вид

$$k(m_2) = a \cdot m_2 + b \quad (8)$$

(здесь $a=61,5427$; $b=0,8308$)

Таким образом, принимая во внимание (5), (6) и (8) и переводя скорость в км\ч, получим

На рисунке 2 приведены результаты расчета $V(q)$ для: $m_0=6,7$ м; $m_1=0,65$ с; $q_{\max}=1/m_0$. Жирной линией выделена кривая, соответствующая экспериментальным данным (на рисунке экспериментальные точки обозначены •). В качестве сравнения даны результаты расчета для модели Танаки [4].

Что же касается зависимости скорости транспортного потока V от его интенсивности N , то следует рассмотреть две ситуации:

– стратегию четкого следования габариту безопасной езды (т.е. без учета ограничений по скорости);

– реальную стратегию поведения водителя (соблюдения габарита безопасной езды с учетом ограничения по скорости).

$$V(q) = \left[1 - \left(1 - \frac{q}{q_{\max}} \right)^{a \cdot m_2 + b} \right]^\gamma \cdot \left[\frac{3.6 \cdot \left(-m_1 + \sqrt{m_1^2 - 4 \cdot m_2 \cdot (m_0 - 1000/q)} \right)}{2 \cdot m_2} \right], \text{ км/ч} \quad (9)$$

Ситуация 1. Характер зависимости V от N определяется соотношением (3), из которого следует, что

Ситуация 2. Легко увидеть, что в этом случае функция V и аргумент N заданы параметрически, т.е. выражаются через один и тот же

$$V(N) = 3.6 \cdot \frac{-(m_1 - 3600/N) - \sqrt{(m_1 - 3600/N)^2 - 4 \cdot m_0 \cdot m_2}}{2 \cdot m_2}, \text{ км/ч.} \quad (10)$$

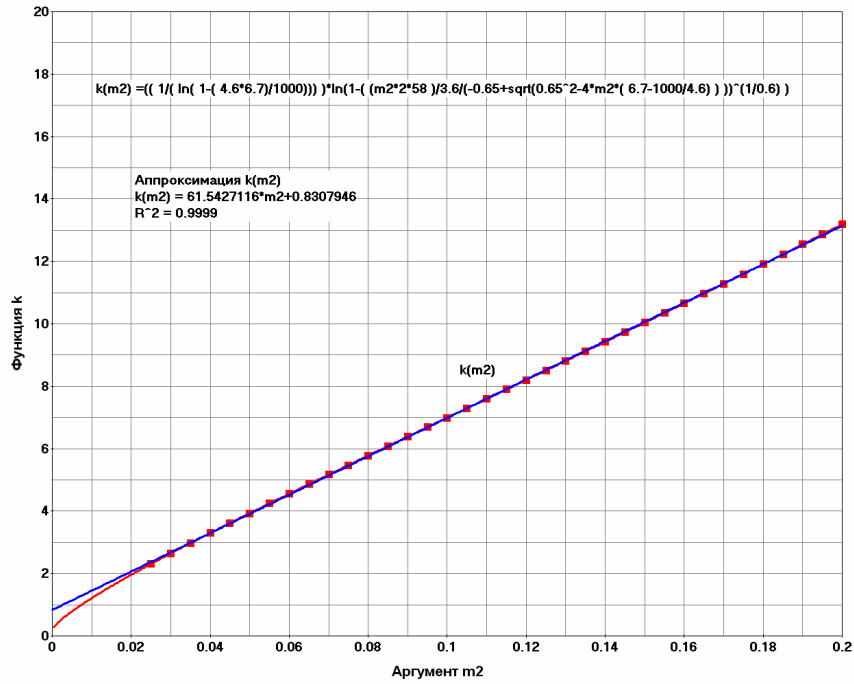


Рисунок 1. График зависимости k от m_2

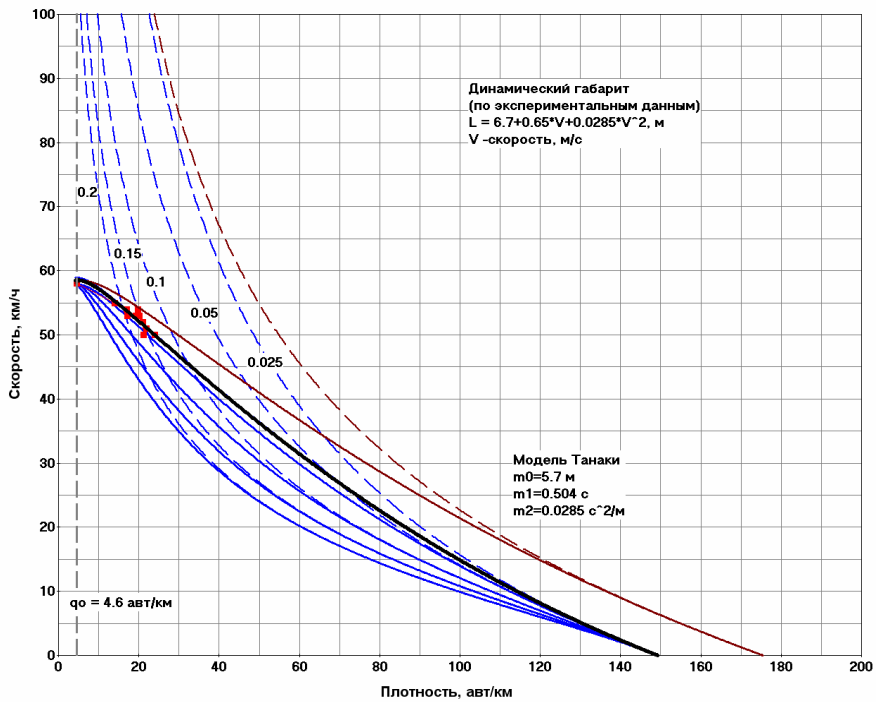


Рисунок 2. Графики зависимости скорости от плотности ТП

параметр q . Если для скорости это очевидно (см. (9)), то доказать это для интенсивности N также элементарно. Действительно, $N = V \cdot q$, тогда с учетом (9)

$$N(q) = \left[1 - \left(1 - \frac{q}{q_{\max}} \right)^{a \cdot m_2 + b} \right] \left[\frac{3.6 \cdot \left(-m_1 + \sqrt{m_1^2 - 4 \cdot m_2 \cdot (m_0 - 1000/q)} \right)}{2 \cdot m_2} \right] \cdot q. \quad (11)$$

ляет труда (рисунок 3). К рисунку следует сделать короткий комментарий. Штриховыми линиями представлены графики скорости, построенные по (10) и соответствующие канонической модели продольного габарита. В качестве параметра принято значение m_2 . Сплошными линиями представлены функции $V(N)$ для тех же значений параметра, но с учетом ограничения скорости. Кроме того, приведены результаты экспериментальных исследований, полученные системой «Traffic Monitor» (ТМС), работавшей в автономном круглосуточном режиме.

Используя графический инструментарий (например, Advanced Grapher), допускающий параметрическое задание функции и аргумента, построить график зависимости V от N не состав-

Устройство «Интегрированный видеоанализатор транспортных потоков ТМС» обеспечивает распознавание и классификацию пяти типов транспортных средств (мотоцикл, легковой автомобиль, грузовик/микроавтобус, автобус, грузовик с полуприцепом или прицепом) в условиях хорошей видимости или трех типов транспортных средств (мотоцикл, легковой автомобиль или микроавтобус, грузовик или автобус) в условиях плохой видимости (когда классификация доступна только по фарам). На наблюдаемом участке автодороги для каждой по-

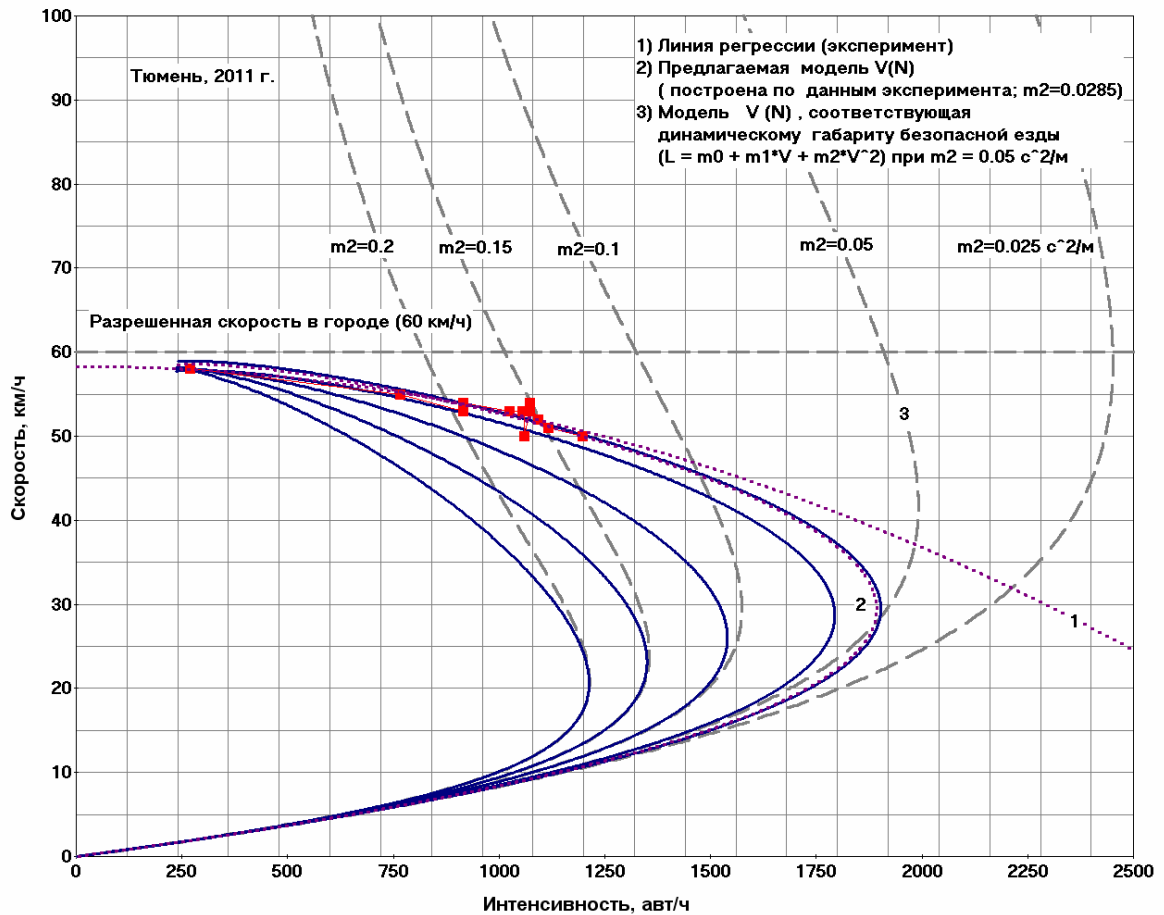


Рисунок 3. График зависимости скорости от интенсивности транспортного потока

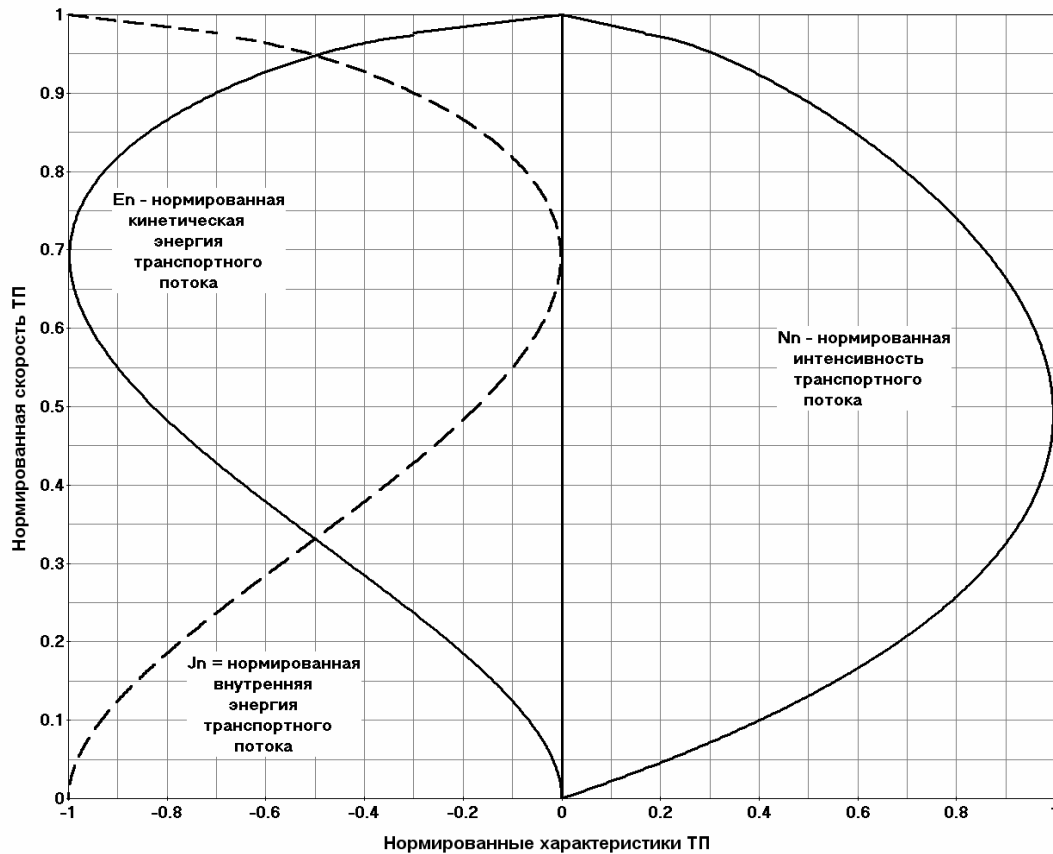


Рисунок 4. Нормированные характеристики транспортного потока

лосы ТМС определяет следующие характеристики потоков движущихся ТС:

- общее количество транспортных средств, проехавших за время анализа;
- количество транспортных средств каждого типа;
- среднюю скорость движения всех транспортных средств по полосе;
- среднюю скорость движения легковых автомобилей;
- среднюю скорость движения грузовых автомобилей;
- среднее расстояние между транспортными средствами;
- загруженность полосы;
- среднее квадратическое отклонение скорости движения.

Полученные с помощью ТМС данные были подвергнуты регрессионному анализу. Штри-

ховая линия на рисунке 3 описывает найденное уравнение регрессии (коэффициент детерминации $R^2=0,779$):

$$V(N) = -(5.4508 \cdot 10^{-6} \cdot N^2 + 1.2863 \cdot 10^{-4} \cdot N + 58.2899).$$

На рисунке 4 представлены нормированные характеристики транспортного потока, соответствующие экспериментальным данным. Помимо интенсивности показано поведение кинетической (E)

$$\frac{E}{E_{\max}} = k \cdot q \cdot V^2$$

и внутренней энергии транспортного потока (J)

$$\frac{J}{J_{\max}} = 1 - \frac{E}{E_{\max}}.$$

Таким образом, получены базовые модели (см. (9) и (11)) транспортного потока в условиях ограничения его скорости в городе, удовлетворяющие требованию безопасной езды.

12.09.2011

Список литературы:

1. Буслаев А.П., Гасников А.В., Холодов Я.А., Яшина М.В. Введение в математическое моделирование транспортных потоков // URL: http://crec.mipt.ru/study/courses/optional/gasnikov/Book_Chap3.pdf

2. Соцков Д.А. Моделирование режимов аварийного торможения в транспортном потоке /Д.А. Соцков, Р.В. Нуждин, А.П. Кунаков, А.Г. Назаров // Аналитическое и экспертное обеспечение системы БДД: сб. докл. седьмой междунар. конф. четвертой секц. – СПб.: СПб гос. архит.-строит. ун-т, 2008. – С. 16–21.
3. Сильянов В.В., Домке Э.Р. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 352 с.
4. Храпова С.М. Определение уровня загрузки автомобильным транспортом городских магистралей: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / С.М. Храпова; СибАДИ. – Омск, 2010. – 20 с.
5. Иносэ Х., Хамада Т. Управление дорожным движением. – М.: Транспорт, 1983. – 248 с.

Сведения об авторах:

Колесов Виктор Иванович, заместитель директора по научной работе НИИ ЭОР
Тюменского государственного нефтегазового университета, кандидат технических наук, доцент,
e-mail: vikolesov@yandex.ru

Гуляев Максим Леонидович, ассистент Тюменского государственного нефтегазового университета,
кафедра САТМ, e-mail: gulyev_ml72@mail.ru

Осипенко Алексей Михайлович, ассистент кафедры САТМ Тюменского государственного
нефтегазового университета, e-mail: Osipenko.am@gmail.com

UDC 656

Kolesov V.I., Gulyayev M.L., Osipenko A.M.

Tyumen State Oil and Gas University, e-mail: osipenko.am@gmail.com

IDENTIFICATION OF THE REAL MODEL OF TRAFFIC FLOW IN THE CITY

The authors proposed a model of traffic flow based on the model of Tanaka, but taking into account the speed limit in the city.

Key words: traffic flow, speed, intensity, density

Bibliography:

1. Buslaev A.P., Gasnikov A.V., Holodov J.A., Yashin M.V. An introduction to mathematical modeling of traffic flows. // URL: http://crec.mipt.ru/study/courses/optional/gasnikov/Book_Chap3.pdf
2. Sotskov D.A. simulation mode of emergency braking in traffic / D. A. Sotskov, R.V. Nuzhdin, A.P. Kunakov, A.G. Nazarov / / analytical and expert support system for road safety: Sat. Conf. Seventh Intern. Conf. the fourth section. // St. Petersburg.: California State. architect. – Builds. University, 2008. – S. 16 – 21.
3. Silyanov V.V., Domke E.R. Transportation and performance of highways and city streets. / / Moscow: Publishing Center «The Academy», 2008. – 352 p.
4. Khrapova S.M. Determining the level of loading trucks urban highways: Author. diss. Candidate. tech. Science // S.M. Khrapova; SibADI. – Omsk, 2010. – 20.
5. Inose H., Hamada, T. Control of traffic. / / Moscow: Transport, 1983. – 248.