

УДК 656.13

<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-246-257><https://elibrary.ru/THZBSX>

Научная статья



ОПТИМИЗАЦИЯ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ В ГОРОДСКОЙ ДВУХЗОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

Х. Цзянг

Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Россия

jiang.live.in.rus@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2509-6745>

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматривается возможность формирования стратегии оптимизации дорожного движения на основе макроскопической фундаментальной диаграммы между городскими районами. Построены зоны притяжения при максимальном и минимальном значении пограничного контроля по категории разных типов зоны притяжения. Сформированы стабильные зоны посредством соединения зон притяжения и проанализированы изменения их формы с разными значениями экзогенного потока и эндогенного потока.

Материалы и методы. Приведены данные транспортного потока центральной части улично-дорожной сети г. Цзинань (КНР), и построена городская двухзональная система полученными макроскопическими фундаментальными диаграммами. Осуществлено моделирование состояния транспортных потоков, получена закономерность их изменения при разных параметрах пограничного контроля с использованием математически-моделирующего комплекса MATLAB.

Результаты. В результате исследования получены решения для управления дорожным движением для относительного параметра завершённых и незавершённых поездок. Предложены обобщённые варианты для оптимизации дорожного движения в рассматриваемых городских зонах – выполняется 4 сочетания стратегии для управления дорожным движением, обслуживающего проектный вариант оптимизации с различными состояниями транспортного потока.

Обсуждение и заключение. Для каждой многозональной системы дорожной сети необходимо сформировать собственный характеристический вариант оптимизации транспортного потока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: моделирование, оптимизация дорожного движения, макроскопическая фундаментальная диаграмма, стабильная зона, городская двухзональная система.

Статья поступила в редакцию 22.02.2022; одобрена после рецензирования 28.03.2022; принята к публикации 12.04.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Цзянг Х. Оптимизация дорожного движения на основе макроскопической фундаментальной диаграммы в городской двухзональной системе // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84). С. 246-257. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-246-257>

© Цзянг Х., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-246-257>
<https://elibrary.ru/THZBSX>
Original article

TRAFFIC OPTIMIZATION BASED ON A MACROSCOPIC FUNDAMENTAL DIAGRAM IN URBAN BIZONAL SYSTEM

Jiang Haiyan

Don State Technical University,
Rostov-on-Don, Russia

jiang.live.in.rus@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2509-6745>

ABSTRACT

Introduction. The article considers the possibility of forming a traffic optimization strategy based on a macroscopic fundamental diagram between urban areas. The zones of influence are constructed with the maximum and minimum values of border control, respectively, according to the category of different types of the zone of influence. The stability zones were formed by connecting the zones of influence and their shape changes with different values of exogenous flow and endogenous flow were analysed.

Materials and methods. The data on the traffic flow of the central part of the Jinan (PRC) road network are presented and an urban bizonal system is constructed using the obtained macroscopic fundamental diagrams. The modelling of the state of traffic flows was carried out and the regularity of their changes at different parameters of border control was obtained using the mathematical modelling MATLAB complex.

Results. As a result of the study, the traffic management solutions were obtained for the relatively parameter of completed and incomplete trips. The generalized options for optimizing traffic in the considered urban areas are proposed – four combinations of strategies for traffic management are performed serving the design optimization option with different traffic flow conditions.

Discussion and conclusions. For each multi-zone system of the road network, it is necessary to form its own characteristic variant of optimizing the traffic flow.

KEYWORDS: modeling, traffic optimization, macroscopic fundamental diagram, stable zone, urban two-zone system.

The article was submitted 22.02.2022; approved after reviewing 28.03.2022; accepted for publication 12.04.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Jiang Haiyan Traffic optimization based on a macroscopic fundamental diagram in urban bizonal system *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (2): 246-257. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-246-257>

© Jiang Haiyan, 2022



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возрастание транспортной нагрузки, усложнение задач организации дорожного движения, ужесточение требований к точности прогнозов об изменении накопления автомобилей вызывают обновления сетевой макромоделей и развитие транспортной инфраструктуры. В процессе управления дорожным движением макроскопическая фундаментальная диаграмма, имеющая низкую восприимчивость для динамических матриц корреспонденций, постоянно применяется основным инструментом для оценки состояния транспортных потоков на улично-дорожной сети города и проектирования транспортной системы [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

В течение последнего десятилетия сформировались многие направления теории управления дорожным движением, интегрирующей адаптивный пограничный контроль с полученными макроскопическими фундаментальными диаграммами на неравномерном сетевом уровне. Для оптимизации дорожного движения между городскими районами предпринимались попытки построения стратегии управления транспортными потоками с использованием макроскопической фундаментальной диаграммы [10, 11, 12, 13, 14].

Особое внимание обращается на следующие работы о развитии исследования пограничного контроля на основе макроскопической фундаментальной диаграммы. В исследовании Л. Чжана была применена сетевая диаграмма для оценки уровней обслуживания транспортных структур с использованием модели клеточного автомата [15]. В работе Д. Хаддада было предложено макроскопическое моделирование и метод управления на основе данных диаграмм для комплексной сети, содержащей городскую и скоростную магистраль [16]. Для оптимизации транспортных потоков в его дальнейшей работе также была отработана новая модель макроскопической фундаментальной диаграммы с учетом совокупной динамики граничной очереди между двумя городскими

районами [17]. Для исследования перераспределения транспортных заторов в реальном времени А. Кувеласом была приведена нелинейная модель между несколькими городскими районами с целью построения адаптивного варианта управления дорожным движением в гетерогенной сети [18]. На основании неопределенности параметров моделей были даны адаптивные варианты пограничных контролей для решения оптимизации дорожного движения в многозональной системе, имеющей собственные макроскопические фундаментальные диаграммы транспортного потока [19].

Несмотря на то, что появляются такие новые модели на основе сетевой диаграммы и обновляются данные о свойствах существующих моделей, имеется большой потенциал к интенсификации эффективности передвижения в конкретной обстановке улично-дорожной сети города.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Оптимизация дорожного движения с учетом особенностей двух или нескольких городских районов является типичной темой при динамическом управлении транспортными потоками. Для исследования этой темы в дальнейшей работе приведена конкретная обстановка центральной части улично-дорожной сети г. Цзинань (КНР) с полученными данными и макроскопическими фундаментальными диаграммами¹². Для формирования стратегии управления дорожным движением на основе макроскопической фундаментальной диаграммы использовалась следующая улично-дорожная сеть города, разделенная на две зоны – протяженность дорог первой зоны составляет 16,11 км, второй – 10,34 км (рисунок 1).

Построение двухзональной системы на основе макроскопической фундаментальной диаграммы является фундаментом исследования для оценки состояния транспортного потока между двумя районами.

¹ Зырянов В. В., Цзянг Х., Анализ сетевой макромоделей на примере улично-дорожной сети г. Цзинань (КНР) // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сборник конференции, г. Оренбург, Оренбургский государственный университет. 2019. С. 556-651. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42340974&pff=1>.

² Зырянов В. В., Цзянг Х. Применение макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока с использованием данных системы видеонаблюдения на улично-дорожной сети г. Цзинань КНР // Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021): труды конференции, Санкт-Петербург: Изд-во АО «ЦТСС». 2021. С. 574-580. <http://simulation.su/uploads/files/default/2021-immod-574-580.pdf>.

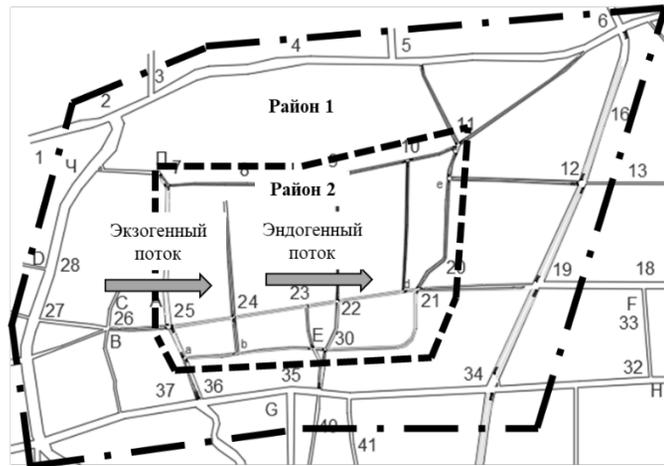


Рисунок 1 – Фрагмент улично-дорожной сети центральной части г. Цзинань (КНР) для исследования оптимизации дорожного движения в двухзональной системе с эндогенными и экзогенными потоками
Источник: составлено автором.

Figure 1 – A fragment of the road network of the central part of Jinan (China) for the study of traffic optimization in a bizonal system with endogenous and exogenous flows
Source: compiled by the author.

В данной работе теория оптимизации дорожного движения, предложенная Д. Хаддадом и Н. Геролнимисом, приведена для анализа состояния транспортного потока в определённом времени мониторинга в двухзональной системе.

Прежде всего, динамика системы С. Даганза в параметрах макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока описывается в предположении, что при изменении уровня насыщения автомобилями определенной зоны изменяются и другие характеристики транспортного потока:

$$\frac{dn(t)}{dt} = f(t) - O(n(t)), \quad (1)$$

где n – количество автомобилей, находящихся в рассматриваемой зоне; f – входящий поток в зону; O – выходящий поток в зону; t – время поездки.

Для обеспечения максимальной эффективности центрального района целевая функция оптимизации дорожного движения проектируется и описывается по следующей формуле [11]:

$$J = \max \int_0^{t_f} G_2(n_2(t)) dt. \quad (2)$$

При неперенном условии формулы (1) в определённом времени мониторинга (с времени начала поездки 0 до времени конца поездки

t_f) дифференциальные уравнения динамики системы о изменении накопления макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока описываются следующими уравнениями:

$$\frac{dn_1(t)}{dt} = q_1 - G_1(n_1(t)) \cdot u(t), \quad (3)$$

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = q_2 + G_1(n_1(t)) \cdot u(t) - G_2(n_2(t)). \quad (4)$$

Для удобства исследования оптимизации дорожного движения предел управляемой пороговой величины пограничного контроля определен между цифрой 0 и 1, то есть максимальное значение пограничного контроля не превышает цифру 1, минимальное значение пограничного контроля не ниже цифры 0.

$$0 < u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max} < 1, \quad (5)$$

где J – целевая функция теории оптимизации дорожного движения; n_i – количество автомобилей, находящихся в районе i ($i=1,2$), авт; G_i – входящий / выходящий транспортный поток района i ($i=1,2$), авт/ч; q_i – эндогенный / экзогенный транспортный поток района i ($i=1,2$), авт/ч; t_f – время движения в конце мониторинга; u – пограничный контроль для входящего потока между двумя районами.

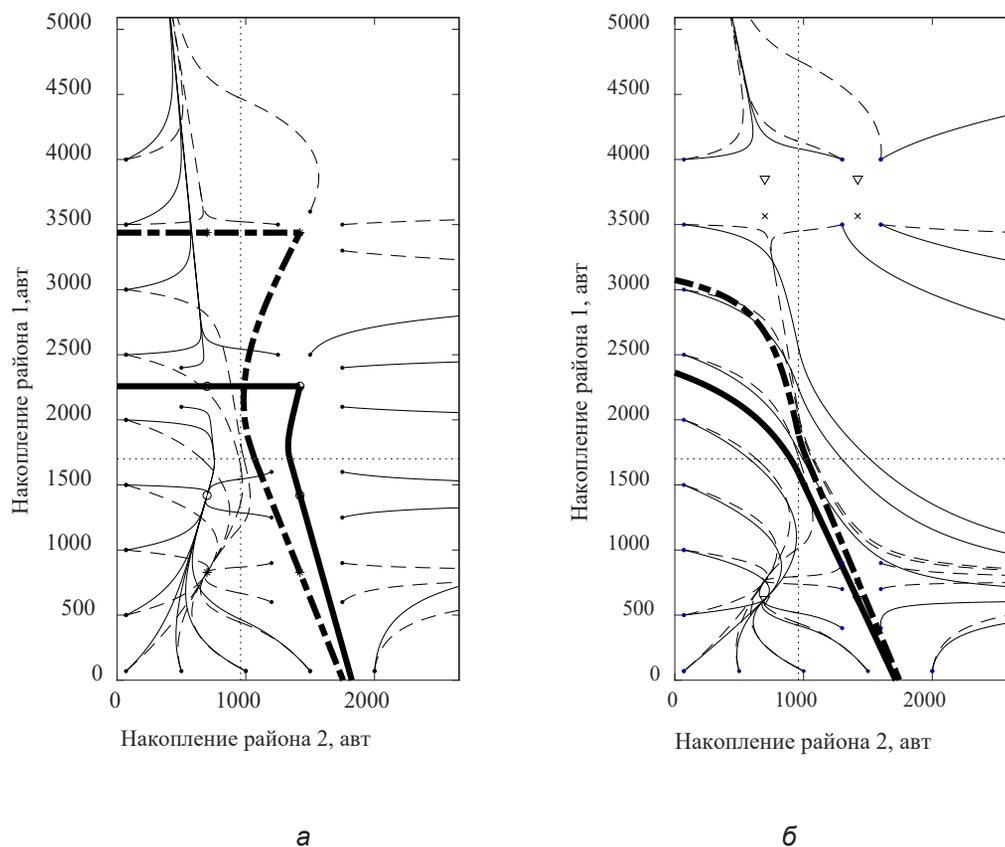


Рисунок 2 – Состояние транспортных потоков и соответственные зоны притяжения при разных параметрах для управления дорожным движением: а – при $u = 0,35$ и $0,6$; б – при $u = 0,65$ и $0,8$
 Источник: составлено авторам.

Figure 2 – The state of traffic flows and the corresponding zones of influence at different parameters for traffic control
 Source: compiled by the authors.

Динамика системы при обработке входящего и выходящего потока в рассматриваемой зоне отображается кривой зависимости между накоплением автомобилей обоих районов, стремящейся к стабильной точке равновесия в определённом временном отрезке (с времени начала поездки 0 до времени конца поездки t_f), и может быть стабильной траекторией в двухзональной системе.

Зона притяжения обоих районов формируется совокупностью всех стабильных траекторий с использованием существующих данных в двухзональной системе. Вследствие собственной характеристики улично-дорожной сети (её структуры и метода управления дорожным движением) состояние транспортного потока для этих стабильных траекторий приближается к сбалансированному положению между входящими и выходящими потоками, которые находятся в зоне притяжения.

Наоборот, под динамикой системы при обработке входящего и выходящего потока в рассматриваемой зоне кривая зависимости между накоплениями автомобилей обоих районов, избегающая от любой точки равновесия, является нестабильной траекторией в двухзональной системе. Совокупностью всех нестабильных траекторий сформировывается непрямоугольная зона обоих районов в двухзональной системе.

Построение стабильных зон и их характеристика при изменениях параметров эндогенного и экзогенного потока

Стратегия оптимизации транспортного потока должна постоянно применяться с переменными методами управления дорожным движением, чередующимися разными параметрами пограничного контроля для различных транспортных условий в рассматриваемых районах.

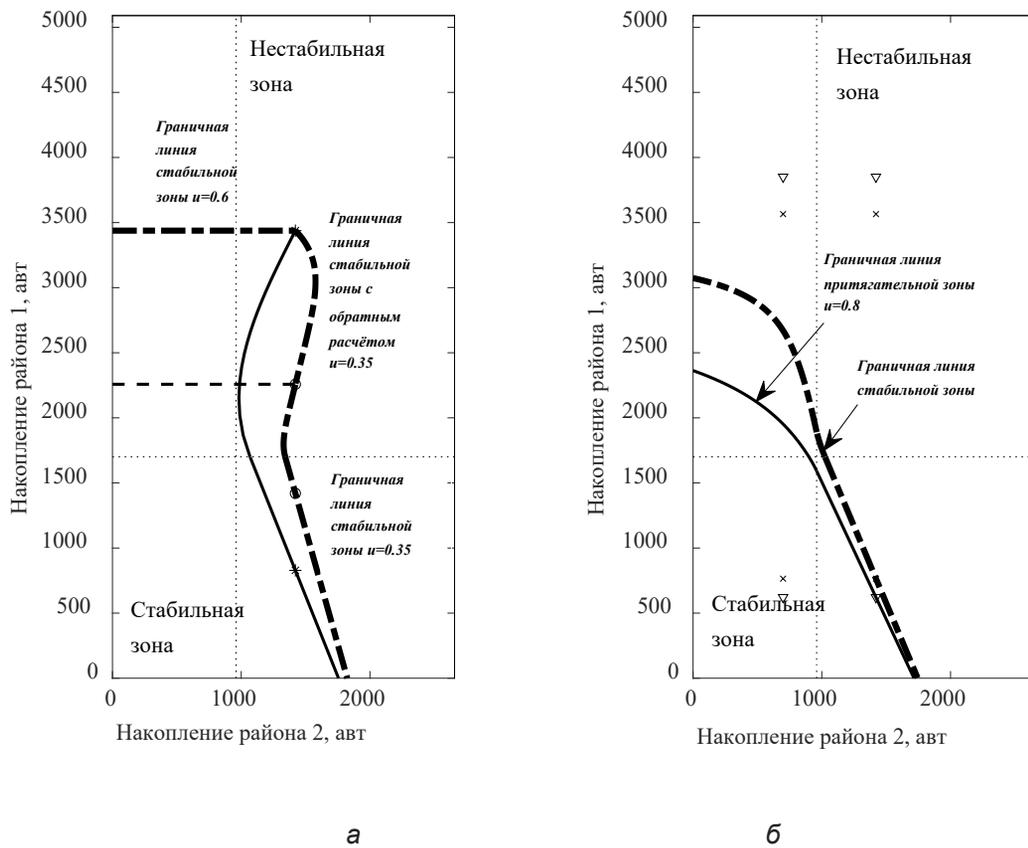


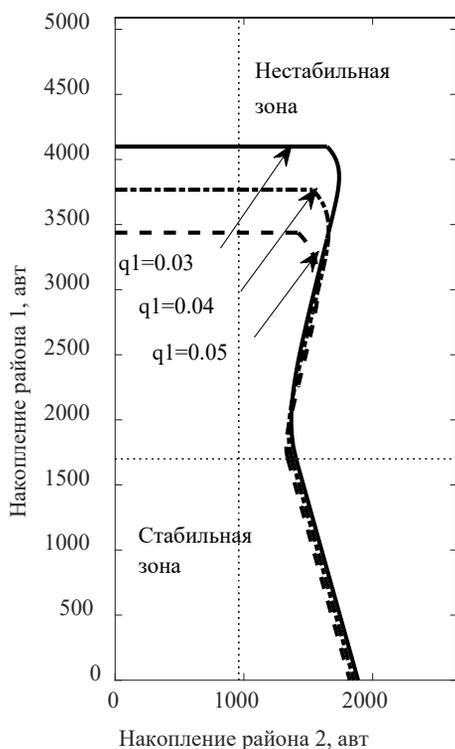
Рисунок 3 – Стабильные зоны при разных параметрах для управления дорожным движением в определённом времени мониторинга (с 0 до tf): а – при $u = 0,35$ и $0,6$; б – $u = 0,65$ и $0,8$
Источник: составлено авторам.

Figure 3 – Stability zones with different parameters for traffic control at a certain monitoring time (from 0 to tf): а – at $u = 0.35$ and 0.6 ; б – $u = 0.65$ and 0.8
Source: compiled by the authors.

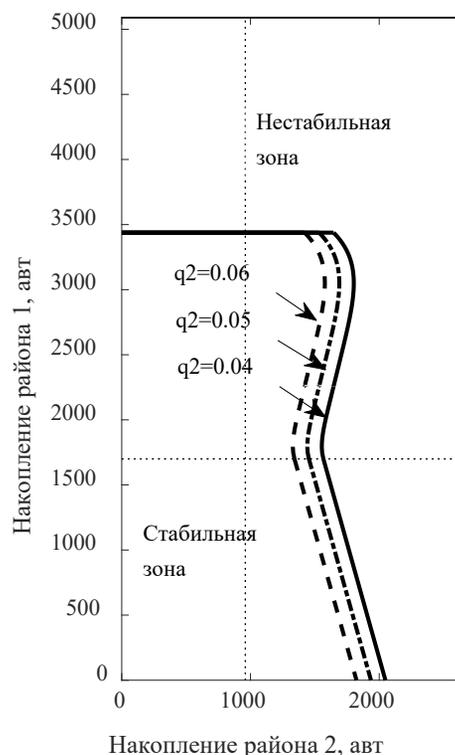
Эти вопросы вызывают необходимость определения района, включая все зоны притяжения для решения оптимизации дорожного движения при переменных параметрах пограничного контроля. Построение стабильных зон является практическим методом с учётом всех зон притяжения и нескольких кривых притяжения для зависимости изменения накопления в обоих районах.

Для построения стабильных зон сначала осуществлялись моделирования состояния транспортных потоков и их зон притяжения при максимальном и минимальном значении пограничного контроля по категориям разных типов зон притяжения с использованием математически-моделирующего комплекса MATLAB (рисунок 2).

Таким образом, стабильная зона типа А сформировалась верхней граничной линией зоны притяжения при пограничных контролях $u = 0,6$, правой граничной линией притягательной зоны при пограничных контролях $u = 0,35$, линией с обратным расчётом зоны притяжения при пограничных контролях $u = 0,35$. По закономерности изменения стабильная зона типа Б полностью сформировалась граничной линией зоны притяжения при пограничных контролях $u = 0,65$. Стабильные зоны разных типов приведены на рисунке 3. До сих пор построенные стабильные зоны показывали динамический интервал изменённых пограничных контролей, который обрабатывается отдельно при разных стратегиях управления дорожным движением.



а



б

Рисунок 4 – Изменения стабильных зон типа А для управления дорожным движением с разными значениями экзогенного потока q_1 и эндогенного потока q_2 : а – при $q_1 = 0,03, 0,04, 0,05$; б – при $q_2 = 0,04, 0,05, 0,06$
 Источник: составлено автором.

Figure 4 – Changes in stability zones of A type for traffic control with different values of q_1 exogenous flow and q_2 endogenous flow
 Source: compiled by the authors.

Из всех полученных формул и математических моделирований состояния транспортных потоков изменение параметров эндогенного и эндогенного потока является одним из самых важных элементов влияния управления дорожным движением. Для всестороннего исследования стабильной зоны под влиянием экзогенного потока q_1 и эндогенного потока q_2 сформировались математические модели с разными измененными значениями транспортных потоков (рисунки 4, 5). В той или иной мере разные внешние и внутренние транспортные потоки приводят к изменению стабильной и нестабильной зоны.

Большие изменения стабильной зоны типа А происходят при увеличении экзогенного по-

тока q_1 , который принесёт к выдавлению пространственного распространения эндогенного потока q_2 , и приводит к уменьшению стабильной зоны. Увеличение эндогенного потока q_2 только вызывает изменения правой граничной линии стабильной зоны, следовательно приведет к уменьшению стабильной зоны типа А.

Аналогичная закономерность изменения стабильной зоны типа Б и В показывается при увеличении экзогенного потока q_1 и приводит к уменьшению стабильной зоны. Однако имеется большая амплитуда изменения граничной линии стабильной зоны перед параметром накопления в 1000 автомобилей района 2, которая затем стремится к стабильному и определённому изменению.

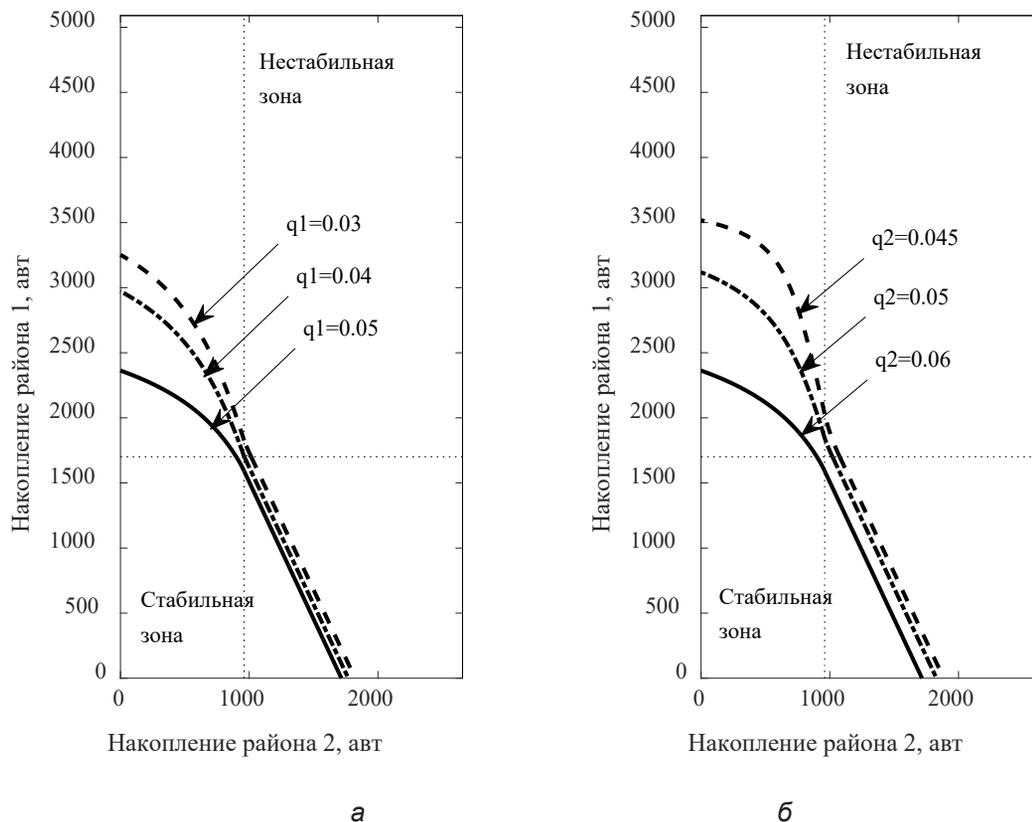


Рисунок 5 – Изменения стабильных зон типа Б и В для управления дорожным движением с разными значениями экзогенного потока q_1 и эндогенного потока q_2 : а – при $q_1 = 0,03, 0,04, 0,05$; б – при $q_2 = 0,045, 0,05, 0,06$
Источник: составлено автором.

Figure 5 – Changes in stability zones of B and C types for traffic control with different values of q_1 exogenous flow and q_2 endogenous flow: а – at $q_1 = 0.03, 0.04, 0.05$; б – at $q_2 = 0.045, 0.05, 0.06$
Source: compiled by the authors.

В отличие от ситуации изменения стабильной зоны типа А (б) увеличение эндогенного потока q_2 приводит к изменению цельной граничной линии стабильной зоны типа Б и В ввиду того, что применяется строгая стратегия ограничения дорожного движения на границах обоих районов рассматриваемой улично-дорожной сети.

Нужно подчеркнуть, что вышеуказанные изменения стабильных зон могут появляться в любом моменте времени мониторинга дорожного движения. Поэтому в дальнейшей работе конкретные стратегии оптимизации дорожного движения определяются в этих динамических стабильных зонах.

КОНКРЕТНАЯ СТРАТЕГИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Возможность получения информации о завершенных поездках в определённом времени мониторинга является важной характеристикой

определения для проектирования оптимизации дорожного движения. В процессе изменения кривых зависимостей накопления обоих районов координаты накопления начального и законченного состояния прогнозируются в двухзональной системе на основе макроскопической основной диаграммы транспортного потока. Однако для тех, что только достигают незаконченное состояние автомобилей в определённом времени мониторинга, алгоритм оптимизации дорожного движения изменяется в том случае, что способствует конкретной ситуации.

Для решения относительно параметра завершенных поездок применяется вышеупомянутая теория максимума для оптимизации дорожного движения на уравнение целевой функции для управления транспортными потоками. В дальнейшем превращение дифференциальные уравнения (3) и (4) интегрируются следующим образом:

$$n_{1,f} + n_{2,f} = \int_0^{t_f} (q_1(t) + q_2(t))dt - \int_0^{t_f} G_2(n_2(t))dt + n_{1,0} + n_{2,0}. \quad (6)$$

Оптимальная стратегия управления получена для решения завершивших поездок с подстановкой уравнения (2):

$$J = \max \left(-n_{1,f} - n_{2,f} + \int_0^{t_f} (q_1(t) + q_2(t))dt + n_{1,0} + n_{2,0} \right). \quad (7)$$

Для решения относительного параметра незавершенных поездок применяется принцип максимума Понтрягина (Pontryagin maximum principle – PMP). Применение принципа максимума Понтрягина следующего вида:

$$H = \frac{K_{пс,1}}{n_{пс,1}} \cdot n_1(t) \cdot u(t) \cdot (p_1(t) - p_2(t)) + p_1(t) \cdot q_1 + p_2(t) \cdot \left(q_2 - \frac{K_{пс,2}}{n_{пс,2}} \cdot n_2(t) \right) + \frac{K_{пс,2}}{n_{пс,2}} \cdot n_2(t), \quad (8)$$

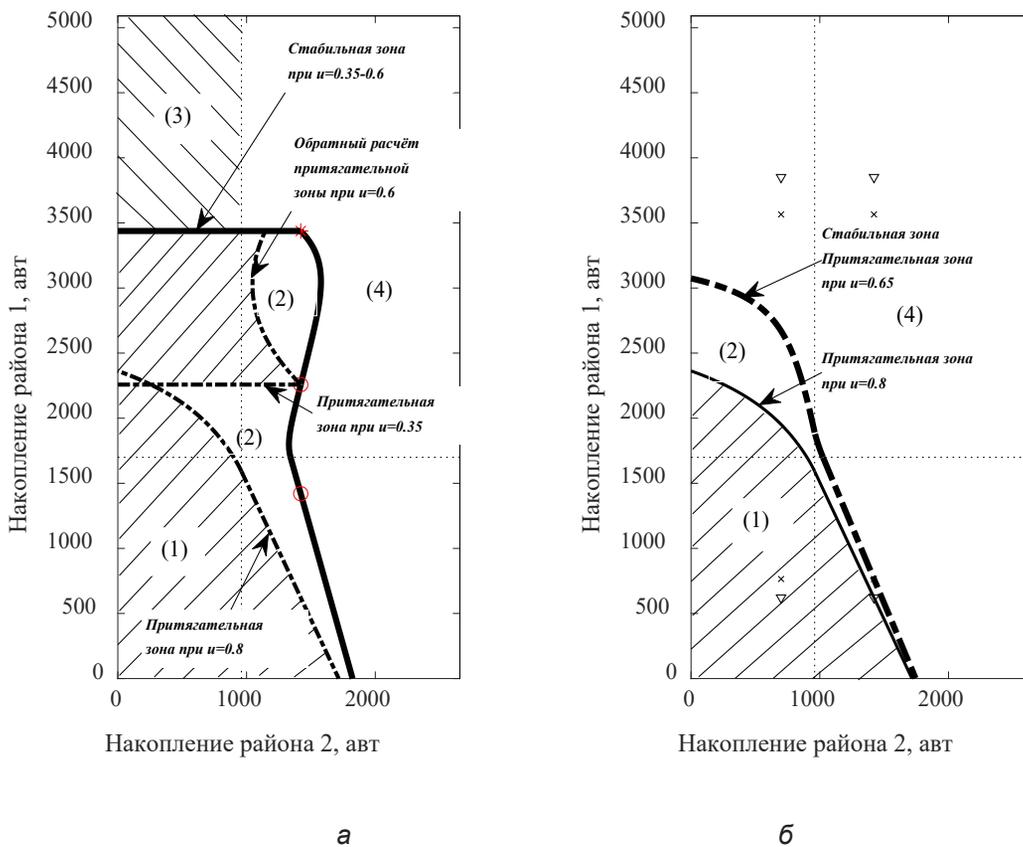


Рисунок 6 – Проектный вариант оптимизации транспортного потока для рассматриваемого района с многообразными стратегиями управления дорожным движением: а – при $u = 0,35-0,6$; б – при $u = 0,65-0,8$
 Источник: составлено автором.

Figure 6 – Design variant of traffic flow optimization for the considered area with diverse traffic management strategies: а – at $u = 0.35-0.6$; б – at $u = 0.65-0.8$
 Source: compiled by the authors.

где H – значение Гамильтониана для решения оптимизации дорожного движения; $p_1(t)$ и $p_2(t)$ – переменные стоимости при выполнении следующих условий:

$$\frac{dp_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial n_1} = \frac{K_{nc,1}}{n_{nc,1}} \cdot u(t) \cdot (p_1(t) - p_2(t)); \quad (9)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial n_2} = \frac{K_{nc,2}}{n_{nc,2}} \cdot (p_2(t) - 1). \quad (10)$$

Следовательно, оптимальная стратегия управления получена для решения незаконченного состояния при переменной стоимости

$$u(t) = \begin{cases} u_{\max}, & p_2(t) - p_1(t) > 0 \\ u_{\min}, & p_2(t) - p_1(t) < 0 \end{cases}. \quad (11)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рассматриваемой двухзональной системе выполняется 4 сочетания стратегии для управления дорожным движением, обслуживающего проектный вариант оптимизации с различными состояниями транспортного потока:

1 – оптимальная стратегия управления для решения относительно параметра завершённых поездок при максимальном контроле u_{\max} ;

2 – оптимальная стратегия управления для решения относительно параметра завершённых поездок при минимальном контроле u_{\min} ;

3 – оптимальная стратегия управления для решения относительно параметра незавершённых поездок при максимальном контроле u_{\max} ;

4 – оптимальная стратегия управления для решения относительно параметра незавершённых поездок при минимальном контроле u_{\min} .

Распространение сочетаний стратегии управления дорожным движением приведена на рисунке 6.

Проектный вариант оптимизации транспортного потока отдельно относится к двум случаям, применяющимся в конкретной ситуации дорожного движения, соответственно со значениями контроля $u = 0,35-0,6$ и $u = 0,65-0,8$. Нужно подчеркнуть, что выполняется 4 сочетания стратегии управления дорожным движением при $u = 0,35-0,6$, однако только 3 сочетания при $u = 0,65-0,8$. Поэтому для каждой многозональной системы дорожной

сети необходимо сформировать собственный характеристический вариант оптимизации транспортного потока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зырянов В. В. Особенности применения основной диаграммы транспортного потока на сетевом уровне // Известия волгоградского государственного технического университета. Серия: наземные транспортные системы. Волгоградский государственный технический университет. 2013. С. 71-74. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20901102>.
2. Daganzo C. F. Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches. // Transportation Research Part B: Methodological. 2007. vol. 41(1). pp. 49 – 62. DOI: 10.1016/j.trb.2006.03.001.
3. Daganzo C. F., Geroliminis N. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic // Transportation Research Part B: Methodological. 2008. vol. 42(9). pp. 771 – 781. DOI: 10.1016/j.trb.2008.06.008.
4. Geroliminis N., Sun J. Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic // Transportation Research Part B: Methodological. 2011. vol. 45(3). pp. 605– 617. DOI: 10.1016/j.trb.2010.11.004.
5. Haddad J., Ramezani M., Geroliminis N. Cooperative traffic control of a mixed network with two urban regions and a freeway // Transportation Research Part B: Methodological. 2013. vol. 54. pp. 17– 36. DOI: 10.1016/j.trb.2013.03.007.
6. Ji Y., Geroliminis N. Spatial and temporal analysis of congestion in urban transportation networks // In: Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC. 2011. <http://www.strc.ch/2010/Ji.pdf>.
7. Loder A., Bliemer M., Axhausen K. Optimal pricing and investment in a multi-modal city — Introducing a macroscopic network design problem based on the MFD // Transportation Research Part A: Policy and Practice. 2022. vol. 156. pp. 113 – 132. DOI: 10.1016/j.tra.2021.11.026.
8. Paipuri M., Xu Y., Gnozalez M., Leclercq L. Estimating MFDs, trip lengths and path flow distributions in a multi-region setting using mobile phone data // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2020. vol. 118. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102709.
9. Zyryanov V. V. Simulation Network-Level Relationships of Traffic Flow // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. DOI:10.1088/1757-899X/698/6/066049.
10. Aboudolas K., Geroliminis N. Perimeter and boundary flow control in multi-reservoir heterogeneous networks // Transportation Research Part B: Methodological. 2013. vol. 55. pp. 265– 281. DOI: 10.1016/j.trb.2013.07.003.
11. Geroliminis N., Haddad J., Ramezani M. Optimal perimeter control for two urban regions with macroscopic fundamental diagrams: a model predictive approach // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2013. vol. 14(1). pp. 348– 359. DOI: 10.1109/TITS.2012.2216877.

12. Guo Y., Yang L., Hao S., Gu X. Perimeter traffic control for single urban congested region with macroscopic fundamental diagram and boundary conditions // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2021. vol. 562. DOI: 10.1016/j.physa.2020.125401.

13. Gao S., Li D., Zheng N., Hu R., She Z. Resilient perimeter control for hyper-congested two-region networks with MFD dynamics // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2022. vol. 156. pp. 50 – 75. DOI: 10.1016/j.trb.2021.12.003.

14. Menelaou C., Timotheou S., Kolios P., Panayiotou C. Joint route guidance and demand management using generalized MFDs // *IFAC-PapersOnLine*. 2020. vol. 53(2). pp. 15023– 15028. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2002.

15. Zhang L., Garoni T., Gier J. A comparative study of Macroscopic Fundamental Diagrams of arterial road networks governed by adaptive traffic signal systems // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2013. vol. 49. pp. 1– 23. DOI: 10.1016/j.trb.2012.12.002.

16. Haddad J., Ramezani M., Geroliminis N. Cooperative traffic control of a mixed network with two urban regions and a freeway // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2013. vol. 54. pp. 17– 36. DOI: 10.1016/j.trb.2013.03.007.

17. Haddad J. Optimal perimeter control synthesis for two urban regions with aggregate boundary queue dynamics // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. vol. 96. pp. 1 – 25. DOI: 10.1016/j.trb.2016.10.016.

18. Kouvelas A., Saeedmanesh M., Geroliminis N. Enhancing model-based feedback perimeter control with data-driven online adaptive optimization // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. vol. 96. pp. 26– 45. DOI: 10.1016/j.trb.2016.10.011.

19. Haddad J., Mirkin B. Coordinated distributed adaptive perimeter control for large-scale urban road networks // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2017. vol. 77. pp. 495– 515. DOI: 10.1016/j.trc.2016.12.002.

REFERENCES

1. Zyrjanov V. V. Osobennosti primeneniya osnovnoj diagrammy transportnogo potoka na setevom urovne [Features of the application of the main diagram of the traffic flow at the network level]. *Izvestija volgogradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija: nazemnye transportnye sistemy. Volgogradskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet*. 2013: 71-74. (in Russ.) <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20901102>.

2. Daganzo C. F. Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2007; 41(1): 49 - 62. DOI: 10.1016/j.trb.2006.03.001.

3. Daganzo C. F., Geroliminis N. An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2008; 42(9): 771 – 781. DOI: 10.1016/j.trb.2008.06.008.

4. Geroliminis N., Sun J. Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traf-

fic. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2011; 45(3): 605– 617. DOI: 10.1016/j.trb.2010.11.004.

5. Haddad J., Ramezani M., Geroliminis N. Cooperative traffic control of a mixed network with two urban regions and a freeway. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2013; 54: 17– 36. DOI: 10.1016/j.trb.2013.03.007.

6. Ji Y., Geroliminis N. Spatial and temporal analysis of congestion in urban transportation networks. In: *Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington, DC. 2011. <http://www.strc.ch/2010/Ji.pdf>.

7. Loder A., Bliemer M., Axhausen K. Optimal pricing and investment in a multi-modal city — Introducing a macroscopic network design problem based on the MFD. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2022; 156: 113 – 132. DOI: 10.1016/j.tra.2021.11.026.

8. Paipuri M., Xu Y., Gnozalet M., Leclercq L. Estimating MFDs, trip lengths and path flow distributions in a multi-region setting using mobile phone data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2020. vol. 118. DOI: 10.1016/j.trc.2020.102709.

9. Zyryanov V. V. Simulation Network-Level Relationships of Traffic Flow. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. DOI:10.1088/1757-899X/698/6/066049.

10. Aboudolas K., Geroliminis N. Perimeter and boundary flow control in multi-reservoir heterogeneous networks. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2013; 55: 265 – 281. DOI: 10.1016/j.trb.2013.07.003.

11. Geroliminis N., Haddad J., Ramezani M. Optimal perimeter control for two urban regions with macroscopic fundamental diagrams: a model predictive approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2013; 14(1): 348– 359. DOI: 10.1109/TITS.2012.2216877.

12. Guo Y., Yang L., Hao S., Gu X. Perimeter traffic control for single urban congested region with macroscopic fundamental diagram and boundary conditions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2021. vol. 562. DOI: 10.1016/j.physa.2020.125401.

13. Gao S., Li D., Zheng N., Hu R., She Z. Resilient perimeter control for hyper-congested two-region networks with MFD dynamics. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2022. vol. 156. pp. 50 – 75. DOI: 10.1016/j.trb.2021.12.003.

14. Menelaou C., Timotheou S., Kolios P., Panayiotou C. Joint route guidance and demand management using generalized MFDs. *IFAC-PapersOnLine*. 2020. vol. 53(2). pp. 15023-15028. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2002.

15. Zhang L., Garoni T., Gier J. A comparative study of Macroscopic Fundamental Diagrams of arterial road networks governed by adaptive traffic signal systems. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2013; 49: 1– 23. DOI: 10.1016/j.trb.2012.12.002.

16. Haddad J., Ramezani M., Geroliminis N. Cooperative traffic control of a mixed network with two urban regions and a freeway. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2013; 54: 17– 36. DOI: 10.1016/j.trb.2013.03.007.

17. Haddad J. Optimal perimeter control synthesis for two urban regions with aggregate boundary queue dynamics. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017; 96: 1 – 25. DOI: 10.1016/j.trb.2016.10.016.

18. Kouvelas A., Saeedmanesh M., Geroliminis N. Enhancing model-based feedback perimeter control with data-driven online adaptive optimization. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017; 96: 26– 45. DOI: 10.1016/j.trb.2016.10.011.

19. Haddad J. Mirkin B. Coordinated distributed adaptive perimeter control for large-scale urban road

networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2017; 77: 495 515. DOI: 10.1016/j.trc.2016.12.002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Цзянь Хайянь – аспирант кафедры «Организация перевозок и дорожного движения».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR:

Jiang Haiyan – Postgraduate Student of the Transportation and Traffic Management Department.