

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

УДК 656.135

УПРАВЛЕНИЕ ВЪЕЗДОМ ПОТОКОВ АВТОМОБИЛЕЙ НА СКОРОСТНЫЕ ДОРОГИ ВЫСШЕЙ КАТЕГОРИИ

*канд. техн. наук, доц. Р.Ю. ЛАГЕРЕВ**(Иркутский государственный технический университет);**д-р техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ**(Белорусский национальный технический университет, Минск);**д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ; канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА**(Полоцкий государственный университет)*

Установлена вероятность образования транспортного затора от объема рамповых примыкающих потоков к скоростной дороге. В зоне слияния потоков часть транспортных средств, движущихся по магистрали, занимают одновременно две полосы движения, снижая пропускную способность базовых сегментов автомагистрали. Представлены методология, принципы и стадии управления доступом к дорогам высших категорий, направленные на повышение эффективности их функционирования. Предложена методика, позволяющая оценить и оптимизировать управление въезжающими на автомагистраль потоками с позиции минимизации суммарных длин очередей транспортных средств, возникающих на примыкающих въездах за счет внедрения адаптивных систем управления транспортным спросом.

Ключевые слова: рекуррентные транспортные заторы, управление доступом к сети, пропускная способность магистралей, управление магистральными рампами, управление транспортным спросом.

Введение. Проектирование скоростных дорог высших категорий предполагает обеспечение обеспеченного и безопасного движения транспортного потока. Это требует развития методов управления дорожным движением с применением адаптивного регулирования и автоматического мониторинга характеристик движения транспортных потоков [1]. Плотный неуправляемый рамповый поток в зоне его взаимодействия с потоком на магистральной дороге приводит к образованию «турбулентности» по причине необходимости перестроения транспортных средств с одной полосы на другую с последующим снижением скорости потока на главном направлении. Существующие подходы к применению адаптивного регулирования реализуют, главным образом, на пересечениях в одном уровне для условий свободного равномерного движения. Отмечается [1], что эффективность «классического» адаптивного регулирования резко снижается в случае функционирования связанных регулируемых пересечений в условиях насыщения и перенасыщения. Уровень обслуживания транспортных потоков на дорогах высших категорий сводится к оценке значений плотности движения на сегментах магистральной сети [2–4].

С тем чтобы создать необходимые методы управления потоками, возникла задача оценки вероятности образования рекуррентных транспортных заторов на дорогах высших категорий с учетом имеющейся информации о транспортном спросе.

Методы исследования. Задачу прогнозирования транспортных заторов решали с применением программных продуктов микро моделирования транспортных потоков, теории вероятности и массового обслуживания. Магистральная дорога в рассматриваемом случае представлена двумя полосами движения 1 и 2 с примыкающей рампой 0 (рисунок 1). По условиям моделирования рассматривается ситуация, при которой въезд на магистральную дорогу не ограничен и организован по принципу поиска приемлемых разрывов в основном потоке 1 и 2.



0 – полоса движения по рампе; 1 и 2 – полосы движения по магистральной дороге

Рисунок 1. – Схема образования затора в зоне слияния потоков

Основная часть. Анализ видеоматериалов в зоне слияния транспортных потоков позволил установить пределы и условия развития их «турбулентности» (рисунок 2). Мощность транспортного потока на рампе определяет поведение участников движения на крайней правой полосе 1. При увеличении потока на рампе, составляющей 15...25% от интенсивности движения магистрального потока, отмечается начало распространения «турбулентности» на расстояние 50...300 м от начала взаимодействия потоков. При интенсивности рампового потока, превышающей 26% магистрального потока, «турбулентность» потока частично захватывает левую крайнюю полосу движения 2, способствуя значительному снижению пропускной способности полосы движения и в целом всего транспортного коридора.

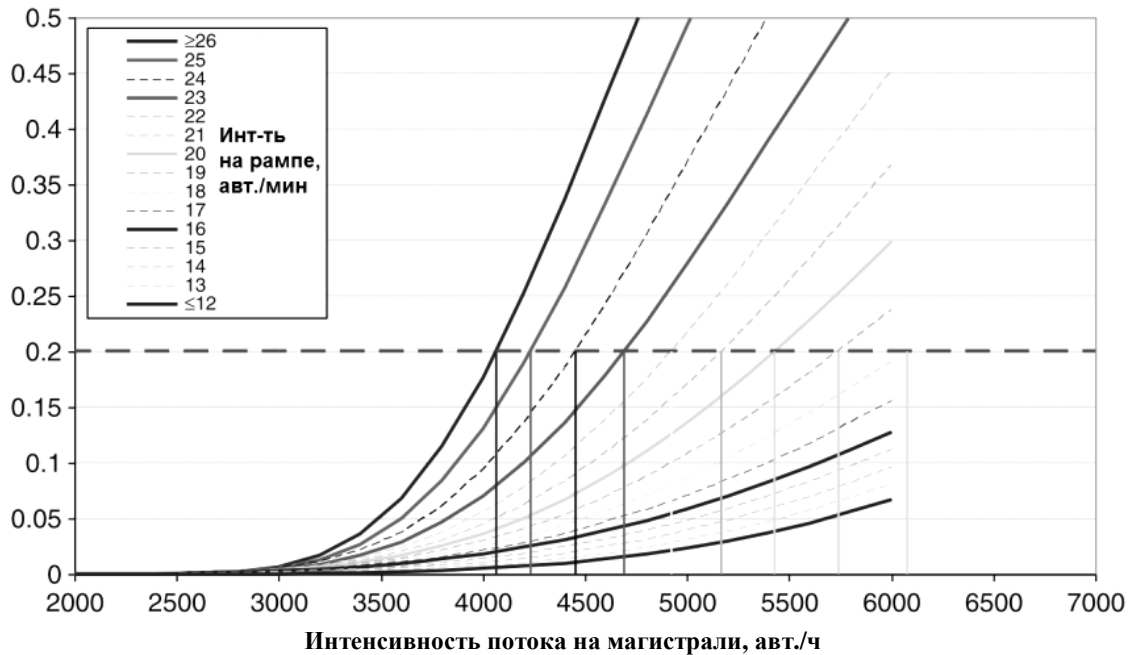


Рисунок 2. – Зависимость вероятности транспортных заторов от интенсивности потоков на магистрали и рампе

Отказ системы определяется вероятностью начала образования очередей транспортных средств на магистрали перед зоной слияния потоков. Например, при магистральном потоке 5000 авт./ч и потоке 1380 авт./ч на примыкающей рампе вероятность образования затора оценивается в 29%. Принято граничное значение вероятности отказа системы 20%, что требует необходимости снижения потока на примыкающей рампе. Реализовать это условие возможно с применением управления доступом к магистрали [5].

В качестве альтернативного варианта прогнозирования образования очереди в качестве критерия устойчивости системы предлагается использовать функцию продолжительности жизненного цикла

$$F(t) = 1 - S(t), \quad (1)$$

где $F(t) = p(T \leq t)$ – функция распределения «устойчивого» состояния системы обслуживания; T – продолжительность устойчивого состояния системы обслуживания; $S(t) = p(T > t)$ функция надежности системы обслуживания.

Оценочная функция предела устойчивости системы обслуживания $\hat{S}(t)$ определялась как

$$\hat{S}(t) = \prod_{t_j < t} \frac{n_j - \delta_j}{n_j}, \quad (2)$$

где n_j – количество позиций с условием $T \geq t_j$; δ_j – количество отказов в системе за время t_j .

Предлагается уравнение (1) рассматривать как функцию распределения вероятности устойчивости магистрали к затору в следующем виде:

$$F(q) = p(q_i \leq q) = 1 - p(q_i > q), \quad (3)$$

где $F(q)$ – распределение вероятности образования затора; q – фактическая интенсивность движения транспортного потока по полосе; q_i – величина транспортного потока в интервале i , способствующая снижению скорости; $p(q_i > q)$ – вероятность превышения критического потока над фактическим.

Зависимость (2) можно представить в виде задачи максимума правдоподобия

$$\hat{p}(q_i > q) = \hat{S}(q) = \prod_{i:q_i \leq q} \frac{k_i - d_i}{k_i}, \quad i \in B, \tag{4}$$

где k_i – количество интервалов измерений с условием $q \geq q_i$; d_i – количество нарушений в системе обслуживания потоков q_j ; B – наборы интервалов с отказами $\{B_1, B_2, B_3, \dots\}$.

При условии принятия дискретного влияния измеряемых величин потоков на работу системы (одно нарушение d_i на фактический интервальный поток q_i), уравнение (4) можно записать в следующем виде

$$F(q) = 1 - \prod_{i:q_i \leq q} \frac{k_i - 1}{k_i}, \quad i \in B. \tag{5}$$

Оценка вероятности образования динамического удара в потоке (6) (в зарубежной литературе *breakdown flow*) выполнена на примере участка улично-дорожной сети в виде транспортной развязки на мосту, результаты которой представлены на рисунке 3.

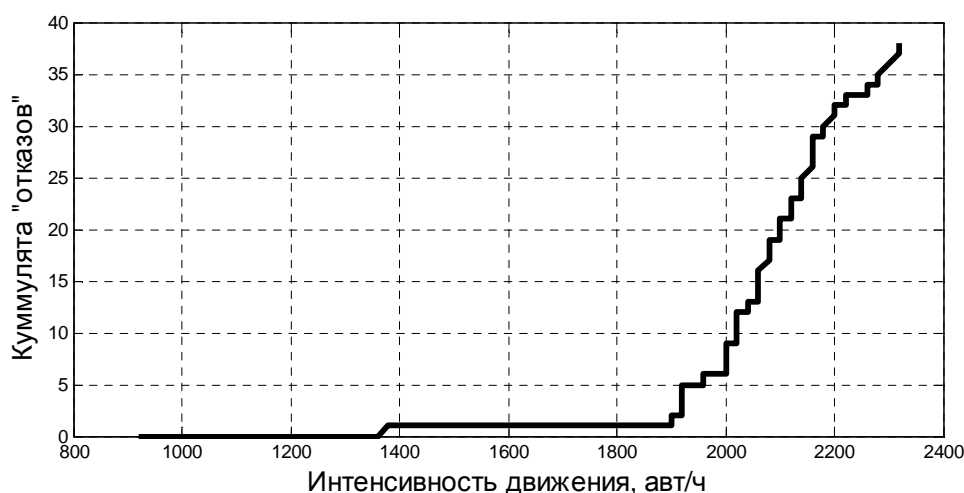


Рисунок 3. – Анализ «отказов» системы на подходе к мосту

Наибольшее количество отказов в системе (15%) было отмечено в условиях насыщения участка слияния (см. рисунок 1). Начиная со значений интенсивности 1980 авт./ч, отказы в системе фиксировались с частотой 3/5 (3 отказа на каждые 5 наблюдаемых интервалов).

Модель продолжительности жизненного цикла процесса может быть принята в качестве первого приближения для оценки прогнозирования транспортных заторов и управления скоростными дорогами. Вместе с тем обеспечение обособленного скоростного движения на магистральных дорогах в условиях плотного движения можно обеспечить за счет снижения вероятности транспортных заторов с применением средств активного управления транспортным.

Адаптивные методы управления доступом к магистрали [6] позволяют повысить безопасность слияния транспортных потоков, увеличить пропускную способность автомагистралей, снизить расход топлива и выбросы токсичных веществ в выхлопных газах автомобилей. Регламентирование въезда на автомагистраль рассматривается как наиболее эффективный инструмент обеспечения нормативных скоростей движения на дорогах высших категорий и требуемой безопасности взаимодействия потоков в зонах их слияния. Например, американское Руководство по пропускной способности автомобильных дорог посредством технического регулирования дорожного движения *MUTCD* отмечает особенности применения средств светофорного дозирования потоков на рамповых развязках, которые сводятся к следующему:

- значительное снижение задержек транспортных средств, движущихся по магистрали путем их «перекладывания» на рамповые потоки;
- обеспечение дополнительного пространства для транспортных средств, скапливающихся на подходе к автомагистрали;
- наличие альтернативных путей проезда с соответствующей пропускной способностью для обслуживания транспортных потоков вне магистрали.

Таким образом, основной принцип управления доступом к сети выражается в регулировании транспортного спроса на магистралях, основанного на некотором алгоритме, входными параметрами

которого являются: значения транспортного спроса на сегментах автомагистрали; скорости свободного движения, уровень загрузки зоны слияния потоков. Максимальная практическая пропускная способность рамповой полосы составляет 900 авт./ч с минимумом 240 авт./ч.

При разработке алгоритма управления доступом к магистрали в качестве механизма повышения эффективности ее функционирования применяли согласование характеристик прибытия и убытия транспортных средств с рампового подхода. При этом «система дозирования» рампового потока должна гарантировать эффективность работы всех сегментов магистрали, из которых она состоит (см. рисунок 2).

Алгоритм управления транспортным спросом может быть сведен к решению следующей прикладной задачи. Магистраль разбивается на несколько j -тых сегментов, в каждом из которых имеется хотя бы одна питающая рампа. Величина магистрального потока задается зависимостью

$$q_j = \sum_{i=1}^j \alpha_{ij} s_i, \quad \alpha_{ij} \in [0, 1], \quad (6)$$

где q_j – транспортный поток на j -той магистральной секции, авт./ч; s_i – вливающийся поток с i -той рампы, авт./ч; α_{ij} – доля i -того рампового потока проходящего по j -той магистральной секции.

Дозирующий рамповый поток ограничивается условием

$$s_{i,\min} \leq s_i \leq \min\{s_{i,\max}, d_i\}, \quad (7)$$

где d_i – транспортный спрос на i -той рампе; $s_{i,\max}$ – пропускная способность i -той рампы.

Решение указанной задачи реализовано в виде m -файла для модуля программного комплекса Optimization Toolbox пакета Matlab R2013 в следующей постановке:

$$\min \left(\frac{1}{2} x' H x + f' x \right)$$

- при односторонних ограничениях

$$A x \leq b,$$

$$A_{eq} \cdot x = b_{eq};$$

- при двухсторонних ограничениях

$$lb \leq x \leq ub,$$

где x – вектор оцениваемых параметров, $m \times 1$, $x \geq 0$; H – матрица Гессе, $m \times m$; f – вектор коэффициентов целевой функции $m \times 1$; A – матрица коэффициентов ограничений-неравенств, $n \times m$; A_{eq} – матрица коэффициентов линейных ограничений-равенств, $n \times m$; b – вектор правых частей ограничений-неравенств, $n \times 1$, $b \geq 0$; b_{eq} – вектор правых частей линейных ограничений-равенств $n \times 1$; lb – вектор нижних ограничений параметров $m \times 1$, $lb \geq 0$; ub – вектор верхних ограничений $m \times 1$, $ub \geq 0$.

Матрица Гессе является симметричной и положительно определенной, элементы которой h_{ij} равны второй частной производной, соответственно целевая функция должна быть выпуклой и дифференцируемой. В рассматриваемой задаче управления доступом целевая функция является суммой квадратов остатков значений очередей транспортных средств, следовательно, функция дифференцируема и положительно определена:

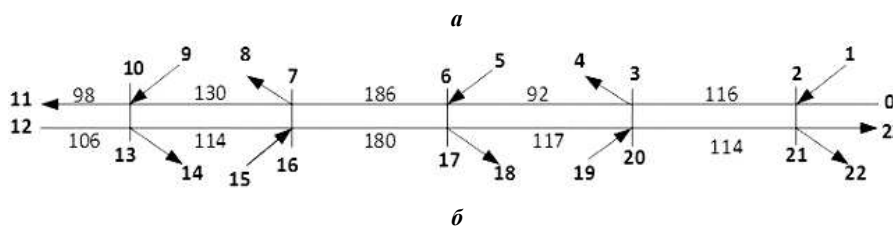
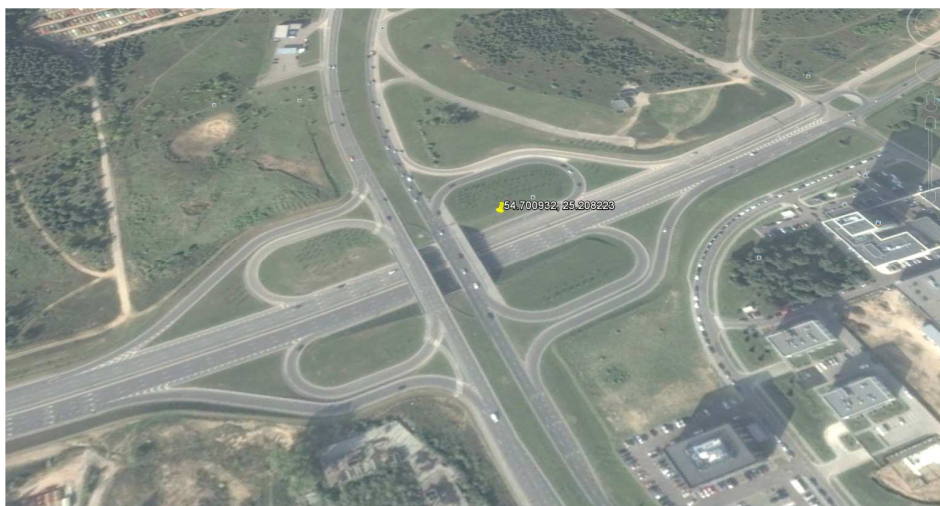
$$H(f) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

В качестве основного управляющего параметра выбраны значения «объемов дозирования» транспортных потоков с примыкающих рамп при выполнении следующих условий:

- не допустить перегрузки сегментов магистрали;
- максимально сократить суммарную длину очереди на примыкающих рампах.

При наличии объективной информации об условиях движения транспортного потока на каждом из сегментов магистрали (интенсивность/плотность) предлагаемый алгоритм позволяет оценить вероятности

начала образования затора по значениям рампового потока, основываясь на критерии «плотность транспортных средств на полосу движения». Для каждого магистрального сегмента представлены граничные значения величин плотности движения, при которых условия движения магистрального потока могут рассматриваться как наихудшие, способствующие высокой вероятности образования затора. Апробация предлагаемого алгоритма управления доступом к сети выполнялась на примере транспортного узла (рисунок 4). Целью эксперимента являлась оценка максимально-возможных 15-минутных рамповых потоков (потоков насыщения), обслуживаемых рассматриваемым участком дорожной сети с позиции недопущения перегрузки базовых сегментов магистрали и роста длин очередей транспортных средств на примыкающих рампах.



а – общий вид; **б** – представление в виде ориентированного графа; 0–11, 12–23 – основные направления транспортных потоков

Рисунок 4. – Анализируемый транспортный узел

Моделирование загрузки автомагистрали выполнялось с целью прогнозирования нагрузки на восемь сегментов автомагистрали по следующим трем сценариям:

- 1) при существующем распределении транспортных потоков без ограничения доступа к сети;
- 2) с ограничением доступа к сети по принципу одно транспортное средство за светофорный цикл;
- 3) с ограничением доступа к сети по принципу несколько транспортных средств за светофорный цикл.

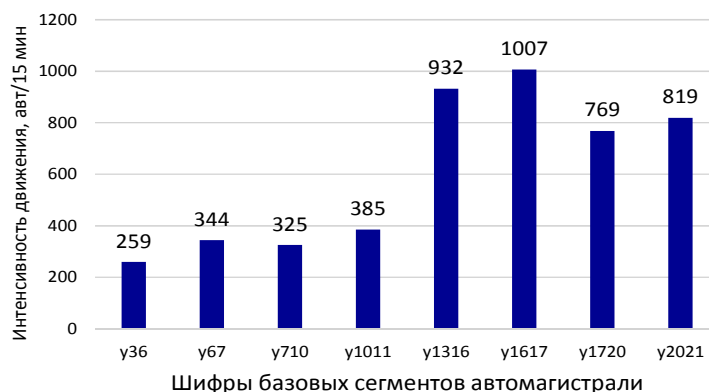
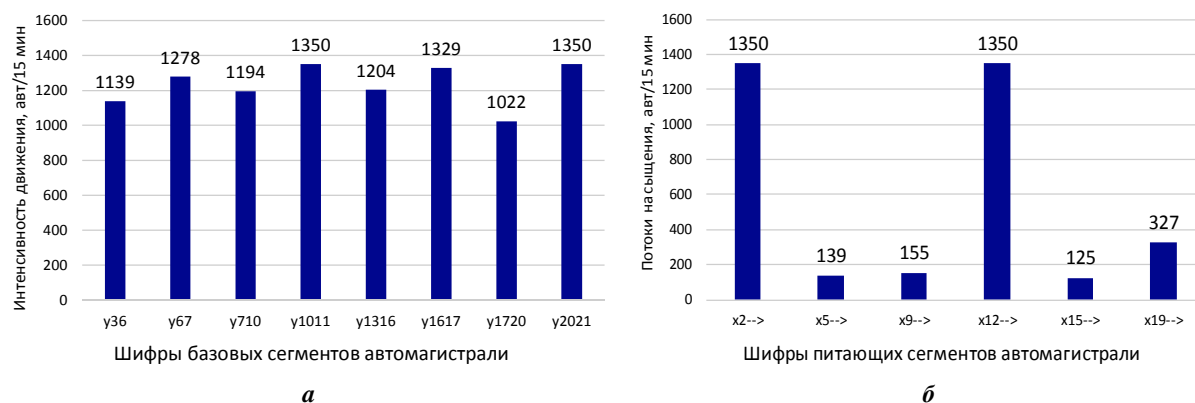


Рисунок 5. – Оценка нагрузки на сегменты автомагистрали при существующем транспортном спросе

На первом этапе моделирования получены оценки значений нагрузки на элементы автомагистрали при существующем транспортном спросе, подтверждающие отсутствие участков перенасыщения (рисунок 5); на втором – оценки нагрузки на сегменты автомагистрали (рисунок 6, а) от максимально возможных значений рамповых потоков (рисунок 6, б) при условии, что ограничения на въезд не предусматриваются; на третьем – оценки нагрузки на сегменты автомагистрали (рисунок 7, а) от значений рамповых потоков (рисунок 7, б) при внедрении системы дозирования транспортными потоками на примыкающих (питающих магистраль) рампах.



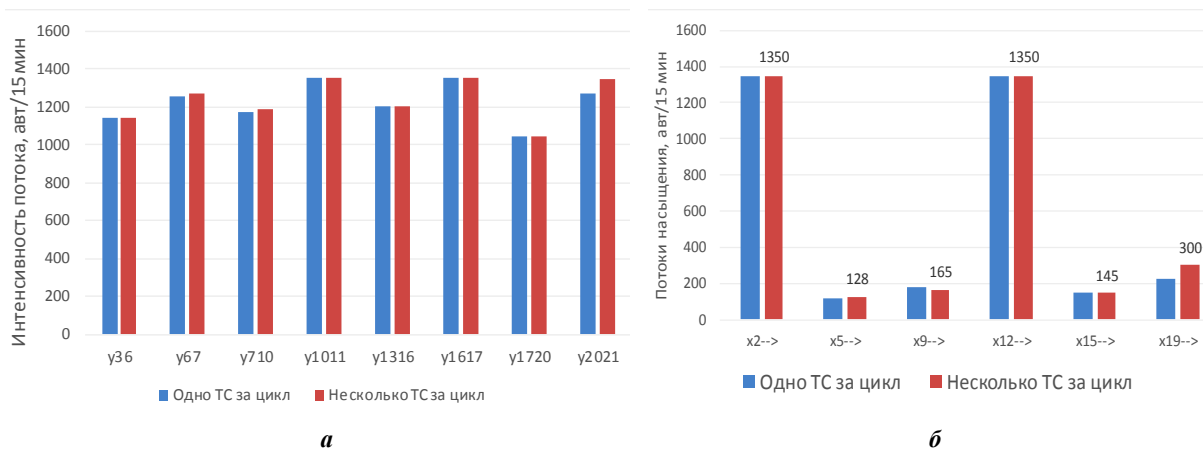
а – нагрузка на сегменты автомагистрали; **б** – рамповые потоки насыщения

Рисунок 6. – Максимальные потоки насыщения и соответствующие им нагрузки на сегменты автомагистрали без ограничения доступа к сети

Очевидно преимущество предлагаемой модели – матрица A имеет размерность $n > m$ – полный ранг, следовательно, задача имеет единственной локальный минимум, совпадающий с глобальным. Следует также отметить влияние на плотность (интенсивность) движения верхнего ограничения, характеризующего пропускную способность примыкающих рамп. Указанное ограничение может использоваться как эффективный инструмент управления дорогами высших категорий, с позиции применения зависимости

$$s_{in} = \frac{c_i C_i}{g_i}, \quad (9)$$

где s_{in} – поток насыщения i -той рампы, авт./ч; C_i – длительности цикла регулирования на i -той рампе, с; g_i – длительность такта рамповой полосы, с.



а – нагрузка на сегменты автомагистрали; **б** – рамповые потоки насыщения

Рисунок 7. – Потоки насыщения и соответствующие им нагрузки на сегменты автомагистрали при ограничении доступа

Кроме этого, с учетом представленных выше результатов моделирования можно принять практические рекомендации, представленные в руководстве НСМ 2010, на основании которых учитывать в системе дозирования потоков одно или несколько транспортных средств за такт g_i .

Заключение. Принимая во внимание качество исходных данных и их существенное влияние на параметры управления магистралью, важно обладать точной информацией о распределении транспортных потоков внутри транспортного коридора.

Как показали результаты тестирования, значительное влияние на качество управляющего воздействия оказывают:

- фактические значения пропускной способности сегментов магистрали;
- матрица, характеризующая распределение питающих потоков внутри магистрали (коридорный вход-выход), получить которую можно расчетом существующей матрицы корреспонденций рамповых потоков, регистрацией номеров транспортных средств.

В этой связи необходимо в дальнейшем разработать:

- методику оценки пропускной способности для сегментов магистрали с учетом возможных условий взаимодействия транспортных потоков (перестроение, разветвление, слияние);
- методику оценки матриц корреспонденций рамповых потоков с учетом используемых методов фиксации разрывов в потоке на алгоритме генетической оптимизации, являющемся наиболее устойчивым к возможным ошибкам в исходных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов, А.Ю. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей / А.Ю. Михайлов, И.М. Головных. – Новосибирск : Наука, 2004. – 266 с.
2. Lorenz, M. A probabilistic approach to defining capacity and breakdown, Transportation Research Circular E-C018 / M. Lorenz, L. Elefteriadou // Proceedings of the 4th international symposium on highway capacity, 27 June – 1 July 2000. – P. 84–95.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://news.kremlin.ru/news/46754>.
4. Лагерева, Р.Ю. К вопросу управления транспортными потоками в условиях плотного городского движения / Р.Ю. Лагерева, С.Ю. Лагерева, И.Г. Карпов // Вестник ИрГТУ. – Иркутск, 2012. – № 9 (68). – С. 139–145.
5. Lorenz, M. A probabilistic approach to defining capacity and breakdown, Transportation Research Circular E-C018 / M. Lorenz, L. Elefteriadou // Proceedings of the 4th international symposium on highway capacity, 27 June–1 July 2000, P. 84–95.
6. Transportation Research Board, National Academies (2010) Highway capacity manual 2010. Transportation Research Board, National Academies, Washington, DC.

Поступила 04.08.2017

MANAGEMENT OF THE ENTRY FLOW OF CARS ON HIGH-SPEED ROADS OF THE HIGHEST CATEGORY

R. LAGEREV, D. KAPSKI, V. IVANOV, T. VIGERINA

The probability of formation of traffic congestion from the volume ramp flows adjacent to the highway is set. In the confluence area of streams of the vehicles moving along the highway is two lanes, reducing the throughput of the basic segments of the motorway. The methodology, principles and stages of managing access to roads of higher categories, aimed at improving the efficiency of their operation are given. The proposed method allows to estimate and optimize the management of driving on the motorway flows with positions to minimize the total lengths of the queues of vehicles that occurs on the adjacent entrances through the introduction of adaptive control systems of transport demand.

Keywords: recurrent congestion, intelligent transportation systems, access management, ramp control management, transport demand management.