



16-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos
TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,
vykusios 2013 m. gegužės 8 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 16th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'
TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 8 May 2013, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 16-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»
ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 8 мая 2013 г., Вильнюс, Литва

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА УЧАСТКАХ ДОРОГ С НЕВОЗМОЖНЫМИ ОБГОНАМИ

Наталья Смирнова

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, Украина
Эл. почта: NataliaV-Smirnova@yandex.ru*

Аннотация. В статье проанализированы основные зависимости режимов движения транспортных потоков на участках дорог с невозможными обгонами. Предложена математическая модель определения вероятностных характеристик движения транспортных потоков на участках двухполосных дорог. Представлен алгоритм вычислений моделирования движения транспортного потока и приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: автомобильная дорога, транспортные потоки, режимы движения, вероятность свободного движения, плотность транспортного потока, интенсивность движения.

Введение

В настоящее время в Украине длина дорог II–V категорий составляет для государственных дорог 92 %, а местных дорог почти 100 %. То есть, почти все дороги Украины – это двухполосные дороги. На двухполосных дорогах самый сложный маневр автомобилей в транспортном потоке это обгон с выездом, на встречную полосу. Именно благодаря обгонам на двухполосных дорогах обеспечиваются высокие скорости движения. Для безопасного обгона видимость встречного автомобиля должна быть достаточно велика. Минимальную видимость S_{\min} , достаточную для безопасного обгона, в предположении постоянства скоростей находят как сумму трех слагаемых: 1) пути движения со скоростью v_1 обгоняющего автомобиля за время обгона $t_{об}$, 2) запаса l_{13} между обгоняющим и встречным автомобилем в момент окончания обгона и 3) пути $S_{встр}$, который проехал со скоростью v_3 встречный автомобиль по своей полосе за время обгона до момента окончания обгона и возвращения обгоняющего автомобиля на свою полосу:

$$S_{\min} = v_1 \cdot t_{об} + l_{13} + v_3 \cdot t_{об} \quad (1)$$

Действующие ДБН В.2.3–4–2007 «Автомобильные дороги» (2007) нормируют в п. 5.2.2 минимальную видимость встречного автомобиля рекомендуемой величиной 450 м для всех категорий дорог, а в случае больших объемов работ разрешают снижать в проектах видимость до величины от 450 до 90 м для расчетных скоростей от 120 до 30 км/ч (п. 5.2.3). Обосновываются нормативные значения 450–90 м схемой прерванного обгона. Такие маневры на двухполосной дороге опасны и часто ведут к ДТП.

Нормативы существенно меньшие безопасно допустимых по зависимости (1), приводят к тому, что в проектах дорог неизбежны участки с ограниченными обгонами, на которых снижаются скорости быстрых автомобилей и растет аварийность, несмотря на организацию движения дорожными знаками и разметкой, запрещающими обгоны. В настоящее время отсутствуют теоретические основы расчета такого рода потерь и снижения транспортно-эксплуатационных показателей качества дороги.

Целью настоящей статьи является моделирование движения транспортных потоков и различных групп автомобилей на участках двухполосных дорог II–IV категорий с невозможными обгонами для тех-

нико-экономических обоснований запрещения обгонов при вариантном проектировании дорог.

1. Режимы движения транспортного потока на участках с невозможными обгонами

Все описанные выше ситуации взаимодействия водителей в потоке имеют место для любого автомобиля транспортного потока, и поэтому на двухполосных дорогах складываются следующие режимы движения: стационарный, переходный без обгонов, переходный с обгонами. Такие режимы движения транспортного потока повторяются соответственно дорожным условиям, которые формируются на дороге в зависимости от параметров технического уровня и организации движения техническими мероприятиями, преимущественно, разметкой и дорожными знаками.

Стационарный режим имеет место на участках с видимостью дороги и встречных автомобилей, достаточной для обгонов. Количество обгонов при этом режиме ограничено только интенсивностью встречного потока, так как с ее ростом уменьшается количество интервалов во встречном потоке, достаточных для обгонов. Общая скорость транспортного потока снижается примерно прямо пропорционально общей интенсивности потока.

Режим переходный без обгонов имеет место на тех участках дороги, на которых обгоны невозможны из-за малой видимости.

Режим переходный с обгонами начинается сразу же после режима переходного без обгонов. С появлением возможности обгонов водители начинают реализовать «отложенные» обгоны.

Каждый из отмеченных режимов движения потока описываем дифференциально-вероятностными уравнениями. Данными для их решения являются распределения вероятностей скоростей свободного движения всех автомобилей, которые входят в состав транспортного потока, см. рис. 1.

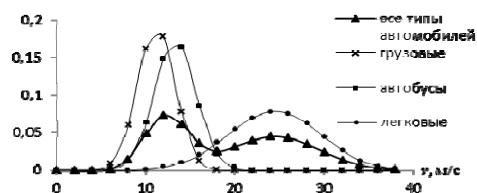


Рис. 1. Плотности распределения вероятности свободного движения групп автомобилей и всего транспортного потока. Грузовых и автопоездов – 20 %, автобусов – 24 %, легковых – 56 %.

2. Основные зависимости моделирования движения транспортных потоков на участках с невозможными обгонами

Построение модели движения транспортного потока начинают обычно с анализа движения двух скоростных групп автомобилей. Этим простым, хотя несколько искусственным случаем ограничивались отечественные и зарубежные исследователи (Дрю 1972; Сильянов 1977).

Скорость свободного движения – это скорость, которую выбирает водитель в зависимости от динамических возможностей транспортного средства. Результаты решения уравнений движения потока – это распределения вероятностей скоростей автомобилей транспортного потока с расчетной интенсивностью и средние скорости потока и типовых автомобилей потока (легковых, грузовых, автопоездов, автобусов). По значениям этих скоростей и их графикам известными методами оценивают соответствие нормативным требованиям показателей технического уровня и эксплуатационного состояния дороги.

В любой точке участка дороги быстроходный автомобиль 1 имеет либо скорость v_0 медленного автомобиля 0, либо скорость свободного движения v_1 – скорость, с которой желал бы двигаться водитель, если бы не было других автомобилей. Ясно, что $v_0 < v_1$. Вероятность свободного движения со скоростью v_1 обозначим как P_1 . Вероятность P_1 находится составлением и решением уравнения Колмогорова (Вентцель 1972) сохранения состояния 1 при движении от точки x до точки $x + \Delta x$:

$$P_1(x + \Delta x) = P_1(x) \left(1 - r' \frac{v_1 - v_0}{v_1} \Delta x\right), \quad (2)$$

где $P_1(x + \Delta x)$ – вероятность сохранения свободного движения до точки $(x + \Delta x)$; $P_1(x)$ – вероятность свободного движения в точке x (первый множитель).

Выражение $(1 - r' \frac{v_1 - v_0}{v_1} \Delta x)$ или $(1 - \lambda_{10} \Delta x)$ –

это вероятность того, что быстроходный автомобиль не догонит медленный автомобиль до точки $x + \Delta x$ (второй множитель). Вероятность $\lambda_{10} \Delta x$ – это вероятность того, что быстроходный автомобиль догонит медленный автомобиль до точки $x + \Delta x$, то-есть, вероятность того, что на интервале $\Delta x (v_1 - v_0)/v_1$, который следует сразу же за точкой x , есть хотя бы один тихоходный автомобиль транспортного потока заданной плотности r . В терминах теории исследования операций (Вентцель 1972) вероятность $\lambda_{10} \Delta x$ – это

плотность перехода автомобиля 1 из состояния 1 в состояние 0.

Входящая в выражение (2) величина r' – это фиктивная плотность транспортного потока:

$$r' = \frac{r_0}{1 - rl_0}, \quad (3)$$

где r – действительная плотность транспортного потока, авт/м; l_0 – минимально-безопасная дистанция между автомобилями, м, такая, что максимальная плотность транспортного потока $r_{max} = 1/l_0$.

Для решения уравнения Колмогорова (Вентцель 1972) перенесем $P_1(x)$ в левую часть уравнения (2), разделим правую и левую части на Δx и устремим Δx к 0:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P_1(x + \Delta x) - P_1(x)}{\Delta x} = -r' \frac{v_1 - v_0}{v_1}. \quad (4)$$

Левая часть в (3) – это производная $P'_1(x)$, то есть:

$$\frac{d(P_1(x))}{dx} = -r' \frac{v_1 - v_0}{v_1}. \quad (5)$$

Разделяя в (5) переменные и интегрируя, получим вероятность свободного движения быстроходного автомобиля в зависимости от пути x :

$$P_1(x) = e^{-xr' \frac{v_1 - v_0}{v_1}}. \quad (6)$$

Обобщая результаты на случай трех и более скоростных групп автомобилей и переходя к непрерывному распределению вероятностей скорости, получим вероятность свободного движения любого автомобиля типа v , то есть автомобиля, водитель которого желал бы двигаться со скоростью v :

$$P(v) = e^{-xr'z(v)}, \quad (7)$$

где $r'z(v)$ – суммарная плотность переходов из состояния типа v (движения со скоростью v) в состояния движения со скоростью меньше v (то есть, скоростью тех автомобилей, которых мог бы догнать водитель автомобиля типа v).

Функцию плотности переходов $z(v)$ найдем по аналогии с зависимостью для полученной ранее плотности перехода $\lambda_{10} = r'(v_1 - v_0)/v_1$ автомобиля 1 из состояния 1 в состояние 0:

$$z(v) = \int_0^v f(w) \frac{v-w}{v} dw \quad \text{или} \quad z(v) = F(v) - \frac{1}{v} \int_0^v wf(w)dw, \quad (8)$$

где $f(v)$ и $F(v)$ – плотность и функция распределения вероятностей скорости при свободном движении всех автомобилей, составляющих транспортный поток.

Для решения нашей задачи о средней скорости потока расчетной интенсивности на участке переходного режима движения без обгонов функцию $\Phi(v)$ распределения скорости автомобилей в транспортном потоке в точке x находим в виде:

$$\Psi(v) = 1 - (1 - F(v))P(v). \quad (9)$$

Среднюю скорость транспортного потока вычисляем в виде:

$$m = \int_{v_{min}}^{v_{max}} v\varphi(v)dv \quad \text{или} \quad m = \int_{v_{min}}^{v_{max}} (1 - \Psi(v))dv, \quad (10)$$

где $\varphi(v)$ – плотность распределения и $\Psi(v)$ – функция распределения вероятностей скорости в транспортном потоке.

Вычислительные процедуры моделирование движения транспортных потоков и различных групп автомобилей на участках двухполосных дорог с невозможными обгонами осложняются изменением плотности потока r с увеличением x , т.е., по мере продвижения потока автомобилей по участку с невозможными обгонами. Обычно на участке дороги достаточной длины (между пересечениями или примыканиями) интенсивность потока q – величина постоянная. Но плотность потока r меняется от точки к точке с изменением средней скорости потока m согласно соотношению $r = q / m$. Поэтому, моделируя движение потока с постоянной q на участке без обгонов и с уменьшением средней скорости потока m с ростом x , величину искомой скорости m будем вычислять итерационным способом, уточняя в каждой итерации плотность r .

Алгоритм вычислений при моделировании движения транспортного потока составлен следующим образом:

1. В точке $x = 0$ (начало участка с невозможными обгонами) задают распределение скорости при свободном движении, т.е. функции $f(v)$ и $F(v)$, см. рис. 1. Устанавливают x_{max} – длину участка дороги с невозможными обгонами (например, $x_{max} = 1000$ м). Задают интенсивность Q (авт/час) или q (авт/с) и минимально безопасный интервал между автомобилями t_0 (например, $t_0 = 3$ с).
2. Рассчитывают функцию $z(v)$ по формуле (8).

3. Вычисляют для точки $x_k = 0$ (это начало участка движения без обгонов) среднюю скорость потока m по формуле (10) и плотность $r = q / m$.
4. Для следующей точки принимают $x_k = x_{л-1} + \Delta x$ (например, $\Delta x = 100$ м).
5. Если $x_k > x_{max}$, расчет окончен и переходят к п. 10. В противном случае принимают для точки x_k начальное приближение плотности потока $r_{np} = r$.
6. Рассчитываем для точки x_k вероятность свободного движения $P(v)$, функцию $\Psi(v)$ распределения вероятностей скорости автомобилей в транспортном потоке по формулам (8) и (9).
7. Вычисляют для точки x_k среднюю скорость потока m по формуле (10) и плотность потока $r = q / m$.
8. Если $r > r_{max}$, расчет окончен, т.к. в точке x_k образовался затор и превышена пропускная способность дороги. Расчет закончен и переходят к п. 10.
9. Если же $r < r_{max}$, вычисляют относительное отклонение плотности от плотности на предыдущей итерации $\delta = (r - r_{np})/r$ и проверяют неравенство $|\delta| < \varepsilon$ (ε – относительная погрешность итерационного приближения, например, 0,05). Если неравенство выполняется, переходят к следующей точке x_k – к пункту 4. В противном случае принимают $r_{np} = r$ и переходят к следующей итерации уточнения плотности потока в точке x_k – к пункту 7.

Документируют результаты – таблицы характеристик режимов движения потока в каждой точке участка дороги с невозможными обгонами. По таблицам строят графики для последующего анализа вариантов проектных решений с различными конструктивными параметрами проблемных участков с режимами движения транспортного потока с невозможными обгонами.

Выводы

Предложенная математическая модель позволяет находить вероятностные характеристики движения транспортных потоков на участках двухполосных дорог II–IV категорий с невозможными обгонами.

Результаты моделирования необходимы для технико-экономического анализа вариантов проектных решений с различными конструктивными параметрами проблемных участков с невозможными обгонами при проектировании дорог и организации движения.

Литература

- ДБН В.2.3–4–2007. Споруди транспорту, Автомобільні дороги. [DBN. Traffic construction. Highways]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2007. 91 с.
- Дрю, Д. 1972. *Теория транспортных потоков и управление ими* [Dru D. The theory of traffic flow and its management]. М.: Транспорт. 424 с.
- Сильянов, В.В. 1977. *Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения* [Sil'anov, V. The theory of traffic flow in road design and traffic management]. Транспорт. 299 с.
- Вентцель, Е.С. 1972. *Исследование операций* [Ventcel E.S. The operations research]. М.: Советское радио. 552 с.