

*На правах рукописи*



ЦЗЯНГ Хайянь

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ  
УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ  
НА СЕТЕВОМ УРОВНЕ**

Специальность 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орел - 2022

Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет».

**Научный руководитель:** **Зырянов Владимир Васильевич,**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Дорохин Сергей Владимирович,**  
доктор технических наук, доцент,  
декан автомобильного факультета, ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный лесотехнический  
университет имени Г.Ф. Морозова» (г. Воронеж);

**Шевцова Анастасия Геннадьевна,**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры эксплуатации и организации  
движения автотранспорта, ФГБОУ ВО «Белгородский  
государственный технологический университет им.  
В.Г. Шухова» (г. Белгород).

**Ведущая организация:** **федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Кубанский государственный технологический  
университет», г. Краснодар**

Защита состоится **«16» декабря 2022 г. в 11.00 ч.** на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.032.03 на базе ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» по адресу: 302030, г. Орёл, ул. Московская, д. 77, аудитория 426.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и в фундаментальной библиотеке по адресу: 302028, г. Орёл, пл. Каменская д.1.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г. Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и на официальном сайте Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (<http://www.vak.minobrnauki.gov.ru>).

*Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации в двух экземплярах  
направлять в диссертационный совет по адресу:*

*302030, г. Орёл, ул. Московская, д. 77.*

*Телефон для справок +7(960)647-66-60, E-mail: srmostu@mail.ru*

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
канд. техн. наук, доцент



Васильева В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время происходят существенные изменения в методах и средствах сбора и обработки данных о параметрах транспортных потоков, управления дорожным движением особенно в приложении к улично-дорожной сети больших размеров в крупных городах. Важнейшим стимулом для таких тенденций являются сложные условия движения вследствие высокого уровня автомобилизации, перегруженности улично-дорожной сети, транспортных заторов. Поэтому постоянно идут процессы развития теории транспортных потоков и ее приложений для решения практических задач управления дорожным движением и появления соответствующих технологий и технических средств для реализации новых теоретических положений.

На новый уровень эти процессы вышли при развитии интеллектуальных транспортных систем. Информационное обеспечение систем управления дорожным движением вышло на новый уровень благодаря высокой степени насыщения дорожной сети транспортными детекторами всех типов, использования данных навигационных систем и средств мобильной связи. Вследствие этого особую актуальность приобретает использование моделирования дорожного движения, поскольку доступность данных об изменении параметров транспортных потоков в реальном режиме времени позволяет расширить масштабы практического применения моделирования. Особенно важной является роль моделирования в функциональной области, связанной с обеспечением систем поддержки принятия решений в связи со все большим применением сетевых методов управления и значительной вариативностью имеющихся алгоритмов управления

Однако в настоящее время все-таки преобладают локальные методы управления дорожным движением или координированное управление на магистральном уровне, имеется большой опыт применения таких алгоритмов и их эффективность достаточно легко доказать для локального объекта управления. Ситуация кардинально меняется при переходе к сетевым методам управления дорожным движением. Необходимо наличие моделей, обеспечивающих системы управления расчетными данными в реальном режиме времени, а для этого требуется обеспечить баланс между уровнем детализации моделей, адекватностью и оперативностью вычислительных процедур. При сетевых методах на эффективность управления оказывает влияние выбор зоны управления с однородными характеристиками транспортных потоков и топологией сети, что обычно остается за пределами внимания.

С этой точки зрения на основе функциональных возможностей ИТС возрос интерес к использованию сетевых макромоделей и сетевой основной диаграммы транспортного потока. Эти макромоделей позволяют определить

функции стабильного состояния, описывающая определенные зависимости между накоплением транспортных средств в определенной зоне и специфическими параметрами – производительностью, эффективностью сети наряду со средней скоростью, интенсивностью, плотностью. Преимущество макроскопической основной диаграммы транспортного потока проявляется в том, что не требуются многие входные данные и имеется низкая восприимчивость для динамических матриц корреспонденций на улично-дорожной сети города. Основным принципом этой теории является применение методов управления дорожным движением на основе нахождения оптимального значения накопления автомобилей для обеспечения максимального значения параметров макроскопической основной диаграммы транспортного потока.

Однако практика управления дорожным движением показывает, что оптимальная стратегия управления дорожным движением не может быть реализована в целом для городской транспортной системы. Ввиду неравномерности загрузки улично-дорожной сети в разных зонах, различных топологических характеристик сети, найденные решения являются обобщенными. Поэтому актуальным является применение макроскопической основной диаграммы для управления дорожным движением на многозональном уровне для связанных зон улично-дорожной сети с различными стратегиями управления для этих зон.

#### **Степень разработанности темы исследования.**

При анализе работ, посвященных методам применения макромоделей в системах поддержки принятия решений и системах управления дорожным движением установлено, что основное внимание уделяется таким аспектам как оценка параметров транспортных потоков и условий дорожного движения в какой-либо точке или локальном объекте. В результате этих исследований определены требования к сбору исходных данных, разработаны методы оценки условий движения для приведенных выше объектов, обоснованы методы применения макромоделей при определении параметров светофорного регулирования.

Ситуация кардинально меняется при переходе к сетевым методам управления дорожным движением. Необходимо наличие моделей, обеспечивающих системы управления расчетными данными в реальном режиме времени, а для этого требуется обеспечить баланс между уровнем детализации моделей, адекватностью и оперативностью вычислительных процедур. При сетевых методах на эффективность управления оказывает влияние выбор зоны управления с однородными характеристиками транспортных потоков и топологией сети, что обычно остается за пределами внимания.

Важной является проблема применения макромоделей для управления дорожным движением на сетевом уровне. Существующие подходы на сетевом уровне основаны на упрощенных моделях, которые тем не менее

требуют большого количества входных параметров и не могут быть использованы в режиме реального времени, являются фрагментарными и недостаточно определенными в отношении целевой функции оптимизации на уровне сети. Сложность задачи также обусловлена тем, что в каждом конкретном случае улично-дорожная сеть имеет свои особенности, нуждается в декомпозиции для дифференциации стратегии управления.

Одним из современных направлений для разрешения этих проблемных задач является применение сетевой макроскопической основной диаграммы транспортного потока с параметрами, адаптированными под оценку сетевой эффективности и возможностью применения для многозональной стратегии управления дорожным движением.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности управления дорожным движением в городах на основе применения макромоделей сетевого уровня при разделении улично-дорожной сети на зоны управления

**Задачи исследования:**

1. Провести анализ теоретических положений создания макромоделей транспортных потоков, их методической и прикладной реализации в процессе развития методов управления дорожным движением на сетевом уровне.

2. Разработать методику определения параметров сетевой основной диаграммы транспортного потока на основе системы мониторинга дорожного движения с использованием интеллектуального видеонаблюдения.

3. Провести экспериментальные исследования по сбору и обработке данных о параметрах транспортных потоков применительно к реализации зональных схем управления в крупных городах.

4. Разработать модели определения оптимальных значений параметров сетевой основной диаграммы транспортного потока в различных зонах с контролем транспортного потока на границах зон при многозональном управлении.

5. На основе разработанных моделей и фактических данных определить варианты оптимизации дорожного движения с учетом регулирования нагрузки на границах различных зон внутри города.

**Объект исследования:** транспортные потоки на улично-дорожной сети города.

**Предмет исследования:** процессы управления дорожным движением.

**Рабочая гипотеза:** применение сетевой макроскопической диаграммы транспортного потока, методов регулирования на границах зон города и накопления автомобилей в этих зонах обеспечивает повышение эффективности управления дорожным движением.

Методология и методы исследования. Диссертационная работа

выполнена на основе теоретических и методологических работ ведущих ученых в области организации и управления дорожным движением, интеллектуальных транспортных систем, статистического анализа больших данных, моделирования дорожного движения на сетевом уровне. Совокупность натуральных данных получена при самостоятельных экспериментальных исследованиях, анализе статистических данных Государственного статистического управления Китайской Народной Республики, Центра исследования дорожно-транспортной безопасности Министерства общественной безопасности Китайской Народной Республики, научных и информационных публикаций в журнальных статьях, научных докладах и отчетах, материалах научных конференций.

В процессе обработки транспортных данных экспериментальных исследований, моделирования и оптимизации дорожного движения использовались база данных SQL2014, Excel 2019, AutoCAD 2020, математико-моделирующий комплекс MATLAB 2019a.

**Научная новизна исследования:**

1. Сформированы основные принципы применения макромоделей и сетевой основной диаграммы транспортного потока при управлении дорожным движением, разработаны требования к определению параметров этих моделей для применения многозональных методов управления дорожным движением.

2. Разработаны математические модели определения оптимального накопления автомобилей в различных зонах для повышения эффективности управления дорожным движением;

3. На основе математического моделирования установлены возможные состояния транспортного потока в связанных зонах для принятия решений по управлению дорожным движением.

**Теоретическая значимость работы** определяется методикой получения и анализа параметров сетевой основной диаграммы транспортного потока, математическими моделями оценки стабильных и неустойчивых состояний транспортного потока в связанных зонах улично-дорожной сети города, методом оптимизации условий функционирования сети на основе накопления транспортных средств в зонах управления.

**Практическая значимость работы** заключается в формировании подхода для системы принятия решений по управлению дорожным движением. Полученные результаты имеют прикладной характер и используются для решения практических задач управления дорожным движением путем в г. Цзынань (КНР).

Также результаты работы используются в учебной процессе при подготовке кадров по направлению 23.03.01 «Технология транспортных процессов» в Донском государственном техническом университете и Шаньдунском транспортном университете (КНР).

**Методология и методы исследования** представлены теоретическими

и экспериментальными исследованиями, включающими получение данных с помощью современных средств регистрации параметров транспортных потоков, обработку и анализ полученных данных с использованием методов математической статистики, применением математического моделирования.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Построение сетевых макроскопических основных диаграмм транспортных потоков с проведением анализа полученных данных в системе мониторинга дорожного движения.

2. Математические макромоделли, методы и алгоритмы для моделирования состояния транспортных потоков и определения вариантов оптимизации дорожного движения.

3. Результаты математического анализа результатов оценки функционирования состояния дорожного движения в связанных зонах улично-дорожной сети.

**Степень достоверности и апробация результатов.**

Обоснованность и достоверность выносимых на защиту научных результатов обеспечиваются применением методики исследования на основе современных математических методов, апробацией результатов исследования на международных конференциях.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях: 14-ой международной научно-практической конференция «Прогрессивные технологии в транспортных системах» 20-22 ноября 2019 г. (г. Оренбург), 2-ом всероссийском научном конкурсе по техническим направлениям среди иностранных обучающихся в высших учебных заведениях России - 24 декабря 2020 г. (г. Москва), 7-ой международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте» 18-19 мая 2021 г. (г. Орел), 10-ой Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2021)» 20-22 октября 2021 г. (г. Санкт-Петербург), 3-м международном научном симпозиуме «Перспективные технологии аэрокосмической техники (ТАКТ-2021)», Севастополь, 06 – 10 сентября 2021 г., 8-ой международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте» 16-19 мая 2022 г. (г. Орел).

**Личный вклад автора.** Все основные результаты исследования и варианты определения оптимизации дорожного движения получены автором самостоятельно.

**Соответствие диссертационной работы паспорту специальности.**

Выполненные исследования соответствуют формуле паспорта научной специальности 2.9.5. Эксплуатация автомобильного транспорта по пунктам: «Исследования в области безопасности движения с учетом

технического состояния автомобиля, дорожной сети, организации движения автомобилей, качеств водителей, проведение дорожно-транспортной экспертизы, разработка мероприятий по снижению аварийности».

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 научных работах общим объемом п.л., в том числе три в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, одна, входящая в международную реферативную базу Scopus.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, основных результатов и выводов, двух приложений, содержит 168 страниц, 32 таблицы, 62 рисунка. Библиографический список включает 125 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность работы, излагаются цели исследования, научная новизна и практическая ценность, а также основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена сбору, обработке и анализу параметров транспортных потоков с использованием функциональных возможностей современных систем мониторинга дорожного движения. Приведен анализ развития методов мониторинга дорожного движения с использованием технологий интеллектуальных транспортных систем в различных странах мира.

Проведён обзор принципов работы систем мониторинга дорожного движения с использованием интеллектуального видеонаблюдения для получения информации, которая может быть использована в целях выполнения диссертационной работы по получению сетевой макроскопической диаграммы транспортного потока и двухкомпонентных моделей кинетической теории транспортного потока. Поскольку в данном случае должны быть получены параметры дорожного движения не в одной точке, а согласованные данные в сети с возможностью выделения различных зон, необходимы соответствующие требования.

С этой целью проведён анализ применения транспортных данных систем мониторинга дорожного движения с помощью интеллектуального видеонаблюдения на сетевом уровне. Изучен опыт применения транспортных данных следующих систем мониторинга интеллектуального видеонаблюдения:

- платформа обработки данных транспортных потоков на примере улично-дорожной сети г. Шэньчжэнь (Китай);
- практическое исследование о восстановлении матриц корреспонденций на основе транспортных данных из системы мониторинга интеллектуального видеонаблюдения г. Таншань (Китай);
- система мониторинга транспортных потоков в г. Цзинань (Китай).



В результате анализа установлено, что для получения данных в случае использования макроскопической основной диаграммы транспортного потока на сетевом уровне необходимо получение следующей информации:

- регистрация интенсивности движения и количества транспортных средств на всех входах и выходах в соответствующие зоны города в одни и те же промежутки времени;
- регистрация скорости движения в каждой зоне управления;
- регистрация плотности транспортного потока в каждой зоне управления;
- идентификация транспортных средств для определения матриц корреспонденций в зоне управления определения времени поездки в каждой зоне;
- определение количества автомобилей в каждой зоне управления.

Наличие этих данных обеспечивает получение макроскопической основной диаграммы транспортного потока на сетевом уровне. В результате проведенных исследований эффективность и надёжность исходных данных подтверждены на примерах практических исследований для мониторинга состояния транспортного потока, осуществления перераспределения транспортной нагрузки, оптимизация дорожного движения и избежание блокированного затора на городской улично-дорожной сети. Именно такие данные получены в диссертационной работе.

**Во второй главе** проведен теоретический анализ развития моделей дорожного движения с акцентом на адаптацию макромоделей к решению сетевых задач и проверка свойств этих моделей на основе полученных автором экспериментальных данных.

В диссертационной работе улично-дорожная сеть центральной части г. Цзинань представляет как объект исследования для моделирования дорожного движения в крупном городе, учитывающем топологические характеристики сети, неопределённость маршрутизации автомобильных перевозок и многообразность методов регулирования. Для всестороннего исследования состояний транспортных потоков и особенности организации дорожного движения исходные данные, имеющие большое изменение, были выбраны за период наблюдений г. Цзинань (с 6:00 до 10:00 часов).

В результате обследования и изучения существующей системы мониторинга установлено, что система интеллектуального видеонаблюдения контролирует около 70% главных участков улично-дорожной сети г. Цзинань. По материалу обследования и изучения географическое распределение транспортных детекторов на рассматриваемом фрагменте сети центральной части г. Цзинань приведено на рис. 1.

По полученным экспериментальным данным исследовались свойства широко применяемой модели BPR, описывающей зависимости между временем поездки и интенсивностью дорожного движения. Выявлено, что

практически постоянно эта модель применяется с коэффициентами, которые были получены несколько десятилетий назад. Поэтому в диссертационной работе приведены рекомендации по использованию различных коэффициентов в зависимости от условий организации дорожного движения.



Рисунок 1 – фрагмент сети центральной части г. Цзинань: (а) Заметки распределения транспортного детектора; (б) Нумерация положения транспортных детекторов

Проведены исследования двухкомпонентных макромоделей кинетической теории транспортного потока, учитывающих характеристики городской улично-дорожной сети разработанных Р. Херманом и И. Пригожиным. В диссертационной работе транспортные данные интеллектуального видеонаблюдения обработаны с применением двухкомпонентных макромоделей кинетической теории транспортного потока. Для повышения приспособляемости обобщенной макромоделей Пайпса в городской улично-дорожной сети используется поправочный коэффициент  $p$  из приведенного выше соотношения между плотностью и долей одновременно остановившихся автомобилей: в сети

$$k = k_j \cdot \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_f} \right)^{\frac{1}{n+1}} \right]^{\frac{1}{p}} \quad (1)$$

$$q = k_j \cdot v \cdot \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_f} \right)^{\frac{1}{n+1}} \right]^{\frac{1}{p}} \quad (2)$$

где  $q$  – интенсивность движения, авт/ч;  $v_f$  – скорость свободного движения, км/ч;  $n$  – коэффициент пропорциональности;  $k$  – плотность транспортного потока;  $k_j$  – максимальная плотность транспортного потока;  $p$  – поправочный коэффициент для учета пространственной неоднородности.

Для каждого участка сети получены зависимости между интенсивностью, плотностью и скоростью для дальнейшего использования в оптимизационных расчетах. Зависимости для одного из участков приведены на рис.2.

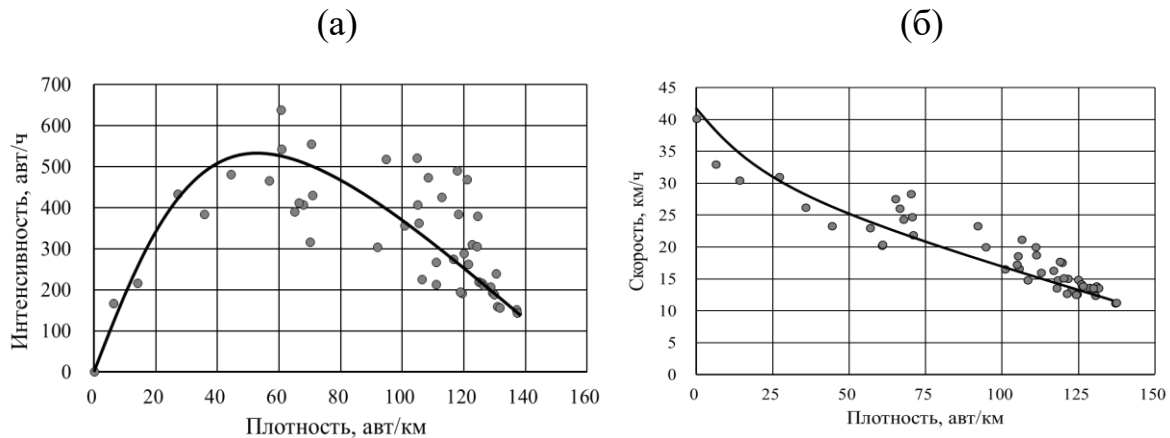


Рисунок 2 – зависимости между характеристиками транспортного потока по обобщенным макромоделям Пайпса с применением поправочных коэффициентов на примере участка сети 21-19 г. Цзинань (КНР): (а) между интенсивностью и плотностью; (б) между скоростью и плотностью

В третьей главе приведены теоретические положения макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока (Macroscopic Fundamental Diagram – MFD). Основными параметрами MFD являются:

- производительность – общий пробег всех автомобилей в улично-дорожной сети за единицу времени, авт\*км/ч;
- эффективность – средняя интенсивность движения в улично-дорожной сети, авт/ч;
- накопление – число автомобилей в улично-дорожной сети, авт.

Целевым параметром, на основе которого принимаются решения, является параметр накопления автомобилей в какой-либо зоне города. Отношение между накоплением и потоками на участке сети описывается следующим уравнением:

$$n_i(t) = (O_i(t) + U_i(t)) - (E_i(t) + D_i(t)) \quad (1)$$

где

- $n_i$  – накопление автомобилей в  $i$ -ой зоне сети;
- $O_i$  – эндогенный входящий поток  $i$ -ой зоны;
- $U_i$  – экзогенный входящий поток  $i$ -ой зоны;
- $E_i$  – эндогенный выходящий поток  $i$ -ой зоны;
- $D_i$  – экзогенный выходящий поток  $i$ -ой зоны;
- $x$  – общая длина дорог в сети;
- $t$  – время.

Для исследуемой зоны улично-дорожной сети максимальный объем производительности достигает 28000 авт\*км/ч при уровне накопления около 2600 автомобилей в диапазоне от 2000 до 3000 автомобилей. На основе полученных экспериментальных данных построены зависимости между этими параметрами для центральной части г. Цзинань.

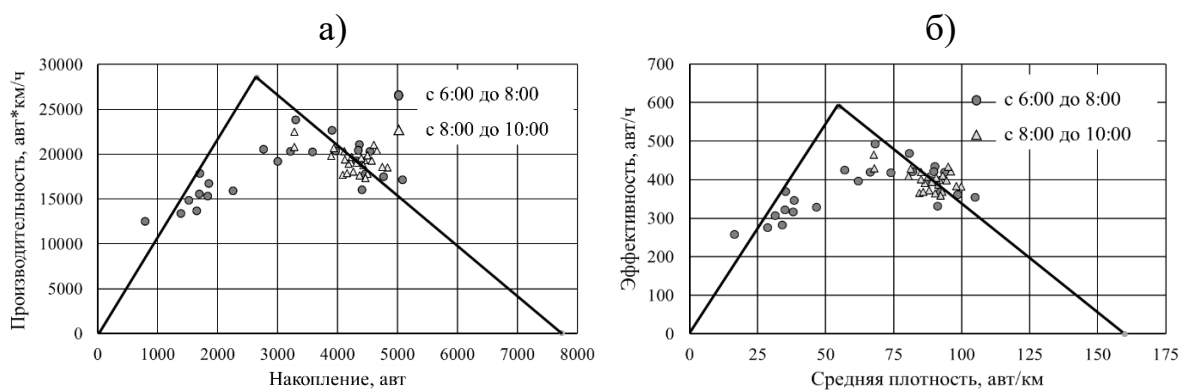


Рисунок 3 – Макроскопическая фундаментальная диаграмма: (а) зависимость между производительностью и накоплением; (б) зависимость между эффективностью и средней плотностью

Для исследования свойств макроскопической фундаментальной диаграммы проработаны следующие варианты: топология улично-дорожной сети; увеличение пропускной способности участков сети; повышение скорости свободного движения; совершенствование светофорного регулирования. Установлено, что основной параметр макроскопической фундаментальной диаграммы – производительность (авт\*км/ч) является свойством структуры улично-дорожной сети, управления движением, а не только свойством интенсивности транспортного потока.

В четвертой главе на основе полученных макроскопических фундаментальных диаграмм транспортного потока были сформированы методы анализа состояния транспортных потоков и стратегии оптимизации дорожного движения с учетом особенностей двух городских районов.

Для формирования стратегии управления дорожным движением на основе макроскопической основной диаграммы использовалась следующая улично-дорожная сеть города, разделенная на две зоны – протяженность дорог первой зоне составляет 16,11 км, во второй – 10,34 км (рис 4).

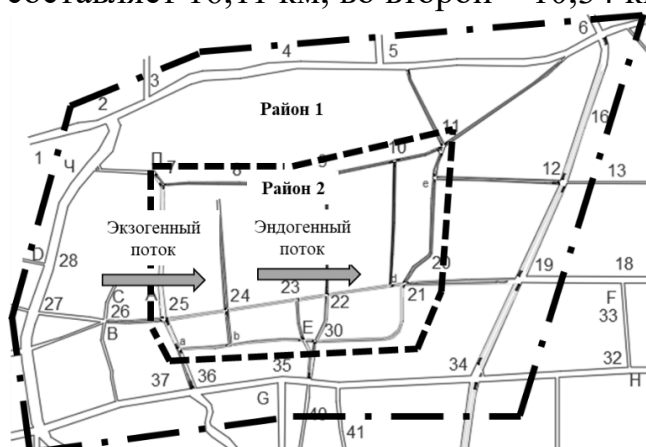


Рисунок 4 – Фрагмент улично-дорожной сети центральной части г. Цзинань в двухзональной системе

Второй район может называться центральной зоной. По анализу категории источников транспортных данных в районе 2 производится большинство эндогенного потока, когда пункт отправления и пункт назначения находится в одном районе. В районе 1 производится большинство экзогенного потока, который проходит из района 1 в район 2, в то же время район 2 является зоной притяжения в процессе дорожного движения.

Для расширения применения вышеуказанного метода анализа состояния транспортного потока дополнительное исследование приспособлялось к возможному конкретному условию, проводящему при допуске о том, что позволит ограниченному транспортному потоку стремиться к производительному району и завершить свою поездку. Таким образом, исходная экзогенная потока  $q_1$ , производящая в районе 1, разделяется на два направления транспортного потока  $q_{11}$  (место назначения – район 1) и  $q_{12}$  (место назначения – район 2). Схема улично-дорожной сети центральной части при данной ситуации показана на Рис 7.

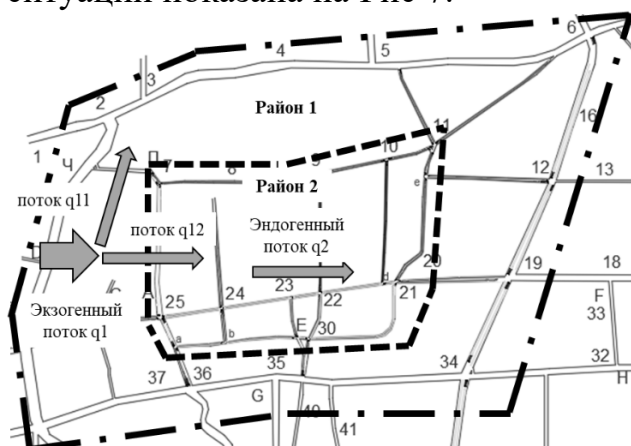


Рисунок 5 – Фрагмент улично-дорожной сети центральной части г. Цзинань при возможном конкретном условии с разделенными потоками  $q_{11}$  и  $q_{12}$

Построение двухзональной системы на основе макроскопической фундаментальной диаграммы является базой исследования для оценки состояния транспортного потока между двумя районами. Для обеспечения максимальной эффективности центрального района целевая функция оптимизация дорожного движения проектируется и описывается следующей формулой:

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

где  $J$  – целевая функция теории оптимизации дорожного движения;  $n_2$  – количество автомобилей, находящихся в районе 2, авт;  $G_2$  – входящий / выходящий транспортный потока района 2, авт/ч;  $t_f$  – время движения в конце мониторинга.

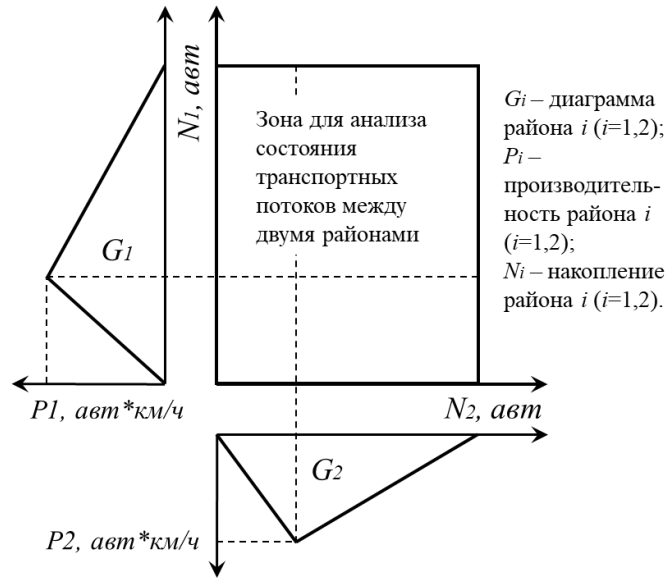


Рисунок 6 – Схема для анализа состояния транспортных потоков в двухзональной системе

Для времени мониторинга от времени начала поездки  $0$  до времени окончания поездки  $t_f$  дифференциальные уравнения динамики системы о изменении накопления макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока описаны следующими уравнениями:

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

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

где  $q_i$  – эндогенный / экзогенный транспортный потока района  $i$  ( $i=1,2$ ), авт/ч;  $u$  – пограничный контроль для входящего потока между двумя районам.

Аналогично, построение двухзональной системы при возможным конкретным условия с разделенными потоками  $q_{11}$  и  $q_{12}$  на основе макроскопической фундаментальной диаграммы для оценки состояния транспортного потока между двумя районам описано следующим видом (рис.7).

Отношения между накоплением автомобилей в районах могут быть рассчитаны сложными дифференциальными уравнениями с тремя неизвестными:

$$\frac{dn_{11}(t)}{dt} = q_{11} - \frac{n_{11}(t)}{n_{11}(t) + n_{12}(t)} \cdot G_1(n_1(t)), \quad (5)$$

$$\frac{dn_{12}(t)}{dt} = q_{12} - \frac{n_{12}(t)}{n_{11}(t) + n_{12}(t)} \cdot G_1(n_1(t)) \cdot u(t), \quad (6)$$

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = q_2 + \frac{n_{12}(t)}{n_{11}(t) + n_{12}(t)} \cdot G_1(n_1(t)) \cdot u(t) - G_2(n_2(t)). \quad (7)$$

где  $q_{11}$  – транспортный поток, который завершить поездку в район 1;  $q_{12}$  – транспортный поток, который завершить поездку в район 2;  $n_{11}$  – накопление производится потоком  $q_{11}$ ;  $n_{12}$  – накопление производится потоком  $q_{12}$ .

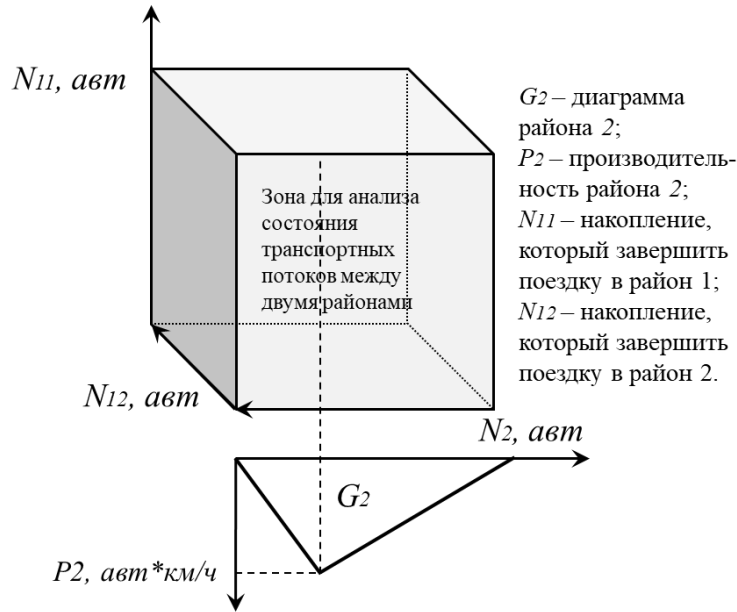


Рисунок 7 – Схема для анализа состояния транспортных потоков в двухзональной системе при возможных конкретным условия с разделенными потоками  $q_{11}$  и  $q_{12}$

Отношения между накоплениями районов должны получены сложными дифференциальными уравнениями с тремя неизвестными:

$$\frac{dn_{11}(t)}{dt} = q_{11} - \frac{n_{11}(t)}{n_{11}(t) + n_{12}(t)} \cdot G_1(n_1(t)), \quad (4)$$

$$\frac{dn_{12}(t)}{dt} = q_{12} - \frac{n_{12}(t)}{n_{11}(t) + n_{12}(t)} \cdot G_1(n_1(t)) \cdot u(t), \quad (5)$$

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = q_2 + \frac{n_{12}(t)}{n_{11}(t) + n_{12}(t)} \cdot G_1(n_1(t)) \cdot u(t) - G_2(n_2(t)). \quad (6)$$

где  $q_{11}$  – транспортный поток, который завершить поездку в район 1;  $q_{12}$  – транспортный поток, который завершить поездку в район 2;  $n_{11}$  – накопление производится потоком  $q_{11}$ ;  $n_{12}$  – накопление производится потоком  $q_{12}$ .

Для удобства исследования управления дорожным движением предел управляемой пороговой величины граничного контроля определён между цифрой 0 и 1, то есть максимальное значение граничного контроля не

превышается цифру 1, минимальное значение граничного контроля не ниже цифру 0.

$$0 < u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max} < 1. \quad (7)$$

Для конкретного анализа состояния транспортного потока в полученной двухзональной системе улично-дорожной сети центральной части г. Цзинань моделирование осуществлялось с использованием математически-моделирующего комплекса MATLAB 2019a на основе этих выводных дифференциальных аналитических уравнений. Точки начального состояния накопления автомобилей являются входными координатами соответствующих аналитических дифференциальных уравнений по данным мониторинга параметров дорожного движения. В результате моделирования, прежде всего, получены зависимости между накоплениями автомобилей обоих районов при разных параметрах для управления дорожным движением, приведены на рисунке 8.

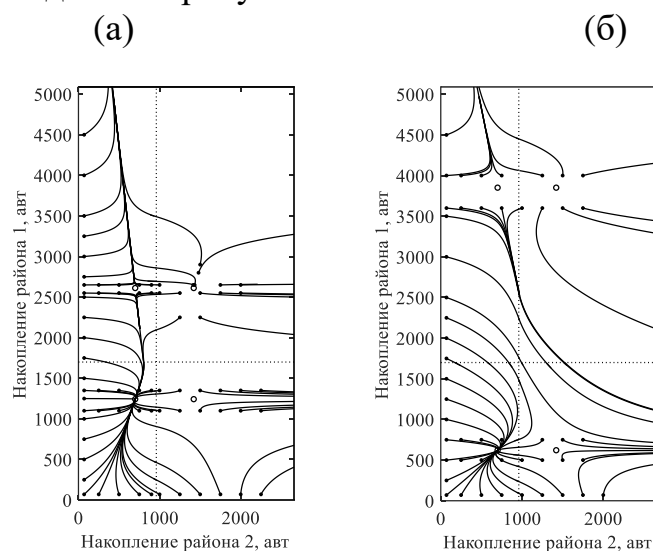


Рисунок 8– Кривые зависимости между накоплениями обоих районов при разных параметрах для управления дорожным движением в определённом времени мониторинга (с 0 до  $t_f$ ): а) пограничный контроль  $u = 0.4$ ; б) пограничный контроль  $u = 0.8$

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.

Получены закономерности изменения зон притяжения при разных значениях пограничного контроля с разделенными транспортными потоками. Основные закономерности изменения зон притяжения приведены следующими рисунками (рис.9):



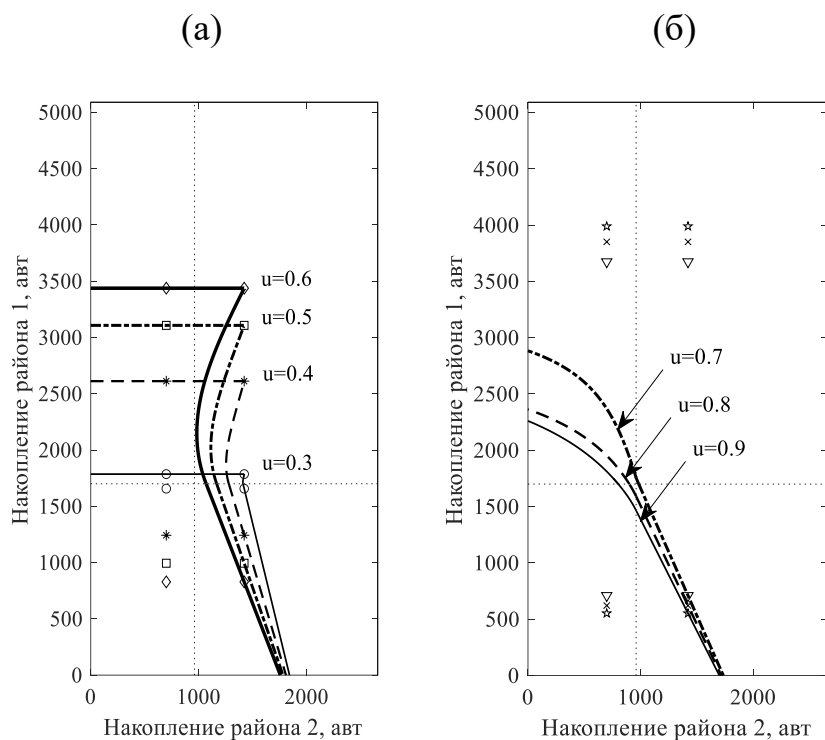


Рисунок 9 – Зоны притяжения при разных параметрах для управления дорожным движением в определённом времени мониторинга (с 0 до  $t_f$ ):

(а) при  $u=0.3-0.6$  (б) при  $u=0.7-0.9$

Для построения стабильных зон сначала осуществлялись моделирование состояния транспортных потоков и их зон притяжения при соответственно максимального и минимального значений пограничного контроля по категории разных типов зон притяжения.

Проектный вариант оптимизации транспортного потока отдельно относится к двум случаям, применяющимся по конкретной ситуации дорожного движения, соответственно контроль  $u = 0.35-0.6$  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  $u = 0.65-0.8$ , поскольку разного приемного объема рассматриваемых зон. Поэтому для каждой многозональной системы дорожного сети необходимо сформироваться собственный характеристический вариант оптимизации транспортного потока.

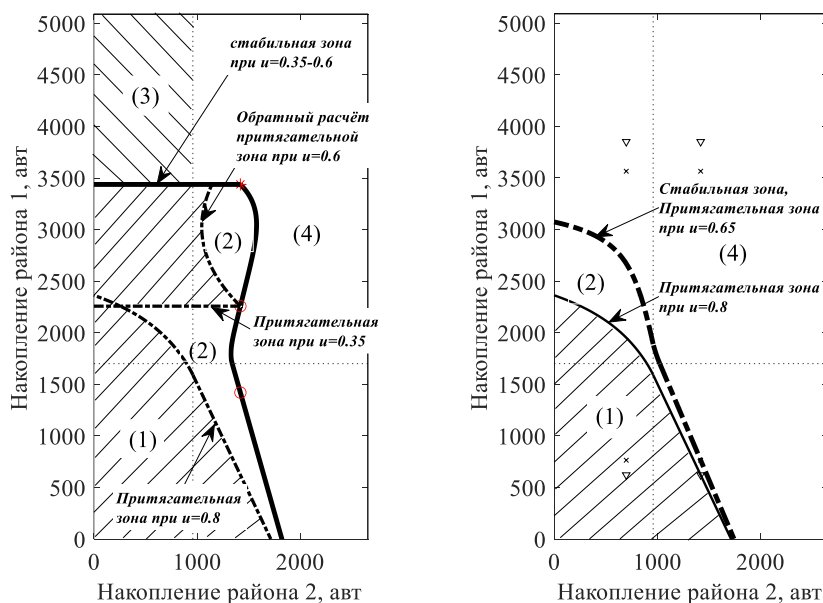


Рисунок 10 – Проектный вариант оптимизации транспортного потока для рассматриваемого района с многообразными стратегиями управления дорожным движением: (а) при  $u = 0,35-0,6$ ; (б) при  $u = 0.65-0.8$

Построена двухзональная система для анализа состояния транспортных потоков, получены закономерности изменения накопления транспортных средств при возможном пограничном контроле  $u=0,3-0,9$  в рассматриваемых зонах центральной части улично-дорожной сети г. Цзинань (КНР).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Полученные в диссертационной работе результаты являются теоретической и практической основой решения задач, заключающихся в разработке методов управления дорожным движением на сетевом уровне. Доказательство применения макроскопической основной диаграммы транспортного потока для двухзональной и в дальнейшем для многозональной системы управления дорожным движением открывает новые возможности с учетом развития технических средств и методов мониторинга параметров транспортного потока в интеллектуальных транспортных системах.

2. Для получения достоверных значений параметров макроскопической основной диаграммы транспортного потока сетевого уровня – эффективности, наполнения, производительности разработана и применена методика получения и обработки данных для двухзональной системы управления дорожным движением с контролем по периметру зон, на основе которой производится классификация состояния транспортного потока и оценка условий движения. Рекомендованы апробированные

автором современные цифровые технологии интеллектуального видеонаблюдения для получения транспортных данных.

3. Проведен вариантный анализ представления макроскопической фундаментальной диаграммы, содержащий различные сочетания зависимостей между ее параметрами: эффективностью и средней плотностью, производительностью и накоплением, эффективностью и накоплением при изменении параметров светофорного регулирования и улично-дорожной сети.

4. Разработан новый способ классификации состояния транспортного потока, отличающийся от существующих интегрированной оценкой параметров как в нескольких зонах, так и на границах зон с выделением стабильного и нестабильного состояния и значений параметров макроскопической основной диаграммы, характеризующих устойчивую совокупность параметров.

5. Разработана математическая модель оптимизации распределения транспортных потоков с целевой функцией производительности сети с программной реализацией следующих стратегий управления:

- стратегия управления по критерию оптимизации числа завершенных поездок при контроле потоков по периметру зон управления и адаптивном светофорном регулировании;

- стратегия управления по критерию оптимизации числа завершенных поездок при контроле потоков по периметру зон управления и многопрограммном управлении;

- стратегия управления по критерию оптимизации числа незавершенных поездок при контроле потоков по периметру зон управления и адаптивном светофорном регулировании;

- стратегия управления по критерию оптимизации числа незавершенных поездок при контроле потоков по периметру зон управления и многопрограммном управлении.

6. Для реальных данных г. Цзынань (КНР) разработаны рекомендации по реализации зонального управления дорожным движением с мониторингом эндогенных и экзогенных потоков на границах зон на основе параметра накопления макроскопической основной диаграммы транспортного потока, оптимизацией параметров производительности и эффективности сети и определением условий стабильного функционирования рассматриваемых зон. Применение такого метода обеспечивает повышение производительности на сетевом уровне на 13-17%.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Zyryanov V., Jiang H. Macroscopic fundamental diagram on urban network. Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers, April 2022, Pages 437-440. <https://doi.org/10.1145/3544109.3544187> (Scopus, EI)
2. Цзянг, Х. Моделирование передвижения транспортных средств на основе макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока / Х. Цзянг // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №2. С. 22-28.
3. Цзянг, Х. Оптимизация дорожного движения на основе макроскопической фундаментальной диаграммы в городской двухзональной системе / Х. Цзянг // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 2(84).
4. Цзянг, Х. Исследование свойства передвижения транспортных средств при динамическом управлении транспортными потоками в двухзональной системе / Х. Цзянг // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 2(77). С. 36-45.