

*На правах рукописи*



Юрченко Дмитрий Алексеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ТРАНСПОРТНОГО  
ПЛАНИРОВАНИЯ ЗА СЧЕТ ОБСЛЕДОВАНИЯ ПРИДОМОВЫХ  
ТЕРРИТОРИЙ**

Специальность 05.22.08 – Управление процессами перевозок

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

Орел – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет».

**Научный руководитель: Агуреев Игорь Евгеньевич,**  
доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:**

**Наумова Наталья Александровна**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар

**Мороз Дмитрий Геннадьевич**  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автомобильные перевозки», ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г. Москва

**Ведущая организация:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск

Защита состоится **«23» марта 2021 г. в 14:00** часов на заседании объединенного диссертационного совета Д **999.111.03** по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», ФГБОУ ВО «ТулГУ», ФГБОУ ВО «ЛГТУ» 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: «\_\_» \_\_\_\_\_ **2021**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 ([www.vak.minobrnauki.gov.ru](http://www.vak.minobrnauki.gov.ru)).

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

*302026, г. Орёл, ул. Комсомольская д. 95.*

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

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 999.111.03



В.В. Васильева

## 1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Транспортные проблемы современных городов России имеют сложный спектр причин и разнообразные проявления, что приводит к необходимости теоретического осмысления и широкомасштабных практических исследований. Эти проблемы тесно примыкают к сферам градостроительства, землепользования, распределения городских функций, экологии и др. В настоящее время для решения транспортных проблем применяют самые разнообразные методы и средства.

Спрос на поездки автотранспортными средствами представляет собой достаточно разнообразное и сложное явление, что обусловлено множеством факторов, а именно: распределением мест труда и проживания, геометрией городских дорог и улиц (ориентированный граф), схемами организации дорожного движения, количеством и качеством транспортных средств, демографическими условиями (плотность населения в различных районах) и пр. Поиск закономерностей, которые необходимо учитывать при решении задачи о загрузке улично-дорожной сети (УДС), является важной составляющей при изучении функционирования транспортных макросистем. При этом погрешность решения задач о загрузке УДС высока (часто не ниже 20%). Для повышения точности моделирования требуется переход к динамической постановке, а также более детальное изучение характера функционирования источников и стоков транспорта как функций времени (в том числе стоянок и парковок). Повышение точности прогнозирования требует более полной детализации графовой модели УДС за счет увеличения числа узлов и дуг. В этом случае на графе появляются жилые кварталы города с придомовыми территориями, и именно они являются основными источниками транспортных средств в утренние часы, а не промышленные предприятия, торгово-развлекательные центры, банки, офисы, учебные заведения и пр.

Если работа отдельных расположенных стоянок и парковок (центров массового тяготения) изучена подробно, то стоянки автотранспорта на придомовых территориях в жилых городских районах как источники транспорта исследованы недостаточно. Именно они определяют объемы основных потоков транспортных средств в утренние «часы пик».

Все это привело к необходимости проведения настоящего исследования и подтверждает актуальность выбранной темы для анализа взаимодействия транспортной системы и социального комплекса города, от которого напрямую зависит качество жизни населения.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследования по применению методов математического моделирования к решению транспортных задач проводили отечественные ученые: Алиев А.С., Гасников А.В., Горев А.Э., Дубелир Г.Д., Зырянов В.В., Кленов С.Л., Корчагин В.А., Ляпин С.А., Нурминский Е.А., Попков Ю. С., Швецов В.И., а также иностранные ученые – А. Дж. Вильсон, И. Пригожин, Дж. Уизем, Ф. Эндрюс, Р. Херман и др.

Вместе с тем, современные условия требуют повышения уровня адекватности результатов, получаемых математическим моделированием транспортных потоков (ТП), реальному состоянию УДС на любом заданном интервале времени.

Рабочей гипотезой стало предположение о том, что стоянки и парковки индивидуальных транспортных средств как источники генерации автомобилей определяют основную динамику загрузки УДС в утренние часы суток и описываются функциями времени, требующими определения и классификации.

**Цели и задачи.** Целью исследования является разработка, обоснование, апробация методики транспортного планирования, предназначенной для решения задач прогнозирования ТП, модернизации УДС, имеющий большое социальное значение в повышении качества жизни населения и основанной на экспериментальной динамике функционирования стоянок и парковок индивидуальных транспортных средств, каковыми являются придомовые территории.

Для достижения названной цели в рамках настоящего исследования были поставлены и решены следующие задачи:

1. Выполнить анализ теоретических и экспериментальных работ, связанных с исследованиями источников/стоков транспортных средств; обосновать актуальность диссертационной работы.
2. Разработать программу экспериментальных исследований динамики функционирования источников/стоков транспорта, основанную на применении ультразвуковых детекторов транспорта и визуальных наблюдений; проведение экспериментальных работ в соответствии с программой.
3. Обработать экспериментальные данные наблюдений и получить зависимости интенсивностей потоков в источниках/стоках транспорта.
4. Разработать модель УДС, учитывающую динамику источников/стоков транспорта, а также провести калибровку и валидацию модели.
5. Решить задачи определения интенсивности транспортных потоков на УДС с использованием построенной модели с целью повышения точности получаемых решений.
6. Показать возможности применения усовершенствованной методики при решении задач транспортного планирования.
7. Обосновать и апробировать усовершенствованную методику транспортного моделирования.

Объектом исследования является автотранспортная система (АТС) города, содержащая УДС, а также совокупность источников/стоков индивидуального транспорта.

**Научная новизна** состоит в научно обоснованной совокупности теоретико-методических положений, научных и практических методов, математических моделей, алгоритмов и методики транспортного планирования городских УДС:

- разработана и обоснована усовершенствованная имитационная модель загрузки городской транспортной сети, которая отличается от существующих

тем, что модель УДС включает детализированное представление стоков/источников транспорта (стоянок автомобилей и придомовых территорий) на примере г. Тулы;

- предложен экспериментальный метод изучения функционирования стоков/источников транспортной сети на придомовой территории;
- предложены и обоснованы методика и алгоритм решения задачи загрузки УДС в квазидинамической постановке, учитывающие временные свойства разработанной модели УДС;
- установлены закономерности изменения загрузки УДС в зависимости от динамики функционирования стоков/источников.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Полученные в работе результаты имеют теоретическое значение, которое заключается в уточнении методики транспортного планирования, основанном на детализации динамики источников/стоков транспортных средств и квазидинамическом характере решаемых задач.

Результаты исследований имеют прикладной характер и могут быть использованы при совершенствовании эффективности работы АТС, улично-дорожных сетей крупных городов, схем организации дорожного движения, а также при разработке систем управления транспортом.

Предмет исследования: закономерности функционирования источников/стоков индивидуального транспорта в составе задачи о загрузке УДС.

**Методология и методы исследования.** Теоретической основой исследования являются труды отечественных и зарубежных ученых и специалистов в области прогнозного и имитационного моделирования АТС, методов решения задачи загрузки УДС, теории макросистем, математического анализа, а также методов экспериментальных исследований транспортных систем и анализа данных (обработки результатов эксперимента методами математической статистики и теории вероятностей).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Усовершенствованная имитационная модель загрузки УДС, включающая детализированное представление стоков/источников транспорта, каковыми являются стоянки автомобилей на придомовых территориях жилых кварталов г. Тулы.

2. Метод экспериментального изучения динамики функционирования стоков/источников исследуемой транспортной сети, основанный на применении ультразвуковых детекторов транспорта и визуальных наблюдениях, обеспечивающий получение по результатам обработки экспериментальных данных зависимостей параметров ТП для их моделирования как характеристик стоков/источников автотранспорта.

3. Методика решения задачи загрузки УДС в квазидинамической постановке, включающая в себя: разработку модели УДС с уточненной динамикой стоков/источников транспорта, а также верификацию, калибровку и валидацию модели.

4. Результаты анализа влияния свойств и динамики стоков/источников автотранспорта, расположенных на придомовых территориях жилых кварталов, на закономерности изменения загрузки УДС, определение повышения точности получаемых решений.

#### **Соответствие диссертационной работы паспорту специальности.**

Выполненные исследования отвечают формуле паспорта научной специальности 05.22.08 «Управление процессами перевозок» по пункту 1 «Планирование, организация и управление транспортными потоками» и частично по пункту 3 «Развитие транспортной сети, ее структур и линейных предприятий».

**Степень достоверности и апробацию результатов.** Достоверность результатов обеспечивается выбранными методиками исследования, включающими в себя современные научные методы: корреляционно-регрессионный анализ, имитационное моделирование, а также апробацией при обсуждении результатов на научно-практических конференциях. Это позволило обеспечить доказательность и обоснованность разработанных подходов и полученных результатов.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на Международных, Всероссийских конференциях и семинарах: «Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта» (Тула, 2019 г.); «Наука и образование: сохраняя прошлое, создаём будущее» - сборник статей XIX международной научно-практической конференции» (Пенза, 2019 г.); «Организация и безопасность дорожного движения» (Тюмень, 2020); «Наземные транспортно-технологические комплексы и средства» (Тюмень 2020), «Автомобили, транспортные системы и процессы: настоящее, прошлое и будущее» ( Курс, 2020 г.) и др.

Результаты исследования реализованы при поддержке гранта РФФИ 19-48 – 710015/19 для создания транспортной системы моделирования транспортных потоков в г. Туле с помощью системы программно-аналитического комплекса «TransNet» ver.1.1, а также используются в учебном процессе в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 в ведущих изданиях из перечня рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций.

**Структура и объем диссертационной работы.** Основная часть диссертации изложена на 124 страницах, включает в себя введение, 3 главы, заключение, список использованной литературы из 113 наименований и 1 приложение.

## 2 ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цель и задачи, объект, предмет и методы исследования, сформулирована практическая значимость работы, приведены положения, обладающие научной новизной и выносимые на защиту, обоснована степень достоверности результатов, приведены сведения об апробации работы.

**В первой главе** «Анализ научно-исследовательских работ по вопросам математического моделирования поведения автомобильных транспортных потоков на городской УДС» рассмотрены вопросы математического моделирования поведения автотранспортных систем, в том числе решения задачи загрузки транспортной сети.

Анализ источников доступной литературы показал следующее:

- описание и управление реальными транспортными потоками довольно проблематично в связи с рядом факторов неопределенности, например, не стационарность транспортных потоков, их зависимость от времени: сезона, дня недели и времени суток и т. д;

- поиск закономерностей транспортных потоков, присущих ему на одном и том же участке УДС в одни и те же отрезки времени характерных часов суток, является важной составляющей при изучении функционирования транспортных макросистем, частным случаем которой можно считать движение автомобильного транспорта на УДС. При этом источники и стоки транспорта представляет собой, с позиции теории макросистем, отдельные множества состояний элементов АТС;

- моделирование динамики транспортного потока с использованием компьютерных пакетов значительно упрощает процесс его изучения и контроля. Инструменты позволяют наглядно представить движение каждого отдельного автомобиля в потоке, оценить эффективность принятых решений, направленных на улучшение организации движения;

- предлагаемые в настоящее время на рынке программные продукты не содержат функций, в полном виде реализующих детальное представление функционирования центров генерации АТС на уровне мезоскопического моделирования.

В результате анализа сформулированы цель и задачи работы.

**Во второй главе** «Экспериментальные исследования придомовых территорий городских жилых районов как источников образования автомобильных потоков» приводится методическое обеспечение для экспериментального исследования автомобильных потоков в городе и его результаты.

Работы по проведению натурных обследований придомовых территорий, выполняемые в рамках настоящего исследования, представлены на рис.1 в виде последовательности этапов.



Рисунок 1 – Последовательность проведения экспериментального исследования

Из приведенной последовательности выделены четыре основных этапа:

- 1 этап - разработка программы экспериментального исследования;
- 2 этап - подготовка исследования;
- 3 этап - проведение исследования;
- 4 этап - обработка полученных результатов.

На этапе составления программы исследования сформулированы цели и задачи исследования, а также общие требования к условиям, обеспечению и проведению эксперимента (место проведения, необходимое оборудование и аппаратура, климатические условия, время проведения, определяемые показатели, порядок проведения, методика фиксации результатов, отчетность, методика обработки результатов, требования безопасности и др.).

В результате анализа жилых районов в административных округах г. Тулы были определены 20 объектов для проведения обследования придомовых территорий. Проводимые обследования потребовали для каждого объекта изучения: структуры и особенностей использования территории; транспортных связей с другими объектами. Обследования начинались с подготовки исходных карт; схем, позволяющих выделить изучаемые объекты; определения точек их «сопряжения» с расположенной рядом территорией. Размеры каждого объекта определялись с помощью геологических информационных источников (2GIS, GoogleEarth, Goglemaps).

Обследования проводились пассивным методом, на стационарных постах, расположенных на придомовых территориях, в марте-апреле по вторникам-четвергам поочередно на каждом из объектов. На первом этапе выявлялось визуальным подсчетом наполнение стоянок с 21:00 ч. до 22:00 ч., когда практически все жители вернулись домой. На втором этапе определялась транспортная загрузка прилегающих улиц при выезде автомобилей из дворовой зоны с 6:00 ч. до 11:00 ч. Для подсчета количества припаркованных/выезжающих автомобилей на каждой стоянке в каждом дворе использовались следующие измерительные технологии: автоматическая видеофиксация и ультразвуковое

зондирование (этот способ применялся на придомовых территориях с большим числом автомобилей).

Видеофиксация производилась с помощью цифровой видеокамеры модели Sho-MeA7-GPS/Glonass. Запись с видеокамеры велась на карту флеш-памяти с индикацией времени. Данные обрабатывались оператором просмотром отснятого материала в замедленном режиме.

Ультразвуковое зондирование осуществлялось комплексом ультразвуковых измерительных приборов (УЗИП), разработанным на кафедре «Автомобили и автомобильное хозяйство» ТулГУ совместно с сотрудниками «КБ Приборостроения» г. Тула. Для проведения наблюдений использовался один детектор из комплекса УЗИП. Детектор устанавливался так, чтобы датчик излучал ультразвуковой поток перпендикулярно направлению движения транспортного средства (рис. 2).

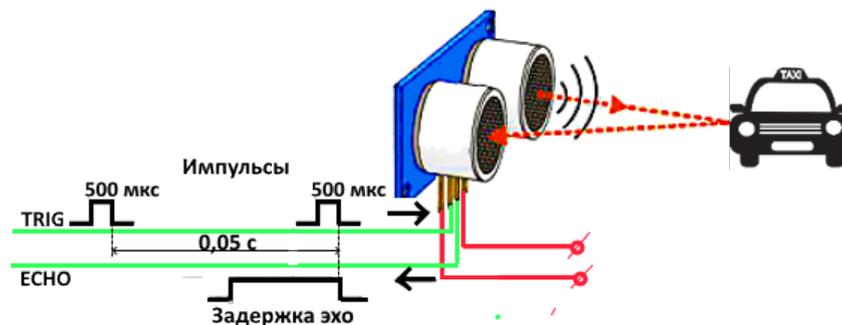


Рисунок 2 – Принцип действия ультразвукового детектора

Пьезоэлектрический элемент одной из головок датчика генерирует узконаправленные акустические волны высокой частоты, а принимает их отраженными от поверхности проезжающих автомобилей другая головка. Таким образом по отраженному сигналу фиксируется расстояние до объекта, если в «поле зрения» прибора объект отсутствуют, то расстояние принимается равным нулю.

Данные, получаемые с универсального счетно-запоминающего устройства (УСЗУ), заносятся в виде таблицы на внешний носитель. Фрагмент записи таблицы, сделанной 04.04.2017 г. на объекте, расположенном по адресу: ул. Гармонная, д.28, приведен на рис. 3а. Таблица состоит из двух столбцов: в левом столбце фиксируется время в сотых долях секунды, а во правом – расстояние от прибора до обнаруженного объекта в см. При отсутствии объекта в таблицу пишется нулевое значение. После обработки информация представляется в виде диаграммы (рис. 3б), где по оси абсцисс откладывается время, а по оси ординат – расстояние.

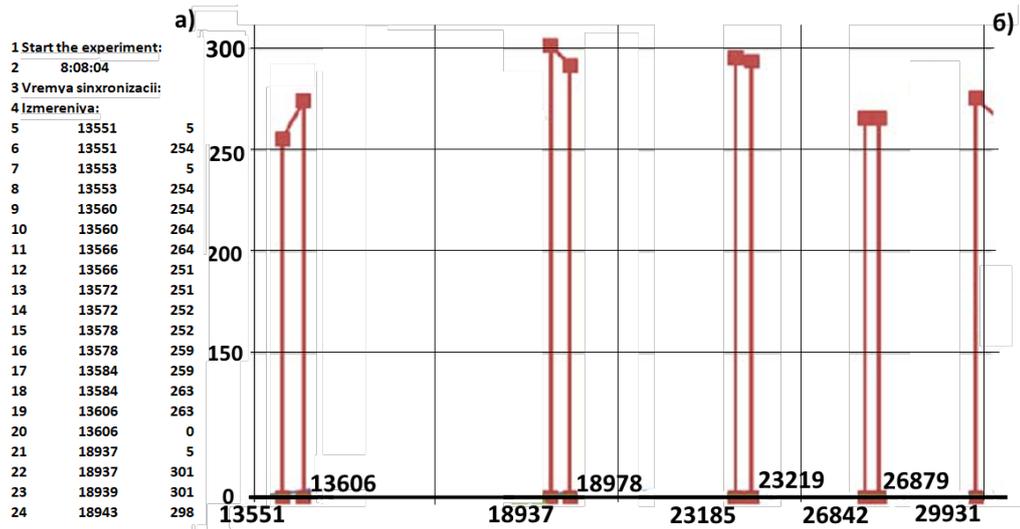


Рисунок 3 – Результаты наблюдений: а) таблица данных УСЗУ; б) диаграмма сигналов датчика

На рис. 3 показано перемещения четырех автомобилей и начало движения пятого. Интервалы между начальными и конечными вершинами каждого импульса определяют время прохождения автомобилем зоны фиксации (зависит от скорости и габаритов). По диаграмме видно, в какой момент времени объект был обнаружен; какое время он находился в области видимости прибора, когда прибор перестал его фиксировать.

В целом, по результатам проведенных обследований выполнено:

- определены центры генерации ТП и их расстояния до обследуемых дворовых территорий;
- определено пиковое время выезда из дворов в утренние часы - с 8:00 ч. до 8:20 ч. (рис.4);

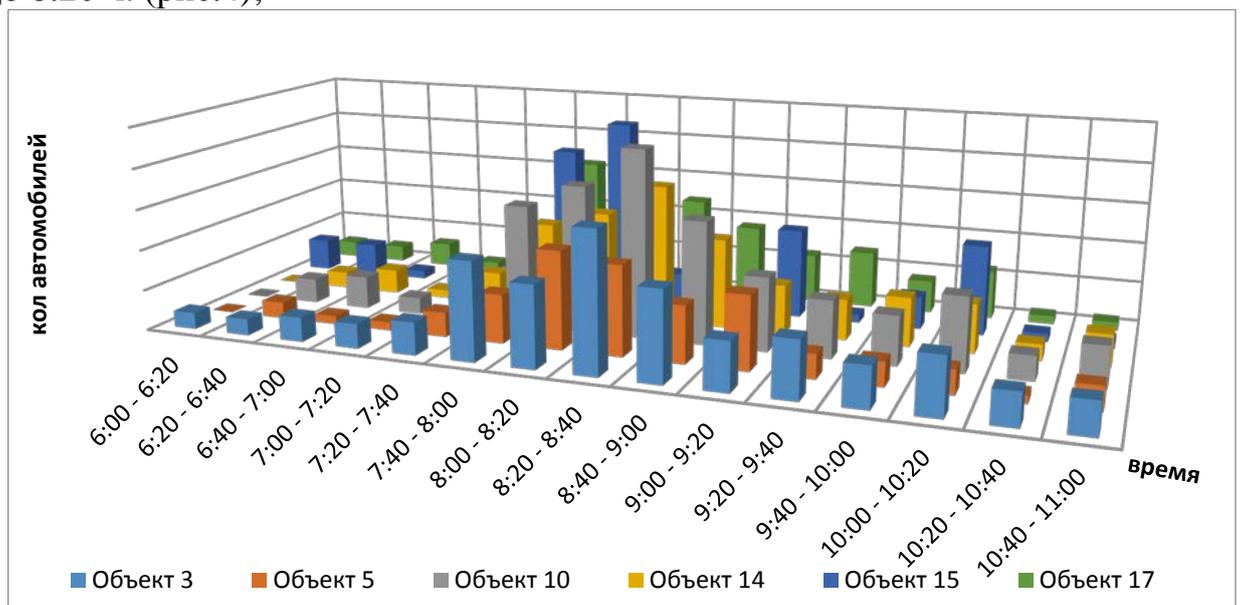


Рисунок 4 – Распределение количества автомобилей для разных центров генерации

- определены группы объектов (центров генерации) в зависимости от времени массового выезда автомобилей из дворов (табл.1)

Таблица 1 - Время массового выезда из дворов

№ п/п	№ объекта	Пик выезда			
		7:40 ч.	8:00 ч.	8:20 ч.	8:40 ч.
1	9				
2	17				
3	1				
4	2				
5	4				
6	5				
7	13				
8	15				
9	19				
10	3				
11	6				
12	7				
13	8				
14	10				
15	11				
16	14				
17	16				
18	18				
19	20				

- построены графики распределения выезда автомобилей с придомовых стоянок (рис.5) для разных групп, на основании которых предложена зависимость распределения интенсивности генерации транспортных средств на УДС г. Тулы в утренние часы суток (рис.6).

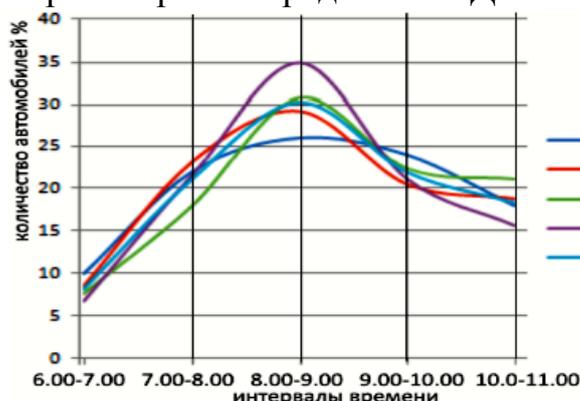


Рисунок 5 – Графики распределения выезда автомобилей с придомовых стоянок в утренние часы

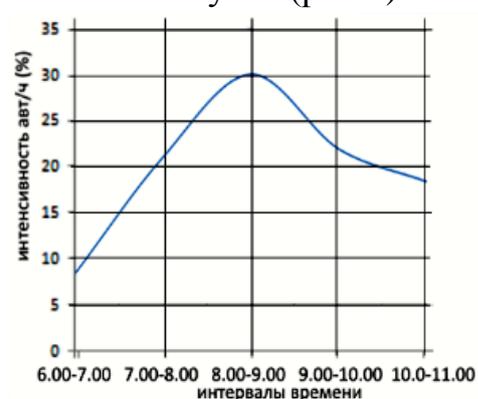


Рисунок 6 – Предлагаемая зависимость генерации транспортных средств в утренние часы

Примененные измерительные технологии обеспечили: высокую точность результатов; низкие материальные затраты; простоту и доступность использования измерительного оборудования; возможность сбора больших массивов данных; простоту обработки полученных результатов. В результате сделан вывод о возможности использования предложенных методов и методик для различных населенных пунктов.

**В третьей главе** «Совершенствование методов определения загрузки улично-дорожной сети и разработка основных положений для улучшения

транспортной ситуации» описываются решение задачи загрузки транспортной сети на примере г. Тулы.

Рассмотрены теоретические аспекты моделирования транспортных макроскопических систем на основе динамического подхода. Решена задача определения общего вида математической модели, которая применяется при анализе загрузки УДС с учетом функционирования источников и стоков транспорта. Такая модель позволяет считать задачу в квазидинамической постановке. Интервалы времени, соответствующие каждому шагу расчета, выбраны так, что систему можно рассматривать как достигшую некоторого промежуточного равновесия. Динамика системы в таком случае – это последовательность равновесных состояний, таким образом, это утверждение является основным допущением работы. Современные подходы к управлению системами транспорта должны четко привязываться к состояниям АТС, поэтому фактор времени имеет решающее значение, даже в задачах прогноза, т. к. необходимо увидеть заранее, как транспортные проблемы возникают и развиваются в течение дня.

Предположим, что АТС, заданная на графе УДС, определяется в виде источников/стоков транспортных средств с соответствующими емкостями. Такое описание обеспечивает увязку характеристик функционирования стоков/источников транспорта и характер изменения ТП при решении задач о загрузке УДС. Представим АТС города как совокупность элементов, обеспечивающих:

- логическую и пространственную связь между источниками и стоками транспорта (в более широком описании – ресурса некоторого вида);
- временные характеристики связей (время начала и продолжительности действия каждой связи);
- соответствующие провозные (пропускные) способности;
- план транспортного процесса;
- критерии эффективности функционирования (или наличие цели).

В соответствии с таким подходом обобщенная схема модели произвольной транспортной системы должна включать в себя выражения, определяющие:

- граф дорожной сети;
- матрицу связей как логических (булевых) функций времени;
- провозные возможности системы (в качестве альтернативного описания здесь могут быть заданы уравнения для пропускных возможностей УДС или уравнения для интенсивностей потоков);
- степень выполнения транспортного задания (уравнения транспортных процессов);
- критерии эффективности или условия равновесия.

Тогда обобщенную схему модели АТС можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma = \Gamma(t); \\ \rho = \rho(t); \tau_0 \leq t \leq \tau_0 + \Delta\tau, \\ \Delta\tau = \sum_{k=1}^n \Delta\tau_k; \\ \Delta\tau_k \in \{\Delta\tau_1; \Delta\tau_2; \dots; \Delta\tau_n\}; \\ q_{ij} = q_{ij}(t); \\ \pi_m = \pi_m(t); \\ k = 1, \dots, n. \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $t$  – время, которое в модели является непрерывным с дискретными (выделенными) моментами, выбранными для расчета или определения состояния системы;  $\tau_0$  – время начала наблюдения системы;  $\Delta\tau$  – продолжительность работы транспортной системы (продолжительность существования, моделирования и т.п.);  $\Delta\tau_k$  – интервалы между точками расчета (рассмотрения) системы;  $k$  – индекс интервала времени;  $q_{ij}$  – интенсивность ТП, пропускная способность элемента сети;  $i, j$  – индексы узлов УДС, между которыми измеряется величина  $q_{ij}$ ;  $\pi_m(t)$  – доля (степень) завершения задания поездки (перевозки);  $m$  – индекс транспортного средства. Уравнение  $\pi_m = \pi_m(t)$  представляют собой модель транспортного процесса, которая задается для каждого транспортного средства входящего в систему на данном интервале решения задачи. Количество транспортных средств и число маршрутов входят в выражение (1) как параметры.

С практической точки зрения вытекает необходимость включения в модель уравнения транспортного процесса – зависимости от времени доли выполненной поездки (или числа выполненных рейсов, ездов, оборотов) для каждого транспортного средства и для всего их множества в целом. Необходимость такого уравнения заключается в потребности рассчитать вероятности нахождения элементов на конкретных дугах маршрутов. Система (1) позволяет подробно исследовать процесс формирования ТП и загрузки городской УДС с учетом влияния на них стоянок и парковок, расположенных на придомовых территориях.

В этой же главе приведена общая методика построения и использования транспортной модели. Базовая модель загрузки УДС г. Тулы, созданная на кафедре «Автомобили и автомобильное хозяйство» ТулГУ с использованием программно-аналитического комплекса автоматизации транспортного проектирования «TransNet», была актуализирована и откалибрована по результатам натурных обследований, полученных при изучении условий формирования ТП от придомовых территорий, расположенных внутри исследуемого района.

Главное отличие предлагаемой методики от базовой состоит в способах формирования исходных данных. Если для базовой методики исходные данные определяются на основе априорной информации, достоверность которой практически невозможно проверить (социально-экономические данные – число жителей, рабочие места, студенты, учебные места, количество автомобилей и т.д.; информации о транспортном поведении пользователей), то в предлагаемой методике исходные данные определяются

по наблюдаемым значениям потоков генерируемых транспортных средств за некоторый интервал времени  $\Delta\tau_i$ .

Объем отправок  $Q_i(t)$  из района  $i$  трудовых корреспонденций в предлагаемой методике определяют по формуле, которая используется во многих работах, посвященных описанию динамического подхода к моделированию АТС:

$$Q_{ij}(t) = Q_{\Delta\tau_i} + Q_{\Delta\tau_{i-1}} - K_{\Delta\tau_i} \quad (2)$$

где  $Q_{\Delta\tau_i}$  – автомобили, выезжающие из источника транспорта в интервал времени  $\Delta\tau_i$ , количество определяется в результате натурного обследования по методике, изложенной в гл.2;

$Q_{\Delta\tau_{i-1}}$  – автомобили, находящиеся в транспортном районе на момент начала временного интервала, оставшиеся на отрезке  $\Delta\tau_{i-1}$ , то есть от предыдущего шага; количество определяется в процессе расчета;

$K_{\Delta\tau_i}$  – автомобили, совершающие прибытия в стоки рассматриваемого транспортного района, т. е. покинувшие УДС в интервале времени  $\Delta\tau_i$ ;

$k$  – номер шага по времени.

Объем прибытий  $D_i(t)$  в район  $j$  трудовых корреспонденций в предлагаемой методике определяется по формуле:

$$D_j(t) = M \cdot a \cdot k_T(a) \cdot k_{\Delta\tau_i} R_j / \sum R_j \quad (3)$$

где  $M$  - число городского населения, тыс. жит.;

$a$  - уровень автомобилизации населения, авт./тыс. жит.;

$k_{\Delta\tau_i}$  – коэффициент, учитывающий распределение суточных объемов прибытий автомобилей по интервалам времени;

$k_T(a)$  - коэффициент пропорциональности;

$R_j$  - число мест приложения труда в районе  $j$ .

Найденные для каждого района объемы отправок и прибытий служат основой формирования, тем или иным методом, матрицы корреспонденций (МК). В настоящей работе используется динамический, зависящий от времени, метод составления МК. В нем внимание акцентируется на времени наблюдения и зависимости корреспонденции от времени. ТП наблюдается за короткий интервал времени, например, за  $\Delta\tau_i = 20 - 60$  мин., тогда как для базовой модели минимальные интервалы времени составляют сутки или 5 - 6 часов (утренние, дневные, вечерние часы). Таким образом, дробление суточных объемов отправок и прибытий на более мелкие интервалы времени позволит получить картину дорожно-транспортной ситуации в городе, адекватную реальной обстановке.

Способы определения объемов отправок и прибытий, а также числа поездок между районами, проиллюстрированы на рис.7.

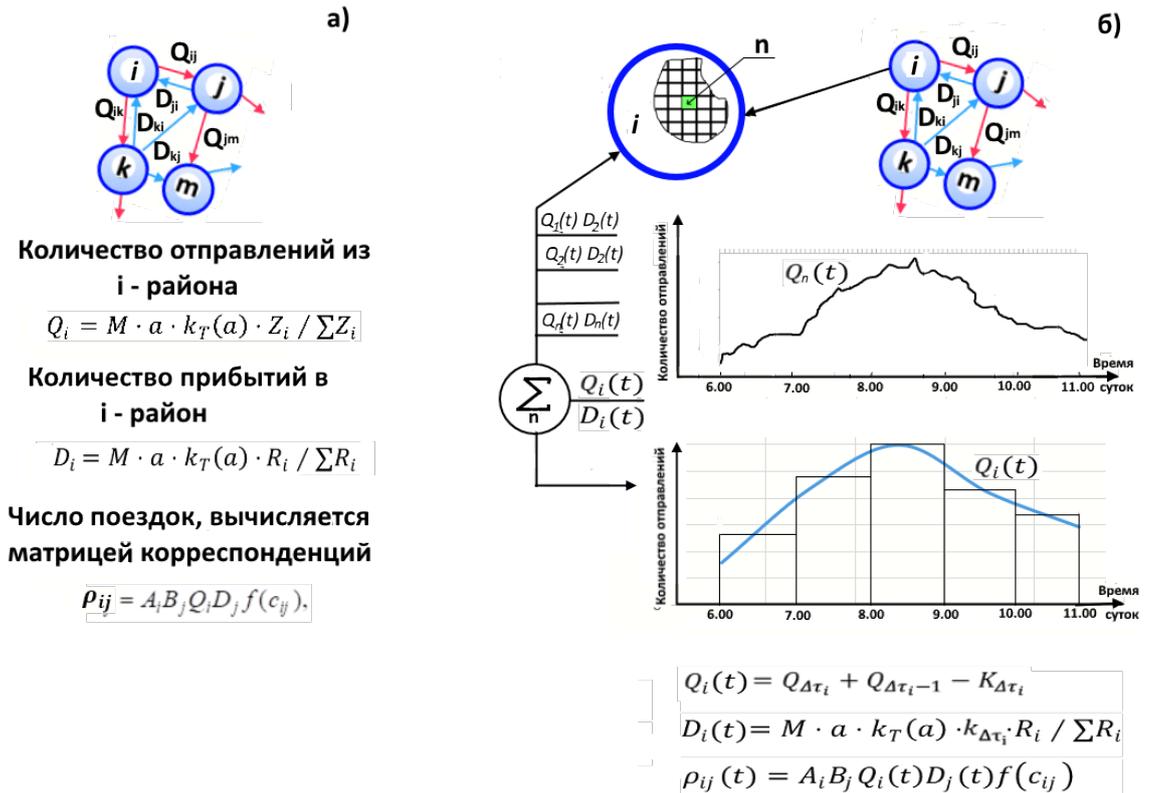


Рисунок 7 – Способы определения объемов отправлений, прибытий и количества поездок: а) базовая методика б) предлагаемая методика

По результатам расчетов по предлагаемой методике, с учетом калибровки модели, на рис.8 показана картограмма загрузки УДС района, являющегося ядром Зареченского административного округа. Модель имеет следующие характеристики: общее число транспортных средств составляет – 6658 авт.; общая совершаемая работа всеми участниками движения – 14667 авт·км; длина сети – 79,92 км.

Валидация модели, путем сравнения результатов натурных обследований с полученными расчетными значениями интенсивности ТП для наиболее важных сечений магистральных улиц и улиц межрайонного значения, приведена в табл.2 и на рис. 9, 10.

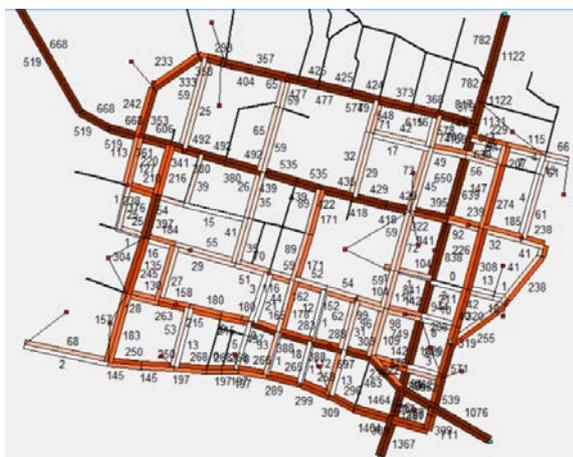


Рисунок 8 – Картограмма загрузки УДС района в период с 8.00 ч. до 9.00 ч.

Таблица 2 – Сравнение расчетных и наблюдаемых потоков с 8.00 ч. до 9.00 ч

№ сечения	Название улицы	Направление движения		Интенсивность, авт./ч.		Расхождение		Критерий
		от улицы	к улице	факт.	расчет	$\Delta$	%	
1	Пузакова	Демидовская	Октябрьская	662	661	1	0,15	0,04
2	Пузакова	Октябрьская	Демидовская	369	377	-8	2,1	0,41
3	М.Горького	Демидовская	Октябрьская	301	337	-36	12,3	2,01
4	М.Горького	Октябрьская	Демидовская	397	404	-7	1,8	0,35
5	Луначарского	Демидовская	Октябрьская	208	269	-61	29,3	3,72
6	Луначарского	Октябрьская	Демидовская	126	150	-24	19,0	2,04
7	Курковая	Литейная	Луначарского	368	334	34	9,7	1,8
8	Курковая	Луначарского	Литейная	244	268	-24	9,8	1,5
9	Луначарского	Курковая	Ствольная	173	150	23	13,3	1,8
10	Луначарского	Ствольная	Курковая	167	163	4	2,4	0,31

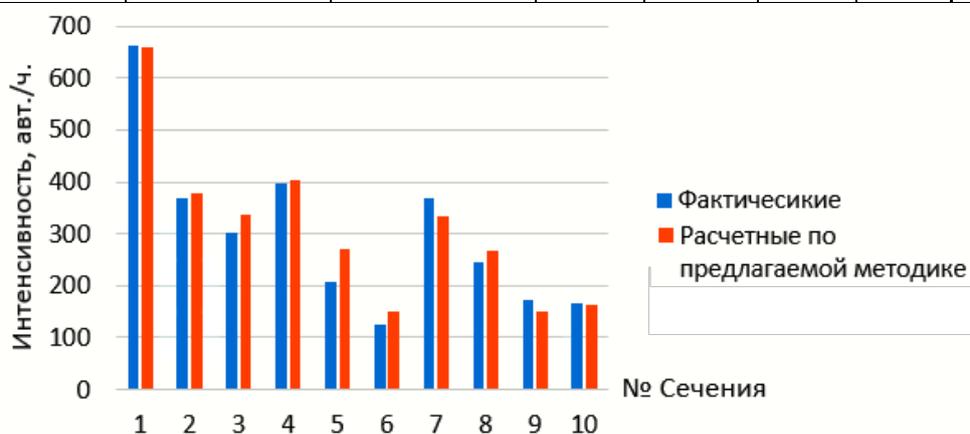


Рисунок 9 – Диаграмма потоков расчетных и наблюдаемых с 8.00 ч. до 9.00 ч

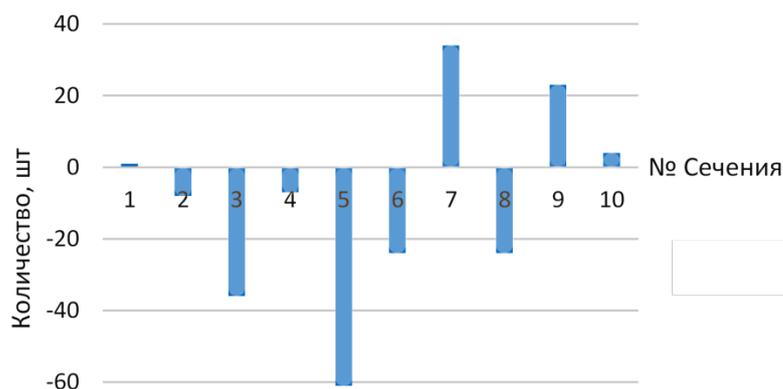


Рисунок 10 – Диаграмма расхождения результатов расчетных от наблюдаемых в период с 8.00 ч. до 9.00 ч

На рис. 9 представлена диаграмма, отображающая рассчитанные и наблюдаемые потоки для 10 выбранных сечений улиц района. Правый столбец характеризует рассчитанные ТП, левый столбец – наблюдаемые потоки.

На диаграмме (см. рис.10) каждый столбец представляют отклонения проведенных расчетов от натуральных замеров. Только в одном случае максимальное абсолютное расхождение вычислений для магистральных улиц равно 90 автомобилям. Минимальное абсолютное расхождение вычислений для магистральных улиц равно 1 автомобилю. Среднее отклонение рассчитанных потоков от натуральных замеров составило 15 автомобилей.

Сравнение показателей работы модели и данных натуральных обследований выполнено с помощью следующих статистических критериев.

1. ГЕН-статистика (критерий Хейверса) вычисляется по формуле

$$GEN = \sqrt{\frac{(Z-U)^2}{(Z+U)/2}},$$

где  $Z$  – расчетные смоделированные значения;

$U$  – фактические измеренные значения.

Значение ГЕН-статистики менее чем 5 для 85 % случаев считается приемлемым в практике моделирования. Из табл. 1 видно, что максимальное значение ГЕН равно 5,65 лишь для одного сечения № 5.

2. Средняя относительная ошибка в % определяется по выражению

$$(\delta_p) = \frac{\sum abs(Z_i - U_i)}{\sum Z_i} \cdot 100\%$$

Рекомендованное значение  $(\delta_p)$  не должно быть в целом по моделируемой сети более 10%. По результатам расчетов –  $(\delta_p) = 3,73\%$ .

Таким образом, можно сделать вывод: модель удовлетворяет требованиям основных статистических критериев.

Для проверки предложенной зависимости распределения интенсивности ТП в утренние часы на УДС г. Тулы в табл.3 и на рис.11 - 13 приведено сравнение фактических результатов интенсивности ТП с расчетными значениями для сечения 1.

Таблица 3 – Результаты наблюдений интенсивности ТП с 6.00 ч. до 11.00 ч.

№ сечения	6.00-7.00		7.00-8.00		8.00-9.00		9.00-10.00		10.00-11.00		Итого авт./ч
	факт. авт./ч	%	факт авт./ч	%	факт авт./ч	%	факт авт./ч	%	факт авт./ч	%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	241	9,9	497	20,4	662	27,1	583	23,9	456	18,7	2439
2	115	8,3	275	19,9	369	26,7	313	22,6	310	22,4	1382
3	96	7,9	276	22,9	301	25,2	289	24	241	20	1203
4	151	9,3	351	21,6	397	24,4	386	23,8	338	20,8	1623
5	87	9,2	197	20,9	208	22,1	237	25	215	22,8	944
6	41	8,0	106	20,7	126	24,7	126	24,7	112	21,9	511
7	174	9,2	348	18,5	450	23,9	479	25,4	435	23,0	1886
8	85	8,1	192	16,2	244	23,8	276	26,4	247	23,6	1044
9	89	8,7	211	20,6	237	24,0	251	24,4	238	23,2	1026
10	71	9,0	173	22,1	167	21,3	193	24,6	179	22,8	783

Примечание: в колонках 3, 5, 7, 9, 11 - интенсивность ТП в % от суммарного количества в строке

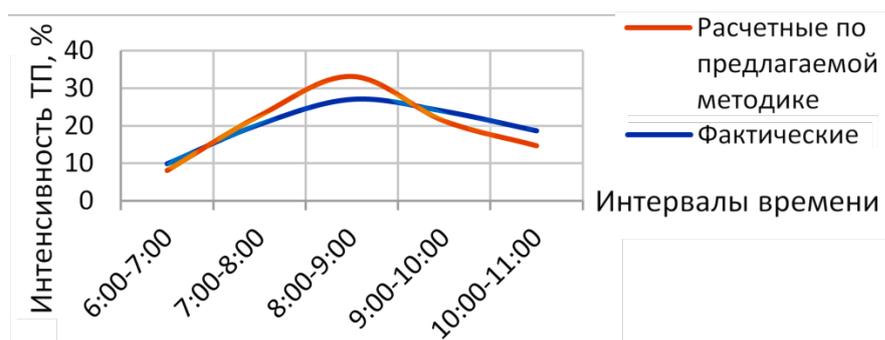


Рисунок 11 – Графики фактических и расчетных по предлагаемой методике значений интенсивности ТП для сечения 1 (ул. Пузакова от ул. Демидовская к ул. Октябрьская)

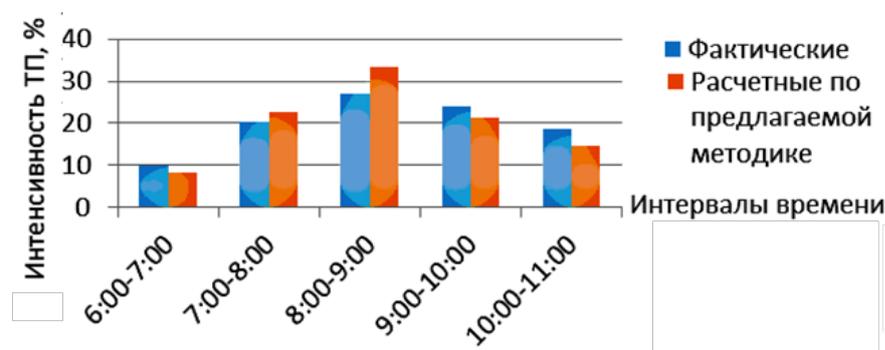


Рисунок 12 – Диаграмма фактических и расчетных по предлагаемой методике значений интенсивности ТП для сечения 1 (ул. Пузакова от ул. Демидовская к ул. Октябрьская)

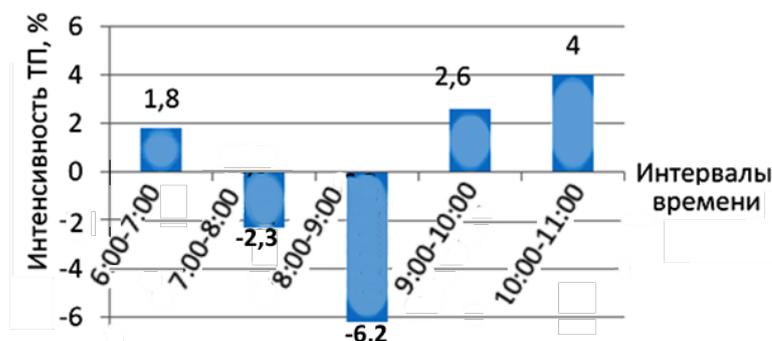


Рисунок 13 – Диаграмма расхождения результатов интенсивности ТП для сечения 1 (ул. Пузакова от ул. Демидовская к ул. Октябрьская)

Сравнение показало, что в сечении 1 отклонение наблюдаемых значений интенсивности ТП от предлагаемых расчетных составляет для интервалов времени с

- 6.00ч. до 7.00ч. – 1,8%;
- 7.00ч. до 8.00ч. – -2,3%;
- 8.00ч. до 9.00ч. – -6,2%;
- 9.00ч. до 10.00ч. – 2,6%
- 10.00ч. до 11.00ч. – 4,0%;

Наибольшее превышение предлагаемого расчетного значения интенсивности ТП над наблюдаемым имеет место для интервала времени с 8.00 ч. до 9.00 ч. – 6,2%.

Из сравнения следует, что предлагаемая зависимость распределения интенсивности ТП в утренние часы на УДС г. Тулы с точностью около 94% совпадает с наблюдаемыми данными. Таким образом, можно сделать заключение, что сформулированная научная гипотеза подтверждается.

Практическое применение разработанной методики показано на примере составления прогноза загрузки УДС Зареченского округа после строительства нового мостового перехода через р. Упа. В результате расчета получены картограммы загрузки УДС автотранспортом (рис. 14 б и 15 б).



Примечание: числа на картограммах обозначают интенсивность ТП на дугах графовой модели

Рисунок 14 – Картограммы загрузки УДС в утренний «час пик», полученные по базовой методике: а) без моста; б) с мостом



Примечание: числа на картограммах обозначают интенсивность ТП на дугах графовой модели

Рисунок 15 – Картограммы загрузки УДС в период с 8.00 ч. до 9.00 ч., полученные по предлагаемой методике: а) без моста; б) с мостом

Сравнение результатов приведено в табл. 4 и на рис. 16; 17.

Таблица 4 – Сравнение интенсивности ТП, рассчитанных по предлагаемой и базовой методике, для УДС без моста и с мостом

№ сечения	Название улицы	Направление движения		Интенсивность, авт./ч			
				без моста		с мостом	
		от улицы	к улице	предл.	баз.	предл.	баз.
1	Наб.Дрейера	Курковая	Пороховая	154	145	242	219
2	Наб.Дрейера	Пороховая	Курковая	242	230	240	229
3	Курковая	Луначарского	Наб.Дрейера	166	157	337	319

4	Курковая	Наб.Дрейера	Луначарского	189	183	291	276
5	Комсомольская	Луначарского	Наб.Дрейера	106	93	119	108
6	Комсомольская	Наб.Дрейера	Луначарского	39	41	123	122
7	Демидовская	Луначарского	Наб.Дрейера	24	25	87	78
8	Демидовская	Наб.Дрейера	Луначарского	15	13	30	25
9	Зареченский	Район 43	Демидовская пл.	1292	1367	835	768
10	Зареченский	Демидовская	Район 43	1628	1464	810	743
11	Курковая	Литейная	Арсенальная	416	397	397	381
12	Курковая	Арсенальная	Литейная	389	376	363	354
13	Галкина	Луначарского	Ряжская	558	571	394	397
14	Галкина	Ряжская	Луначарского	208	205	210	211

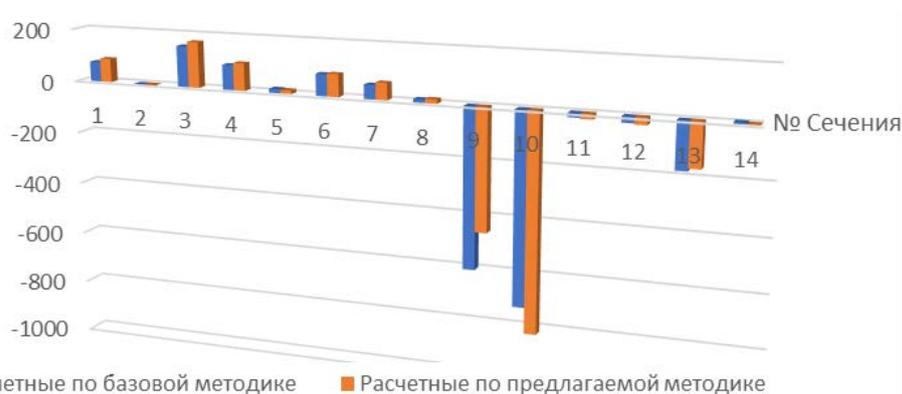


Рисунок 16 – Диаграмма изменений ТП, рассчитанных по базовой и предлагаемой методике, для транспортной сети без моста и с мостом

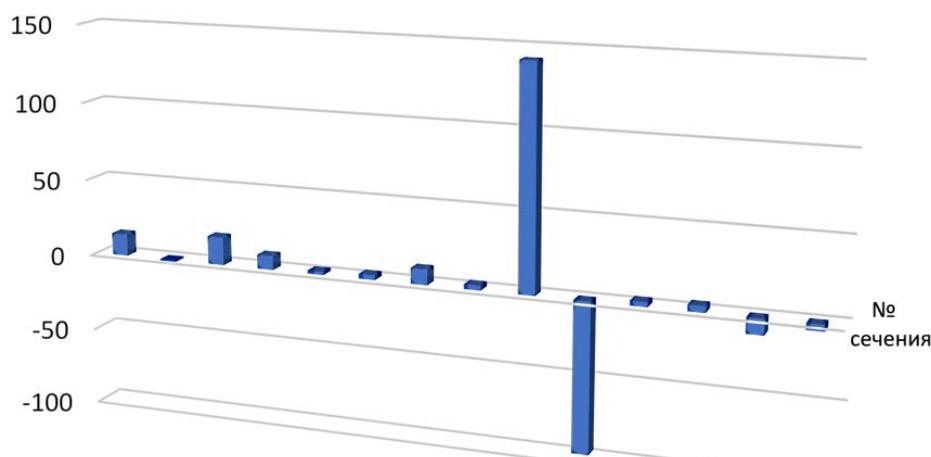


Рисунок 17 – Диаграмма расхождения изменений ТП, рассчитанных по базовой и предлагаемой методике, для сети без моста и с мостом

Из приведенных результатов расчетов следует, что интенсивность прогнозируемых ТП, приходящаяся на Зареченский мост, а это самая проблемная точка УДС г. Тулы, уменьшилась бы от 35% до 50%, т.е. на этом участке удалось решить проблему пробок и заторов. Транспортная нагрузка на ул. Наб. Дрейера выросла бы практически в 2 раза, а на отдельных участках ул. Курковая – от 40% до 80%. На 25% ... 33% разгрузилась ул.

Галкина, проходящая через жилой массив. Движение автотранспорта по главной магистрали Зареченского округа ул. Октябрьская на участке от ул. Наб. Дрейера до ул. Пузакова уменьшилось бы на 22% ... 28%.

Рис.17 показывает, что минимальное расхождение результатов изменения интенсивности ТП, рассчитанных по базовой и предлагаемой методике, составляет 3,3%, максимальное – 23,7%, а среднее – 12,7%.

Динамический характер предлагаемой методики позволяет также составлять прогноз интенсивности ТП для отдельных участков городской УДС на разных интервалах времени (табл. 5 и рис. 18).

Таблица 5 – Прогнозируемая интенсивность ТП для УДС без моста и с мостом в период времени с 6.00 ч. до 11.00 ч. (авт/ч)

№ и адрес сечения	6.00-7.00		7.00-8.00		8.00-9.00		9.00-10.00		10.00-11.00	
	без моста	с мостом	без моста	с мостом	без моста	с мостом	без моста	с мостом	без моста	с мостом
1. Наб. Дрейера от Курковой до Пороховой	41	63	98	170	154	242	117	177	81	135
2. Курковая от Луначарского до Наб. Дрейера	46	87	115	229	166	337	124	161	93	135
3. Курковая от Наб. Дрейера до Луначарского	53	79	131	204	189	291	140	207	99	151
4. Галкина от Луначарского до Ряжская	147	98	372	273	558	394	412	291	298	217

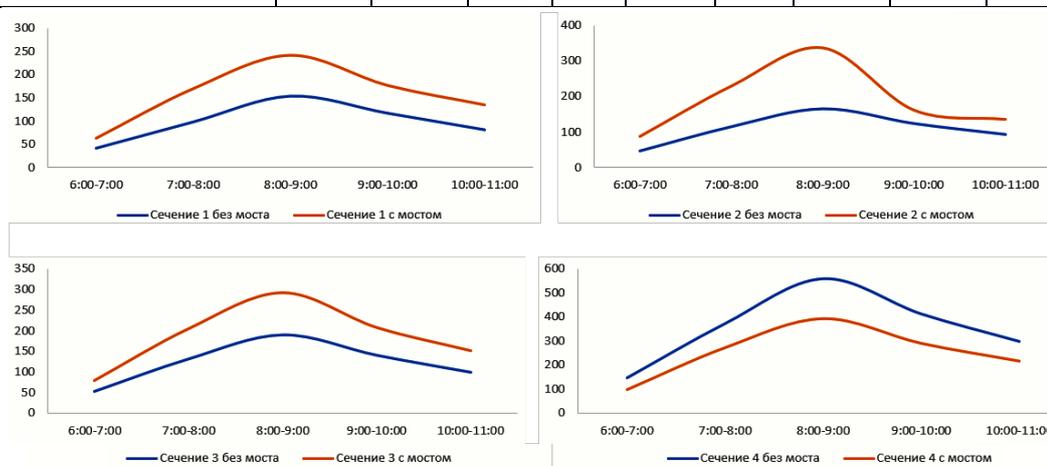


Рисунок 18 – Графики прогнозируемой интенсивности ТП на УДС без моста и с мостом через р. Упа для сечений 1 – 4 (см. табл. 5)

Приведенный пример свидетельствует о том, что результаты, полученные по предлагаемой уточненной методике, в 86% ... 93% случаев на 12% ... 17% выше, чем результаты, полученные по базовой методике.

Таким образом, модернизация транспортной сети г. Тулы за счет строительства дополнительного моста через р. Упа позволила бы решить транспортные, социально-экономические, экологические и др. проблемы. Предложенное мероприятие по повышению эффективности работы городской транспортной сети подтвердило необходимость

совершенствования методов моделирования, что достигается применением предлагаемой методики.

### 3 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В проведенном исследовании решены все поставленные выше задачи и достигнута сформулированная цель, что подтверждается следующими результатами и выводами:

1. Выполненный анализ теоретических и экспериментальных работ по моделированию источников и стоков ТП на городской УДС показал, что стоянки, парковки и др. представляет собой, с позиции теории макросистем, отдельные аспекты состояний элементов. Отсюда следует необходимость и актуальность более глубокого изучения характера функционирования стоянок и парковок, возникающих на придомовых территориях городских жилых кварталов.

2. Разработана программа экспериментальных исследований динамики функционирования источников/стоков транспорта, основанная на применении ультразвуковых детекторов транспорта и визуальных наблюдений.

3. Обработка экспериментальных данных наблюдений позволила получить следующие результаты для моделирования потоков в источниках/стоках транспорта:

- до 57% от общего числа легковых автомобилей на УДС г. Тулы в утренний «час пик» выезжают с «ночных» парковок, расположенных на дворах придомовых территорий;

- пиковое время выезда из дворов в утреннее время наблюдается с 7:00 до 7:20 ч. и с 8:00 до 8:20 ч.;

- интенсивность ТП по интервалам времени в утренние часы суток, составляет: с 6.00ч. до 7.00ч. – 8,3%; с 7.00ч. до 8.00ч. – 21,1%; с 8.00ч. до 9.00ч. – 30,2%; с 9.00ч. до 10.00ч. – 22,0%; с 10.00ч. до 11.00ч. – 18,4% от общего числа автомобилей за время наблюдения;

- интенсивность ТП в утренние часы на УДС г. Тулы пропорциональна количеству автомобилей, покинувших придомовые стоянки, и изменяется по экспериментально полученной зависимости.

4. Предложены и разработаны научно-методические подходы для создания усовершенствованной нелинейной динамической математической модели развития АТС города, с применением которой построена, откалибрована и проведена валидация сетевой модели УДС г. Тулы с уточненной динамикой источников/стоков транспорта. Проведен анализ модели, позволяющей выполнять прогнозные расчеты изменения состояния ТС города.

5. На базе усовершенствованной методики функционирования ТС, которая повысила точность получаемых результатов, решены задачи определения интенсивности транспортных потоков на УДС города.

6. Показана возможность применения усовершенствованной методики транспортного моделирования для модернизации УДС города на примере строительства мостового перехода через р. Упа.

7. Предложенная методика транспортного моделирования апробирована при поддержке гранта РФФИ 19-48 – 710015\19 для создания транспортной системы моделирования транспортных потоков в г. Туле с помощью системы программно-аналитического комплекса «TransNet» ver.1.1, а также используется в учебном процессе в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих печатных работах:**

в рецензируемых научных журналах из «Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» ВАК:

1. **Юрченко, Д.А.** Постановка задачи о загрузке улично-дорожной сети города с учетом данных о функционировании придомовых стоянок автомобилей / И.Е. Агуреев, Д.А. Юрченко // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета № 6 (70), Том 16, 2019. С. 670-679.

2. **Юрченко, Д.А.** Обследование придомовых территорий городских жилых районов как источников формирования автомобильных потоков / И.Е. Агуреев, Д.А. Юрченко // Мир транспорта и технологических машин №4(63), 2018. С.82-89.

3. **Юрченко, Д.А.** Определение загрузки улично-дорожной сети г. Тулы с учетом данных о функционировании придомовых стоянок автомобилей/ И.Е. Агуреев, Д.А. Юрченко // Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника №3, 2020. С. 54-61.

в прочих изданиях:

4. **Юрченко, Д.А.** Моделирование загрузки городской улично-дорожной сети с учетом динамики стоков и истоков автомобильного транспорта / Д.А. Юрченко / Наука и образование: сборник статей XIX Международной научно-практической конференции, г. Пенза, 2019. – С. 86-91.

5. **Юрченко, Д.А.** Формирование транспортных потоков в жилых районах г. Тулы как источниках транспорта / И.Е. Агуреев, Д.А. Юрченко / Материалы конференции «Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта». - Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. С. 43-51.

6. **Юрченко, Д.А.** Применение модели транспортной системы г. Тулы для обоснования планировочных решений / Д.А. Юрченко / Материалы конференции «X Международная молодежная научная конференция». - Курск: Юго-Зап. Гос ун-т., Том 4, 2020. С. 253-257.

7. **Юрченко, Д.А.** Обоснование динамического подхода в моделях городских транспортных систем / И.Е. Агуреев, Д.А. Юрченко / Материалы конференции «X Международная молодежная научная конференция». - Курск: Юго-Зап. гос ун-т., Том 3, 2020. С .221-227.

8. **Юрченко, Д.А.** Методическое обеспечение экспериментальных исследований автомобильных потоков в городе / И.Е. Агуреев, Д.А. Юрченко / Материалы конференции «XIII Национальная научно-практическая конференция с международным участием». - Тюмень: ТИУ, 2020. С. 389-394.

9. **Юрченко, Д.А.** Совершенствование методов создания моделей городских транспортных систем / Д.А. Юрченко / Материалы конференции «Автомобили, транспортные системы и процессы: настоящее, прошлое и будущее». - Курск: Юго-Зап. гос ун-т., 2020 С. 351-355.