

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

На правах рукописи



ФАДИНА Ольга Сергеевна

**МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТНЫМИ РЕЖИМАМИ
ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ**

Специальность 2.9.5 Эксплуатация автомобильного транспорта

ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук, доцент
Шепелёв Владимир Дмитриевич

Челябинск 2025

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1 Анализ методов определения основных параметров транспортных потоков	10
1.1.1 Методы исследования дорожного движения	10
1.1.2 Определение интенсивности потока насыщения и пропускной способности регулируемых пересечений	15
1.1.3 Исследование состава транспортного потока	20
1.1.4 Динамические характеристики транспортного потока	22
1.2 Развивающиеся технологии управления дорожным движением	27
1.2.1 Технологии V2X и C-V2X	27
1.2.2 Audi Travolution - интеллектуальная система управления движением	30
1.2.3 UTMS - Универсальные системы управления дорожным движением	32
1.3 Выводы по главе 1	35
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	37
2.1 Общая методика исследования	37
2.2 Анализ подходов к моделированию движения автотранспортных потоков	39
2.2.1 Модели формирования и оценки очереди автотранспортного потока	43
2.2.2 Методы управления автотранспортными потоками для безостановочного движения на регулируемых пересечениях	47
2.3 Исследование фактических транспортных потоков	51
2.3.1 Определение факторов, влияющих на пропускную способность транспортных потоков	51
2.3.2 Закономерности работы реальной системы управления дорожным движением	62
2.4 Расчёт основных факторов, влияющих на интенсивность потока насыщения регулируемых пересечений	68

2.4.1 Алгоритм расчёта коэффициента динамики разъезда очереди внегрупповых автотранспортных средств	75
2.4.2 Алгоритм расчёта коэффициента, учитывающего категорию АТС	77
2.5 Методика расчета времени безостановочного проезда регулируемого пересечения группой автотранспортных средств	79
2.6 Математическая модель безостановочного проезда регулируемого пересечения группой автотранспортных средств	92
2.7. Факторный модельный анализ средней скорости группы автотранспортных средств	93
2.7.1 Однофакторный анализ	94
2.7.2 Многофакторный анализ	99
2.8. Оценка пропускной способности полосы и снижения задержек АТС при движении с рекомендуемой скоростью	104
2.8.1 Количественная оценка пропускной способности полосы.....	105
2.8.2 Оценка снижения задержек автотранспортных средств при движении с рекомендуемой скоростью	109
2.9 Выводы по главе 2.....	111
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	113
3.1 Цель, задачи и методы экспериментальных исследований	113
3.2 Общая методика проведения экспериментального исследования.....	113
3.3 Имитационная модель Extended IDM with Speed Adaptation (EIDM-SA)...	115
3.4 Моделирование в PTV VISSIM.....	119
3.5 Натурные исследования	124
3.5.1 Анализ данных и интерпретация результатов.....	129
3.5.2 Анализ пропускной способности полосы движения автотранспортных средств	133
3.5.3 Анализ задержек автотранспортных средств на пересечении ул. Зальцмана – ул. 2-я Эльтонская.....	137
3.5.4 Экспериментальная верификация безостановочного проезда пересечения ул. Зальцмана – ул. 2-я Эльтонская	138

3.6 Выводы по разделу 3.....	140
ГЛАВА 4. МЕТОДИКА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТНЫМИ РЕЖИМАМИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ.....	142
4.1 Методика по внедрению системы управления скоростными режимами транспортных потоков	142
4.1.1 Практическая реализация результатов исследования	145
4.1.2 Ограничения использования системы управления скоростными режимами транспортных потоков	147
4.2 Экологическая эффективность системы.....	149
4.3 Экономическая эффективность системы.....	152
4.3.1 Методика расчета расхода топлива автотранспортных средств	152
4.3.2 Экономический эффект от снижения расхода топлива автотранспортных средств	154
4.4 Выводы по разделу 4.....	155
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	157
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	158
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	168

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В современных городах наблюдается проблема неэффективного использования транспортной инфраструктуры в межпиковый период, когда интенсивность движения значительно ниже пиковых значений. Именно в это время наблюдаются наибольшие резервы для снижения задержек на пересечениях без необходимости существенных капитальных вложений.

Традиционные системы светофорного регулирования, работающие по жёстким циклам, не учитывают изменяющуюся интенсивность движения и специфику транспортного потока в межпиковые часы. В результате автотранспортные средства вынуждены простоять на пересечениях даже при отсутствии транспортного потока на конфликтующем направлении движения. Это приводит к росту задержек, неоправданному увеличению времени в пути, дополнительному расходу топлива и, как следствие, к экономическим потерям и росту выбросов загрязняющих веществ.

Особенностью транспортного потока в межпиковый период является его более однородный состав: преобладание легковых транспортных средств, устойчивые интервалы движения, меньшая доля грузового транспорта. Эти характеристики создают благоприятные условия для организации согласованных режимов движения, способных минимизировать задержки за счёт безостановочного проезда автотранспортных средств.

Существующие методики оценки пропускной способности, базирующиеся на статистических данных, имеют недостатки, включая отсутствие учета текущего состояния автотранспортного потока и состояния дорожного покрытия, что снижает их точность. Основные недостатки существующих систем управления в межпиковый период заключаются в использовании жестких светофорных циклов, которые не учитывают изменяющуюся интенсивность движения, в отсутствии дифференцированных режимов работы для разных периодов суток, а также в неиспользовании потенциала координированного управления при сниженной

нагрузке. Это приводит к значительному расхождению между расчетными и фактическими характеристиками работы пересечений.

Таким образом, актуальность исследования определяется необходимостью поиска и внедрения новых методов управления движением на регулируемых пересечениях, ориентированных на сокращение задержек автотранспортных средств. Решение этой задачи позволит повысить эффективность работы улично-дорожной сети, снизить затраты времени водителей и пассажиров, а также уменьшить негативное воздействие выбросов вредных веществ от автотранспорта на окружающую среду.

Объект исследования – процесс движения транспортных потоков на регулируемых пересечениях в условиях неполной загрузки (межпиковый период).

Предмет исследования – закономерности изменения задержек и пропускной способности регулируемых пересечений при реализации алгоритма безостановочного проезда автотранспортных средств.

Цель исследования – разработка методики организации безостановочного проезда автотранспортных средств для снижения задержек и повышения пропускной способности на регулируемых пересечениях.

Задачи исследования:

- 1) провести анализ современных методов и систем управления движением автотранспортных потоков на регулируемых участках улично-дорожной сети;
- 2) разработать математическую модель расчета средней скорости движения автотранспортных средств для безостановочного проезда регулируемых пересечений;
- 3) провести программную верификацию и апробацию математической модели управления скоростными режимами, определяющее изменение задержки групповых автотранспортных средств;
- 4) разработать методику организации безостановочного проезда для систем динамического управления дорожным движением и оценить ее эффективность.

Положения научной новизны, выносимые на защиту:

- 1) методика учета структурной неоднородности транспортного потока и состояния дорожного покрытия, позволяющая оценить время разъезда очереди автотранспортных средств на регулируемых пересечениях;
- 2) математическая модель расчета средней скорости движения групповых автотранспортных средств для организации безостановочного проезда регулируемых пересечений, отличающаяся учетом геометрических параметров улично-дорожной сети, режимов работы светофорных объектов;
- 3) методика управления скоростными режимами транспортных потоков, отличающаяся использованием методов оценки динамических параметров групповых и внегрупповых автотранспортных средств, позволяющая сократить временные задержки и повысить пропускную способность на регулируемых участках улично-дорожной сети.

Практическая значимость – повышение эффективности использования улично-дорожной сети на основе динамического управления скоростными режимами автотранспортных потоков.

Содержание диссертационной работы соответствует требованиям паспорта научной специальности 2.9.5. – Эксплуатация автомобильного транспорта в части п. 3 – Исследование закономерностей, разработка моделей, алгоритмов и специального программного обеспечения в решении задач проектирования, организации, планирования, управления и анализа транспортного процесса; п. 8 – Исследования в области технологий организации дорожного движения, развития технических средств организации дорожного движения.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов основаны на комплексном применении теоретического анализа, натурных наблюдений, имитационного моделирования и статистической обработки данных. В работе использован методологический аппарат, представленный в трудах отечественных и зарубежных ученых: Афанасьев М.Б. [4, 6], Врубель Ю.А. [3, 7], Капитанов В.Т. [8], Шауро С.В. [8], Клинковштейн Г.И. [9], Коноплянко В.И. [10], Кременец Ю.А. [4], Левашев А.Г. [5], Пугачев И.Н. [11], Жданов В. Л. [12], Горев А. Э. [13], Володина Ю. И. [14], Затонский А. В. [14], Евтуков С. А. [15], Якунин

Н. Н. [16], Якунина Н. В. [16], Зырянов В. В. [17, 18], Жанказиев С. В. [17, 19], Хейт Ф. [20], Иносэ Х. [21], Хамада Т. [21], ОДМ 218.2.020-2012 [22], Дрю. Д. [23], Сильянов В.В. [24], Уордроп Дж. [25], Вебстер Ф. В. [26], Андronов Р.В. [27], Морозов В.В. [28], Шепелев В.Д. [29, 30], Городокин В.А. [30], Бранстон Д. [31, 32] и многих других. Для сбора и анализа эмпирических данных применялись современные технологии, такие как свёрточные нейронные сети (система AIMS eco) [83, 84] для детектирования и анализа автотранспортных потоков, а также программный комплекс PTV Vissim для моделирования. Достоверность результатов обеспечивается репрезентативной выборкой данных, полученных с 22 полос движения 11 регулируемых пересечений г. Челябинска, верификацией модельных расчётов на основе экспериментальных данных, применением кластерного анализа (метод Уорда) и дисперсионного анализа для оценки однородности выборки в среде SPSS, а также использованием методов нечёткой логики (пакет fuzzyTECH) для учёта неопределённостей в условиях реального дорожного движения. Обоснованность выводов подтверждается корректным выбором и апробацией корректирующих коэффициентов, учитывающих состояние дорожного покрытия и категорийный состав автотранспортных средств, и их верификацией в рамках модельных экспериментов.

Реализация результатов работы. Основные результаты работы внедрены в ООО НТК «МИР» г. Челябинска.

Апробация работы. Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на международной научно-технической конференции "Автоматизация" (Сочи, 9-16 сентября 2023 г.); всероссийской научной конференции с международным участием «Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития 2023 (ЦИСП'2023)» (Челябинск, 21–23 ноября 2023 г.); международной научно-технической конференции "Экология и техносферная безопасность" (Сочи, 25-29 марта 2024 г.); XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Прогрессивные технологии в транспортных системах» (Оренбург, 2024 г.); XX-ой Международной научно-практической конференции «Прогрессивные технологии в транспортных

системах» (Оренбург, 19-21 ноября 2025); научных семинарах кафедр «Автомобильный транспорт», «Автомобили и автомобильный сервис» ЮУрГУ (2021-2025 гг.); Передовой инженерной школы двигателестроения и специальной техники «Сердце Урала» (2025 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе две статьи в журнале входящем в перечень ВАК, 5 статей индексируемых в научометрической базе Scopus и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов с выводами, заключения, списка использованных источников из 91 наименования и 5 приложений. Работа изложена на 174 страницах основного текста, содержит 41 рисунок и 22 таблицы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ

Современные транспортные системы крупных городов сталкиваются с множеством проблем, связанных с управлением дорожным движением. Одной из ключевых задач является оптимизация движения автотранспортных потоков, особенно на регулируемых пересечениях, где возникают значительные задержки движения, ведущие к снижению эффективности управления.

В данной главе рассматриваются основные теоретические аспекты организации дорожного движения, анализируются существующие подходы к управлению автотранспортными потоками и выявляются их преимущества и недостатки. Кроме того, проведен анализ работ отечественных и зарубежных исследователей, занимающихся проблемами моделирования транспортных потоков и управления дорожным движением. Рассмотрены различные методики, предложенные в научных трудах, а также выявлены направления, требующие дальнейшего изучения.

1.1 Анализ методов определения основных параметров транспортных потоков

1.1.1 Методы исследования дорожного движения

Повышение эффективности работы транспортной системы в значительной степени определяется качеством процессов транспортного планирования, базирующихся на принципах стратегического и оперативного управления, а также на адекватном методологическом аппарате.

Для объективной оценки соответствия системы предъявляемым к ней требованиям необходима организация комплекса диагностических мероприятий. Данные мероприятия нацелены на измерение ключевых эксплуатационно-технических показателей, среди которых: коэффициент загрузки инфраструктуры, время в сообщении, параметры аварийности, величина транспортных задержек,

топливная экономичность и эколого-энергетическая эффективность подвижного состава. Полученный массив данных служит основой для решения одной из центральных задач транспортного планирования – прогнозирования трансформаций, ожидаемых в системе. Реализация указанных прогнозных функций обеспечивается за счет проведения специализированных научно-прикладных исследований в области транспорта.

Методы исследования дорожного движения играют ключевую роль в анализе, планировании и управлении транспортными системами. Эти методы позволяют изучать характеристики транспортных потоков, поведение водителей и пешеходов, а также взаимодействие между различными видами транспорта (рисунок 1.1).

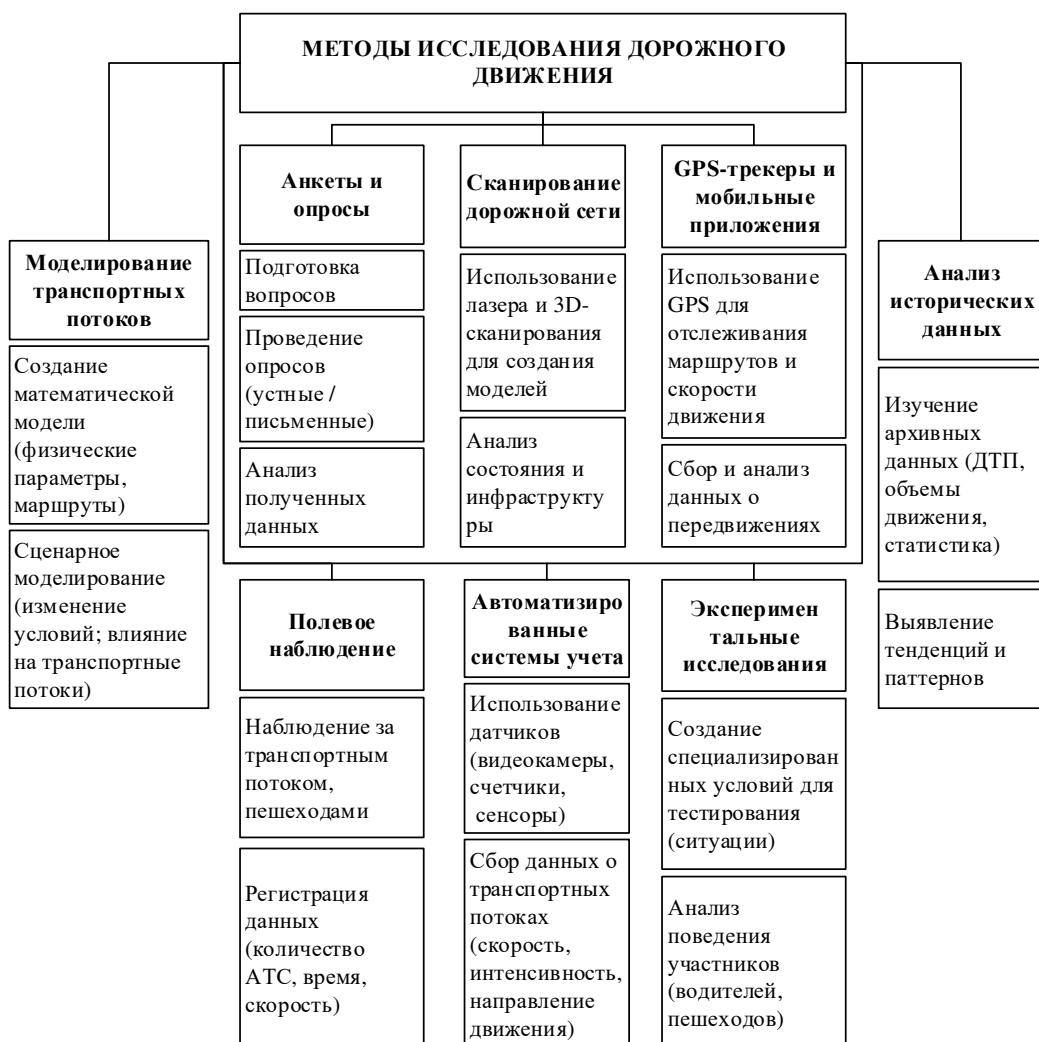


Рисунок 1.1 – Основные методы исследования дорожного движения

Проведение специализированных транспортных исследований составляет методологическую основу для процессов планирования и управления в сфере

автомобильного транспорта. Их систематическая реализация является обязательным условием для устойчивого функционирования и поступательного развития транспортно-логистических систем [1, 2].

В контексте организации дорожного движения подобные изыскания предоставляют репрезентативный массив исходных данных, служащий информационным фундаментом для выработки и обоснования эффективных управленческих решений. В научной литературе, в частности в работах Ю.А. Врубель [3], предложена классификация исследований дорожного движения, систематизирующая их ключевые направления (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Классификация исследований дорожного движения (по Ю.А. Врубель)

Группы	Методы
По методу проведения	<ul style="list-style-type: none"> – измерение, – обследование, – моделирование, – анализ документации, – опрос (анкетирование)
По глубине или уровню	<ul style="list-style-type: none"> – пробные, – оценочные, – нормальные, – детальные (специальные)
По ширине охвата	<ul style="list-style-type: none"> – одного параметра, – группы взаимосвязанных параметров, – комплексные
По периодичности	<ul style="list-style-type: none"> – разовые, – периодические, – постоянные
По месту проведения	<ul style="list-style-type: none"> – камеральные, – натурные
По назначению	<ul style="list-style-type: none"> – информационные (статические), – технологические, – предпроектные, – постановочные, – контрольные, – учебные, – научные, – судебно-технические
По принадлежности	<ul style="list-style-type: none"> – ведомственные, – межведомственные

Повышение уровня безопасности и эффективности автотранспортных потоков в условиях современного города достигается за счет реализации взаимодополняющих мероприятий, которые условно можно разделить на две основные группы: архитектурно-планировочные и организационные.

К первым относятся решения, направленные на развитие и модернизацию улично-дорожной сети (УДС), такие как новое строительство, реконструкция магистралей и пересечений. Вторые нацелены на оптимизацию использования существующей (сложившейся) транспортной инфраструктуры путем внедрения современных схем и методов организации дорожного движения [4].

При формировании комплекса мероприятий по развитию транспортной инфраструктуры необходимо учитывать принципиальные различия между архитектурно-планировочными и организационными решениями. Архитектурно-планировочные мероприятия, связанные с новым строительством и реконструкцией элементов улично-дорожной сети, характеризуются значительной капиталоемкостью и длительным временем реализации. В отличие от них, организационные мероприятия требуют умеренных бюджетных вложений и позволяют достичь оперативного эффекта в управлении транспортными потоками, что в ряде случаев делает их единственным практически реализуемым инструментом решения локальных транспортных проблем.

В структуре организационных мероприятий ключевая роль принадлежит внедрению технических средств организации дорожного движения (ТСОДД), включающих:

- дорожные знаки и разметку;
- средства светофорного регулирования;
- дорожные ограждения и направляющие устройства.

Светофорное регулирование занимает особое место в данном перечне, являясь базовым инструментом обеспечения безопасности и упорядочения транспортных потоков в узлах пересечений [5].

Вопросы, связанные с ОДД на регулируемых пересечениях, были отражены во многих работах следующих авторов: Афанасьев М.Б. [4, 6], Врубель Ю.А. [3,

7], Капитанов В.Т. [8], Шауро С.В. [8], Клинковштейн Г.И. [9], Коноплянко В.И. [10], Кременец Ю.А. [4], Левашев А.Г. [5], Пугачев И.Н. [11], Жданов В. Л. [12], Горев А. Э. [13], Володина Ю. И. [14], Затонский А. В. [14], Евтуков С. А. [15], Якунин Н. Н. [16], Якунина Н. В. [16], Зырянов В. В. [17, 18], Жанказиев С. В. [17, 19], Хейт Ф. [20], Иносэ Х. [21], Хамада Т. [21], ОДМ 218.2.020-2012 [22], Дрю. Д. [23], Сильянов В.В. [24], Уордроп Дж. [25], Вебстер Ф. В. [26], Андронов Р.В. [27], Морозов В.В. [28], Шепелев В.Д. [29, 30], Городокин В.А. [30], Бранстон Д. [31, 32], Стокс Р.В. [33], Вити Ф. [34], Ньюэлл Г. Ф. [35], Даррох Дж. Н. [36], Комерт Г. [37], Тан С. [38] и многих других.

В настоящее время в России при организации дорожного движения на регулируемых пересечениях используются Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения [39].

В международной практике проектирования и оценки эффективности объектов улично-дорожной сети ключевую методологическую роль играет Руководство по оценке пропускной способности автомобильных дорог (Highway Capacity Manual, HCM), разработанное Советом по транспортным исследованиям Национальных академий наук США [40].

Данный документ представляет собой комплексную методологическую базу, включающую концептуальные положения, алгоритмы расчетов и аналитические процедуры для определения пропускной способности и уровня обслуживания (Level of Service, LOS) разнородных элементов транспортной инфраструктуры. Методология HCM применима к анализу таких объектов, как автострады, многополосные шоссе, магистрали с регулируемым доступом, кольцевые развязки, а также пересечения с светофорным регулированием и без него. Важным достоинством подхода является учет мультимодального фактора, а именно – влияния на транспортную эффективность потоков общественного транспорта, пешеходов и велосипедистов.

В Германии используют свою версию HCM [41], в Канаде так же применяют подобное руководство по пропускной способности сигнальных пересечений [42].

Различия в данных версиях состоят в интерпретации основных понятий и, соответственно, методиках расчета показателей эффективности.

1.1.2 Определение интенсивности потока насыщения и пропускной способности регулируемых пересечений

Интенсивность движения – это количество автотранспортных средств, проходящие в единицу времени через определенное сечение дороги [22].

Интенсивность потока насыщения – часовое количество автотранспортных средств, которое может быть обслужено группой полос в предположении, что фазе зеленого сигнала отводится 100% времени [40]. Определение интенсивности движения составляет основу оценки состояния транспортного потока. Факторы, влияющие на интенсивность потока насыщения, представлены на рисунке 1.2.

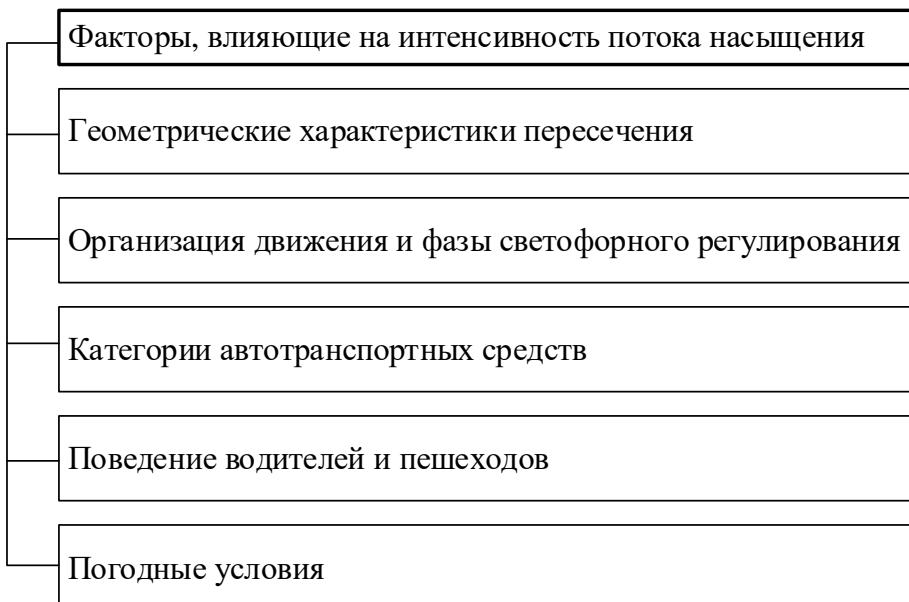


Рисунок 1.2 – Факторы, влияющие на интенсивность потока насыщения

К основным методам определения интенсивности потока насыщения относятся: полевая регистрация (проведение измерений на месте); использование эмпирических формул и моделей; компьютерное моделирование.

Для расчёта интенсивности потока насыщения – одного из ключевых параметров транспортного потока, определяющего пропускную способность регулируемых пересечений, используется следующая формула [26]:

$$s = \frac{N}{T}, \quad (1.1)$$

где s – интенсивность потока насыщения, ед/ч; N – количество автотранспортных средств, пересёкших стоп-линию, ед; T – время наблюдения, ч.

Интенсивность транспортного потока – эквивалентный часовой темп, в котором автотранспортные средства пересекают заданную точку или секцию полосы либо дороги в продолжении промежутка времени менее часа (обычно длительностью 15 минут).

Следует отметить, что интенсивность прибытия автотранспортных средств к регулируемому пересечению выражается в приведенных единицах в час (т.е. эквивалентным количеством легковых транспортных средств).

Приведенная интенсивность движения в легковых транспортных средствах используется при расчете режима регулирования и величин автотранспортных задержек на нем. При проведении обследования должно быть подсчитано количество различных типов автотранспортных средств, прибывающих на подходе к регулируемому пересечению, а затем автотранспортные средства разных типов должны быть приведены к эквивалентному количеству легковых транспортных средств. Для этого применяются специальные коэффициенты приведения типов автотранспортных средств к легковому транспортному средству. Коэффициент приведения к легковому транспортному средству представляет собой величину, которая показывает, каким количеством легковых транспортных средств можно заменить тот или иной тип автотранспортного средства [5].

Рассмотрение пиковых значений интенсивности важно при анализе пропускной способности.

Важнейшим критерием, характеризующим функционирование транспортного потока (ТП), является пропускная способность (ПС). Под последним понимается максимальное количество автотранспортных средств (АТС), которые способны пересечь сечение дороги за единицу времени. Пропускная способность

ограничивается не только физическим пространством, но и временем, отводимым для движения.

Пропускная способность пересечения представляет собой комплексный показатель, детерминированный параметрами транспортного потока и операционными условиями его функционирования. Данная система характеризуется множеством взаимозависимых элементов, образующих сложные нелинейные связи.

Фундаментальные взаимосвязи между ключевыми параметрами транспортного потока - интенсивностью, скоростью и плотностью - находят свое графическое выражение в базовой диаграмме транспортного потока (рисунок 1.3). Данная диаграмма визуализирует устойчивые корреляционные зависимости, наблюдаемые на отдельной полосе движения, и служит теоретической основой для анализа эксплуатационных характеристик дорожных объектов.

$$N_a = v_a \cdot q_a. \quad (1.2)$$

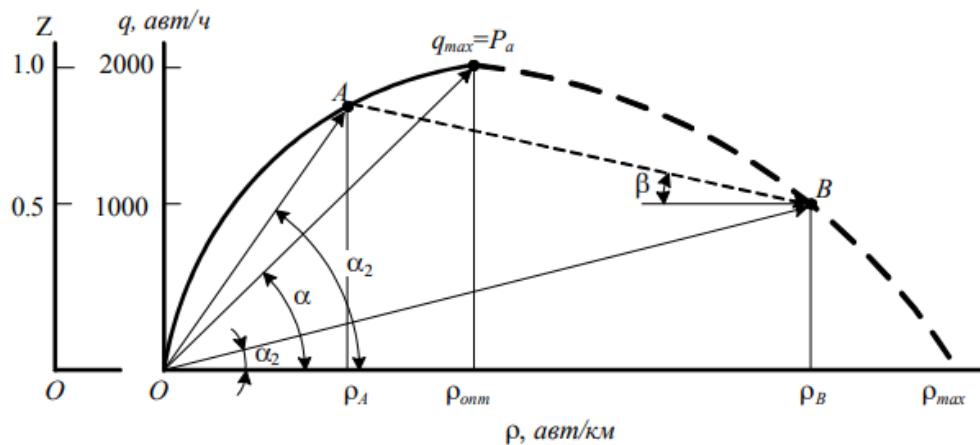


Рисунок 1.3. – Основная диаграмма транспортного потока в координатах q - ρ . Представленная диаграмма иллюстрирует динамику изменения состояния однородного транспортного потока, состоящего преимущественно из легковых автотранспортных средств, во взаимосвязи с ростом его интенсивности и плотности. Левая ветвь кривой (обозначенная сплошной линией) характеризует устойчивый режим движения, при котором последовательно наблюдаются фазы: свободного, частично связанного и связанного транспортного потока с достижением точки максимальной интенсивности (точка $q_{max} = P_a$),

соответствующей пропускной способности участка. Скорость потока в данной модели характеризуется тангенсом угла наклона радиус-вектора (α), проведенного из начала координат к любой точке кривой. Параметры потока в точке q_{max} (q_{onm} и v_{onm}) считаются оптимальными с позиции пропускной способности.

Правая ветвь кривой (обозначенная прерывистой линией) отражает переход потока в неустойчивое состояние, возникающее при превышении оптимальной плотности. Данная фаза характеризуется потерей синхронности действий водителей, вынужденных постоянно корректировать скорость движения («торможение–разгон») для поддержания безопасной дистанции. Особенно ярко это явление проявляется при неблагоприятных погодных условиях и приводит к формированию «пульсирующего» потока [9, 11].

Резкое торможение лидирующего автотранспортного средства (точка А) и последующий переход потока в состояние, соответствующее точке В, инициирует формирование «ударной волны» (штрих-линия АВ). Данная волна распространяется в направлении, противоположном движению потока, со скоростью, определяемой тангенсом угла β , и является типичной причиной цепных попутных столкновений в условиях высокой плотности транспортного потока.

В качестве примера рассмотрим линейную модель Гриншилдса (случай $n = 1$) (рисунок 1.4) [43].

$$(p) = v_{max} \left(1 - \frac{p}{p_{max}} \right), 0 \leq p \leq p_{max} \quad (1.3)$$

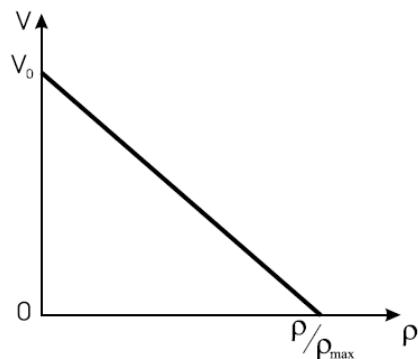


Рисунок 1.4 – Линейная аппроксимация Гриншилдса

Пусть скорость v лежит в пределах $0 < v \leq v_0$, так что $\frac{da}{dv} > 0$. Если по

какой-либо причине скорость некоторой части потока понизится на Δv ,

интенсивность движения понизится на $p_i \left(1 - \frac{2v}{v_0}\right) \cdot \Delta v$. Плотность этой части

потока p повысится, и скорость будет далее снижаться. Возмущение скорости является незатухающим, что и демонстрирует неустойчивость поведения ТП. В этих случаях автотранспортные средства в потоке вынуждены неоднократно трогаться с места и останавливаться. Это явление и есть «ударная волна».

Скорость ударной волны определяется наклоном линии, соединяющей два состояния потока (восходящий и нисходящий):

$$v_w = \frac{q_d - q_u}{p_d - p_u} \quad (1.4)$$

где q_d, p_d представляют течение потока вниз, а q_u, p_u вверх. Когда $v_w > 0$, ударная волна движется вниз относительно дороги, если $v_w < 0$ – вверх.

В точках 0 и ρ_{max} интенсивность движения $q = 0$, т. е. соответственно на дороге нет автотранспортных средств или поток находится в состоянии затора (неподвижности).

Радиус–вектор, проведенный из точки 0 в направлении любой точки на кривой, характеризующей N_a , определяет значение средней скорости потока. $v_a = N_a/q_a = tga$

Основная диаграмма ТП не может отразить всю сложность процессов, происходящих в ТП, и характеризует его надежно лишь при однородном составе и нормальном дорожном покрытии и отсутствии воздействий внешней среды.

Пропускная способность регулируемых пересечений определяется с использованием понятия «поток насыщения» – главной характеристикой в процессе анализа, проектирования и расчета узлов УДС.

В руководстве [40] трактуется поток насыщения как количество автотранспортных средств, стоявших в очереди в течение красного интервала,

которые пересекают стоп-линию сигнализируемой полосы подъезда к пересечению в течение зеленого интервала.

Пропускная способность в прямом направлении на пересечении городской дороги вычисляется согласно формуле:

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C}, \quad (1.5)$$

где c – пропускная способность полос прямого направления, ед/час; N – количество полос прямого направления на пересечении; s – скорректированная интенсивность потока насыщения для полосы прямого направления, ед/час; g/C – эффективное время зеленого сигнала для прямого направления движения на пересечении в расчете на цикл (доля времени зеленого сигнала в цикле).

Пропускная способность полосы движения на регулируемом пересечении выражается в автотранспортных средствах в час (ед/ч), легковых АТС в час (прив.ед/ч), и определяется по формуле [5, 40]:

$$c_{ij} = \frac{s_{ij} \cdot g_{ej}}{C}, \quad (1.6)$$

где c_{ij} – пропускная способность полосы i в течение фазы регулирования j , прив.ед/ч; s_{ij} – поток насыщения полосы i в течение фазы регулирования j , прив.ед/ч; g_{ej} – эффективная длительность фазы регулирования j , c ; C – длительность цикла регулирования, с.

Согласно формуле помимо геометрических параметров, изменение которых в соответствии с быстро меняющейся транспортной ситуацией невозможно, на пропускную способность регулируемого пересечения влияют потоки насыщения s_{ij} , эффективная длительность фаз g_{ej} и длительность цикла регулирования C .

1.1.3 Исследование состава транспортного потока

Состав транспортного потока – соотношение АТС различного типа [12].

Состав движения – качественный показатель автотранспортного потока, характеризующий наличие в нем различных типов автотранспортных средств [22].

Структура ТП является ключевым фактором, комплексно влияющим на все параметры дорожного движения (ДД), поскольку она репрезентирует видовой состав автомобильного парка региона или страны в целом. Согласно данным агентства «Автостат» на 1 июля 2024 года, общий парк автотранспортных средств в Российской Федерации насчитывает 55 060 000 единиц, при этом доля легковых транспортных средств составляет 85% от указанного объема (по данным Автостат).

Влияние структуры ТП на уровень загрузки дорожной сети обусловлено значительной вариативностью габаритных и динамических характеристик АТС различных категорий. В научно-исследовательской практике, как отмечено в работах [9, 10, 11], количественная оценка состава потока осуществляется через определение процентной доли АТС каждой категории. Для интегральной оценки воздействия разнотипных автотранспортных средств на дорожную обстановку применяется метод приведения к условному легковому автотранспортному средству с использованием специальных коэффициентов (k_{npi}).

Методологическая база для определения значений данных коэффициентов основывается на концепции «динамического габарита» АТС. Под динамическим габаритом понимается минимальный участок полосы движения, обеспечивающий безопасное перемещение автотранспортных средств с заданной скоростью. Данный параметр интегрирует в себя как собственную длину автотранспортного средства, так и величину безопасной дистанции до впереди движущегося автотранспортного средства.

Клинковштейн Г. И. выделяет три подхода к определению динамического габарита [9]:

1. Расчет, исходя из минимальной теоретической дистанции безопасности, принимают абсолютно равными тормозные свойства пары АТС и учитывают только время реакции ведомого водителя. В этом случае возможная интенсивность ТП не имеет предела по мере увеличения скорости.

2. Расчет на «полную безопасность» предполагает, что дистанция должна быть равна полному остановочному пути ведомого автотранспортного средства:

$$L_d = l_a + v_a \cdot t_p + \frac{v_a^2}{2 \cdot j_a} + l_0 \quad (1.7)$$

где L_d – динамический габарит АТС, м; l_a – длина АТС, м; v_a – скорость АТС, м/с; t_p – время реакции ведомого АТС, с; j_a – замедление АТС, м/с²; l_0 – зазор до остановившегося впереди АТС, м.

В этом случае интенсивность имеет предел при определенном значении скорости ТП. Такой подход применим при высоких скоростях (90 км/ч).

3. Основан на том, что при расчете дистанции безопасности необходимо учитывать разницу тормозных путей (или замедлений) автотранспортных средств, так как «лидер» в процессе торможения также перемещается на расстояние, равное своему тормозному пути.

1.1.4 Динамические характеристики транспортного потока

Скорость движения представляет собой интегральный показатель, выполняющий роль целевой функции в процессе организации дорожного движения. Наиболее полное представление о динамических характеристиках автотранспортного средства дает пространственно-временной график изменения его скорости на протяжении маршрута. Однако сбор подобных данных для всего множества участников транспортного потока сопряжен со значительными методическими трудностями, поскольку требует развернутой системы непрерывного мониторинга на каждом автотранспортном средстве.

В связи с этим, в практических исследованиях и проектах по организации движения принято использовать выборочный метод, основанный на фиксации мгновенных значений скорости в репрезентативных точках дорожной сети. Данный показатель служит ключевым критерием при оценке уровня обслуживания (LOS) различных категорий дорог – от загородных двухполосных трасс до городских магистралей и примыканий к автострадам.

С методологической точки зрения, скорость определяется как производная пройденного пути по времени (км/ч). Для характеристики скорости гетерогенного

транспортного потока необходима репрезентативная статистическая мера, учитывающая значительный разброс индивидуальных скоростей автотранспортных средств. Согласно методологии НСМ [40], в качестве такой меры используется средняя скорость проезда (скорость сообщения), вычисляемая как отношение длины анализируемого участка к среднему времени его преодоления. Данный показатель обладает достаточной статистической релевантностью и демонстрирует устойчивые корреляционные связи с другими параметрами транспортного потока.

Расчёт средней скорости движения проводится по формуле:

$$v = \frac{n \cdot L}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{L}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i} = \frac{L}{t_c} \quad (1.8)$$

где n_a – количество автотранспортных средств в потоке; L – протяженность участка дороги, км; t_i – время проезда участка i -м автотранспортным средством с учетом всех задержек, ч; t_c – среднее время проезда участка дороги, ч.

Здесь время проезда включает задержки, остановки ввиду прерываний потока из-за действия регулирующих сигналов или возникновения заторов и трактуется как общее время проезда сегмента дороги определенной длины.

К ТП применимо несколько различных параметров скорости, перечисленных ниже:

- средняя скорость движения – мера потока трафика, основанная на наблюдаемых значениях времени проезда автотранспортных средств через секцию магистрали известной длины и вычисляемая как частное от деления длины сегмента на среднее время движения автотранспортных средств через сегмент. Время движения включает только моменты, когда автотранспортные средства пребывают в движении;

- средняя скорость проезда – мера потока трафика, основанная на наблюдаемых значениях времени проезда автотранспортных средств через секцию магистрали известной длины и вычисляемая как частное от деления длины сегмента на среднее время проезда автотранспортных средств через сегмент,

которое включает все интервалы задержки из-за остановок. Это также и пространственная средняя скорость;

– пространственная средняя скорость – статистический термин, обозначающий среднюю скорость, основанную на среднем времени проезда автотранспортных средств через сегмент дороги. Параметр получил свое название потому, что показатель среднего времени проезда означает усреднение времени, проведённого каждым автотранспортным средством в пределах определенного сегмента дороги, или пространства;

– временная средняя скорость – арифметическое среднее скоростей, наблюдавшихся при пресечении автотранспортными средствами точки на магистрали. Также носит название средней точечной скорости. Значения скоростей автотранспортных средств, проходящих точку, регистрируются и арифметически усредняются;

– скорость движения без помех – средняя скорость автотранспортных средств в пределах заданного участка дороги, измеренная в условиях низкой нагрузки, когда водители имеют возможность ехать с желаемой для них скоростью, не будучи ограниченными задержками управления.

В ТП автотранспортные средства движутся равномерно сравнительно непродолжительное время. Большую часть времени они перемещаются неравномерно. Так, в условиях города автомобиль движется с постоянной скоростью 15-25% времени работы, а ускоренно (при разгоне) – 30-45%.

Ускорение – это величина, характеризующая скорость изменения скорости автотранспортного средства. Оно может быть постоянным или переменным в зависимости от условий движения.

Для равноускоренного движения используется простая кинематическая формула:

$$a = \frac{v_f - v_0}{t}, \quad (1.9)$$

где a – ускорение ($\text{м}/\text{с}^2$); v_f – конечная скорость автотранспортного средства ($\text{м}/\text{с}$); v_0 – начальная скорость автотранспортного средства ($\text{м}/\text{с}$); t – время разгона (с).

Если автотранспортное средство начинает движение из состояния покоя ($v_0 = 0$), формула упрощается до:

$$a = \frac{v_f}{t}. \quad (1.10)$$

Если ускорение изменяется со временем, его можно выразить через производные скорости или пути:

- ускорение как производная скорости. Это означает, что ускорение в каждый момент времени определяется мгновенной скоростью автотранспортного средства:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} \quad (1.11)$$

- ускорение как функция пути. Эта формула применяется, если известна зависимость скорости v от пройденного пути x :

$$a = v \frac{dv}{dx}. \quad (1.12)$$

Ускорение автотранспортного средства во многом зависит от его приемистости, т. е. способности быстро увеличивать скорость движения. Ускорение автотранспортного средства определяется экспериментально и расчетным способом.

Ускорение автотранспортных средств зависит от многих факторов, которые следует учитывать при расчете пропускной способности. Это может быть состояние дорожного покрытия, наличие трамвайных линий, расстояние до стоп-линий и т.д.

Задержки движения – показатель, характеризующий потери времени не только на все вынужденные остановки АТС, но из-за снижения скорости транспортного потока по сравнению со сложившейся средней скоростью свободного движения на данном участке дороги:

$$t_z = \int_{l_1}^{l_2} \left[\frac{1}{v_k(l)} - \frac{1}{v_{pek}(l)} \right] dl, \quad (1.13)$$

где v_k и v_{rek} – соответственно крейсерская и рекомендованная скорости (м/с); l – отрезок дороги (м).

Показатель задержки движения позволяет прогнозировать изменение состояния транспортного потока и пропускной способности.

Задержки транспортных средств на отдельных узлах или участках УДС могут быть также оценены коэффициентом задержки, характеризующим степень увеличения фактического времени нахождения в пути по сравнению с расчетным. Коэффициент задержки (K_3) определяется по формуле:

$$K_3 = \frac{t_\phi}{t_p}, \quad (1.14)$$

где t_ϕ – фактическое время нахождения в пути, с; t_p – расчетное время нахождения в пути, с.

В реальных условиях эксплуатации транспортные задержки подразделяются на две принципиально различные категории: задержки на перегонах и задержки в узлах дорожной сети (пересечениях), что визуализировано на рисунке 1.5.

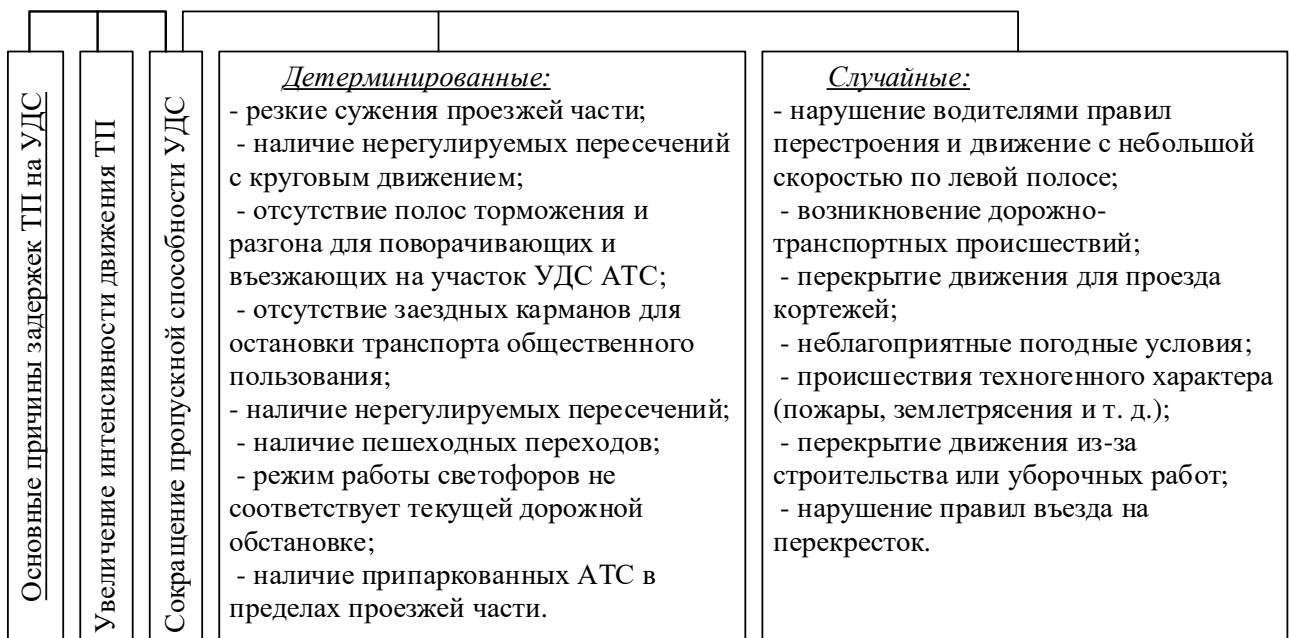


Рисунок 1.5 – Причины задержек ТП

Возникновение задержек на перегонных участках обусловлено комплексом детерминирующих факторов. К ним относятся наличие маневрирующих или тихоходных автотранспортных средств, создающих помехи общему потоку,

взаимодействие с пешеходными потоками, локальные помехи, вызванные стоящими АТС, системные заторы, являющиеся следствием превышения пропускной способности дорожного участка.

Формирование транспортных задержек в узлах пересечений имеет системный характер и обусловлено двумя основными группами факторов. На нерегулируемых пересечениях их причиной является предоставление приоритета участникам движения по конфликтующим направлениям в соответствии с правилами приоритета. На регулируемых пересечениях основным источником задержек выступает цикличность работы светофорной сигнализации, в ходе которой автотранспортные средства вынуждены останавливаться или снижать скорость в течение фазы запрещающего сигнала.

1.2 Развивающиеся технологии управления дорожным движением

1.2.1 Технологии V2X и C-V2X

Современные транспортные системы становятся все более интеллектуальными, стремясь минимизировать количество аварий и улучшить управление дорожным движением. Одним из ключевых направлений развития транспортных технологий является внедрение систем связи между автотранспортными средствами и окружающей инфраструктурой.

Технологии V2X (Vehicle-to-Everything) и C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) позволяют автотранспортным средствам обмениваться информацией с другими участниками дорожного движения, элементами дорожной инфраструктуры и облачными сервисами, тем самым повышая безопасность и эффективность движения.

Технология V2X обеспечивает обмен данными между автотранспортными средствами и другими объектами дорожной инфраструктуры. Она подразделяется на несколько типов взаимодействий (табл. 1.2).

Таблица 1.2 – Основные принципы технологии V2X

Тип взаимодействия	Описание	Основные преимущества
V2V (Vehicle-To-Vehicle)	Связь между АТС	<ul style="list-style-type: none"> – Обмен данными о скорости, направлении движения, резком торможении. – Позволяет предупреждать водителей о возможных столкновениях и аварийных ситуациях. – Улучшает координацию движения.
V2I (Vehicle-to-Infrastructure)	Взаимодействие с дорожной инфраструктурой	<ul style="list-style-type: none"> – АТС получают данные от светофоров, дорожных знаков, камер контроля скорости. – Оптимизируется работа светофоров, что снижает возникновение заторных ситуаций. – Водители получают информацию о дорожных условиях в режиме реального времени.
V2P (Vehicle-to-Pedestrian)	Взаимодействие с пешеходами	<ul style="list-style-type: none"> – Система предупреждает водителей о пешеходах. – Используются специальные мобильные приложения или устройства для передачи сигналов между АТС и пешеходом. – Снижает количество ДТП с участием пешеходов.
V2N (Vehicle-to-Network)	Подключение к сетевым сервисам	<ul style="list-style-type: none"> – АТС получает данные о заторах. – Улучшает работу навигатора. – Позволяет удаленно обновлять программное обеспечение АТС

Технология C-V2X дополняет систему сотовой связью и 5G V2N (Vehicle-to-Network), что позволяет автотранспортным средствам фактически находиться online в общей информационной среде. Принцип работы системы C-V2X1 представлен на рисунке 1.6).

Автотранспортное средство 1 передаёт данные (скорость, направление, резкое торможение), сотовая сеть принимает и обрабатывает информацию, облачный сервер анализирует данные и направляет предупреждения другим участникам, автотранспортное средство 2 получает информацию и предпринимает необходимые меры.



Рисунок 1.6 –Пример передачи данных в системе С-V2X

Комбинация систем и технологий связи позволяет автотранспортному средству видеть и анализировать дорожную обстановку как с рядом собой, в непосредственной близости, так и в любом масштабе (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Сравнительный анализ V2X и С-V2X

Параметр	V2X (DSRC)	C-V2X (LTE/5G)
Радиус связи	До 1 км	До 3 км
Задержка передачи	<10 мс	<1 мс (в 5G)
Зависимость от операторов связи	Нет	Присутствует
Пропускная способность	Ограниченнaя	Высокая
Совместимость с автономными АТС	Ограниченнaя	Полная

Технологии V2X и С-V2X находят широкое применение в транспортных системах и позволяют значительно повысить уровень обслуживания дорожного движения, за счет предотвращение дорожно-транспортных происшествий, оптимизации работы светофоров, мониторинга дорожной обстановки (автотранспортные средства получают актуальные данные о заторах, авариях, ремонтных работах и погодных условиях в режиме реального времени). А также эффективное управление энергопотреблением – электромобили могут

оптимизировать маршрут в зависимости от расположения зарядных станций и текущего заряда батареи.

В настоящее время технология V2X уже внедряется большинством производителей автотранспортных средств, в дальнейшем, с урегулированием правового и технического регламента, система V2X займёт место в стандартном наборе функций автотранспортных средств.

1.2.2 Audi Travolution - интеллектуальная система управления движением

Audi Travolution – это инновационная система, разработанная компанией Audi для оптимизации городского движения и повышения эффективности взаимодействия между автотранспортными средствами и городской инфраструктурой (рисунок 1.7). Эта система направлена на сокращение времени ожидания на светофорах, снижение расхода топлива и уменьшение выбросов CO₂.

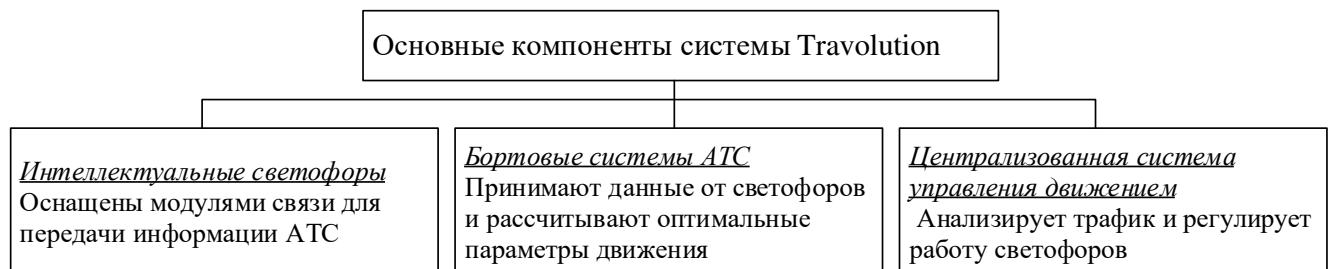


Рисунок 1.7 – Компоненты системы Audi Travolution

Audi Travolution использует технологию V2I (Vehicle-to-Infrastructure), которая позволяет автотранспортным средствам взаимодействовать с городской инфраструктурой. Алгоритмы системы анализируют текущие данные о движении и предсказывают смену сигналов светофоров. Это позволяет водителям заранее адаптировать скорость, снижая количество остановок и ускорений.

Компания Audi провела успешное тестирование системы Travolution в городе Ингольштадт, Германия (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Преимущества системы Audi Travolution

Преимущество	Описание
Экономия топлива	Сокращение числа остановок и ускорений уменьшает расход топлива до 17%
Экологичность	Снижение выбросов CO ₂ благодаря более плавному движению
Улучшение трафика	Уменьшение заторов за счёт оптимизации сигналов светофоров
Комфорт	Водители получают данные о времени смены сигнала светофора, что повышает удобство вождения

В рамках испытаний были модернизированы светофоры (более 50 светофоров были подключены к системе), а автотранспортные средства, оснащённые специальными модулями, получили возможность взаимодействовать с ними в режиме реального времени (рисунок 1.8).

Полученные данные отображаются на дисплее, установленном на приборной панели, предоставляя водителю в режиме реального времени доступ к нескольким очень полезным элементам информации, включая:

- скорость, которую нужно принять, чтобы следующий светофор поменял сигнал на зеленый, прежде чем автотранспортное средство достигнет его (который затем можно настроить с помощью адаптивного круиз-контроля);
- светофор, к которому вы приближаетесь, собирается переключиться на желтый или красный (кратковременное прерывание подачи энергии от двигателя или визуальное, или звуковое предупреждение);
- как долго вам нужно ждать на красный свет, прежде чем он снова становится зеленым;
- обзор заторов в районе.

Система Audi Travolution представляет собой важный шаг в развитии интеллектуального управления транспортными потоками. Дальнейшее развитие технологий V2I и внедрение подобных решений в массовое использование может привести к значительным улучшениям в сфере городского транспорта.

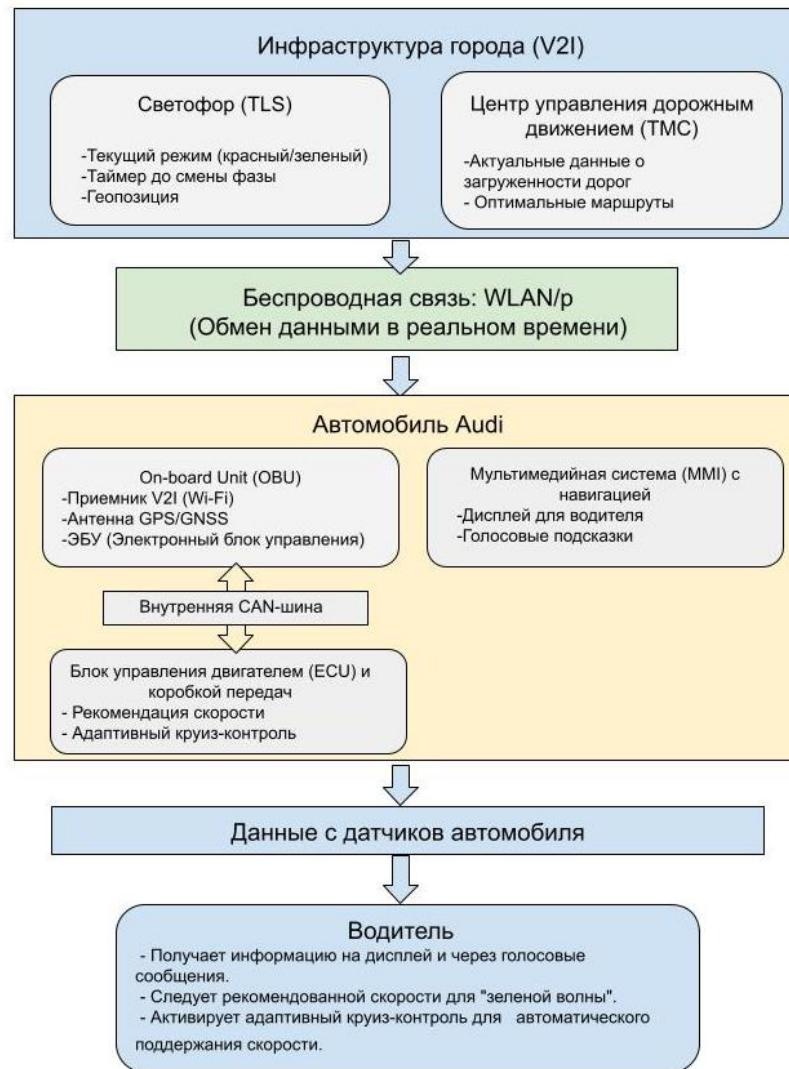


Рисунок 1.8 – Схема взаимодействия системы Audi Travolution

Таким образом, данная система, хотя и решает задачу адаптации скорости, не предоставляет инструментов для групповой координации потока в условиях меняющегося состава и наличия очереди, что является предметом данного исследования.

1.2.3 UTMS - Универсальные системы управления дорожным движением

Universal Traffic Management Society (UTMS) – разработанная в Японии интеллектуальная система управления дорожным движением, направленная на снижение заторов, повышение безопасности и улучшение экологии.

Одной из ключевых задач системы UTMS является регулирование транспортных потоков в режиме реального времени. Система использует данные с камер, датчиков и GPS-устройств автотранспортных средств для анализа дорожной ситуации:

- датчики фиксируют загруженность дорог и передают информацию в центральную систему;
- искусственный интеллект анализирует данные и предлагает оптимальные маршруты;
- автоматизированные светофоры изменяют сигналы в зависимости от интенсивности движения;
- водители получают рекомендации по альтернативным маршрутам через мобильные приложения и навигационные системы.

UTMS играет важную роль в предотвращении аварий и контроле соблюдения правил дорожного движения, за счет систем раннего оповещения, автоматического контроля нарушений, приоритета для экстренных служб – система регулирует светофоры, создавая «зеленый коридор» для машин скорой помощи, пожарных и полиции.

Система способствует снижению вредных выбросов CO₂ за счет оптимизации движения автотранспортных средств:

- умное управление светофорами сокращает время простоя автотранспортных средств на пересечениях;
- оптимизация маршрутов помогает избежать загруженных участков, снижая расход топлива;
- поддержка общественного транспорта (PTPS) делает его более удобным и быстрым, снижая использование личных автотранспортных средств.

UTMS делает передвижение по городу более удобным и предсказуемым, сокращая время в пути. Система предоставляет актуальную информацию о трафике через навигационные системы, автоматически регулирует движение,

уменьшая количество резких торможений и разгонов, предоставляет приоритетный проезд для общественного транспорта.

UTMS включает в себя несколько ключевых систем, каждая из которых отвечает за определённый аспект управления движением (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Основные компоненты UTMS

Компонент	Функция
DSSS (Системы поддержки безопасности вождения)	Предупреждает водителей о пешеходах, светофорах, авариях и других опасностях.
PTPS (Системы приоритета общественного транспорта)	Дает приоритет общественному транспорту
FAST (Системы быстрого вытеснения аварийных ТС)	Освобождает дорогу для экстренных служб, меняя сигналы светофоров.
МАСС (Передовые мобильные информационные системы)	Передает актуальные данные о заторах и погодных условиях водителям.
EVPS (Электронные системы зондирования ТС)	Собирает информацию о трафике с АТС и анализирует транспортную ситуацию.

Система UTMS была внедрена в Токио, Осаке и Нагоя. Тестирование показало следующие результаты: снижение заторов на 20–30%; экономия топлива на 15–25%; сокращение времени работы светофоров на 10–15%; уменьшение аварийности на 15%. График, показывающий снижение загруженности дорог в Токио, Осаке и Нагое после внедрения UTMS (рисунок 1.9).

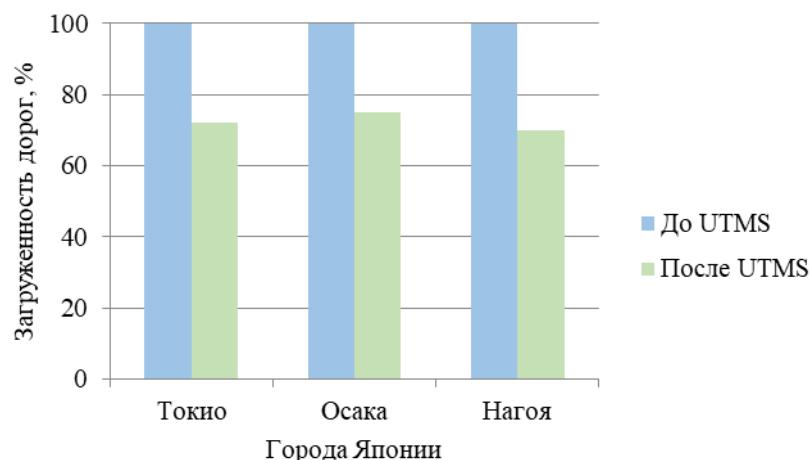


Рисунок 1.9 – Снижение загруженности дорог в городах Японии после внедрения UTMS

Universal Traffic Management Society (UTMS) – это инновационная система, которая делает дороги умнее, безопаснее и эффективнее. Ее применение позволяет

снизить загруженность дорог, уменьшить количество аварий и улучшить экологическую обстановку в городах.

Несмотря на комплексный подход и доказанную эффективность в условиях высокой и средней интенсивности движения, система UTMS, как и другие рассмотренные интеллектуальные транспортные системы, в своей базовой конфигурации ориентирована преимущественно на пиковые нагрузки и решение проблем заторов. Алгоритмы адаптивного управления светофорами в рамках UTMS оптимизируют циклы для минимизации средних задержек в условиях насыщенного потока. Однако в межпиковый период, когда интенсивность движения существенно снижается, а состав потока становится более однородным, сохраняется использование жестких или адаптированных по упрощенным правилам циклов.

1.3 Выводы по главе 1

Исследование литературных источников и нормативных документов, касающихся определения ключевых характеристик транспортных потоков на регулируемых пересечениях, позволило выявить наиболее значимые направления, требующие дальнейшего изучения:

1. Анализ существующих методов исследования транспортных потоков показал их важность для эффективного управления дорожным движением. Однако традиционные подходы (измерения, моделирование, опросы) не позволяют учитывать ситуационное изменения трафика и сопряжены со значительными затратами временных и материальных ресурсов.

2. Параметры ТП взаимосвязаны, не поддаются жесткому управлению, имеют стохастичный характер и зависят от геометрических параметров УДС, планировки городских улиц и организации дорожного движения.

3. Современные интеллектуальные системы, такие как V2X, Audi Travolution и UTMS, демонстрируют высокую эффективность в управлении транспортными потоками. Однако системы не направлены на оптимизацию движения в периоды

низкой загруженности с учетом динамических параметров автотранспортных средств при проезде регулируемых пересечений, которые определяются наличием очереди внегрупповых автотранспортных средств, состоянием и качеством дорожного покрытия. Внедрение таких систем сопряжено с техническими и организационными трудностями, включая необходимость модернизации инфраструктуры, дооборудованием АТС и адаптации к местным условиям.

4. Определены наиболее значимые параметры ТП, такие как скорость, ускорение и задержки АТС, управляемыми которыми можно эффективно влиять на пропускную способность регулируемых пересечений.

Комплексный подход к анализу транспортных потоков позволил выявить новые возможности применения инновационных технологий, позволяющих повысить эффективность транспортной инфраструктуры на основе управления параметрами ТП в режиме реального времени.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Общая методика исследования

Для достижения цели и решения поставленных задач в диссертации использовались основы методик проведения научных исследований, представленных в работах Власова А.А., Левашева А.Г., Афанасьева М.Б., Врубель Ю.А. и др. авторов.

В качестве методологической основы исследования применен системный подход, предполагающий изучение объектов в их целостности и взаимосвязях. На основе данной методологии была разработана единая стратегия проведения исследования (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Схема общей методики исследований

Ключевая последовательность этапов теоретического исследования выстраивается следующим образом. Первоначально, на основе анализа литературных источников, производится идентификация факторов и определение границ изучаемой системы. Далее, в рамках системного подхода, применяются методы анализа и синтеза, позволяющие декомпозировать систему на структурные элементы и выявить взаимосвязи между ними. Для

повышения адекватности исследования могут быть введены дополнительные допущения и ограничения.

Итогом теоретического анализа становится формулировка рабочей гипотезы, которая детерминирует выбор типа математической модели, адекватно описывающей причинно-следственные связи между параметрами системы.

Экспериментальные исследования проводятся с целью подтверждения выдвинутой гипотезы, определения числовых значений параметров и статистических характеристик математических моделей, а также оценки их соответствия реальным условиям

Завершающий этап исследования состоит в разработке методики для внедрения разработанных решений в систему управления дорожным движением в условиях реального транспортного потока.

Анализ, проведённый в первом разделе данного исследования, показал, что одной из наиболее значимых проблем организации дорожного движения в городах являются задержки автотранспортных средств. Это негативно сказывается на безопасности дорожного движения и снижает пропускную способность улично-дорожной сети. Постоянные разгоны и торможения, а также вынужденные остановки на запрещающий сигнал светофора при проезде пересечений, даже в периоды снижения транспортной нагрузки, способствуют увеличению уровня загрязнения окружающей среды и потерь времени в пути, что в конечном итоге ухудшает качество жизни населения.

Современные методы управления дорожным движением не в полной мере способны эффективно решать эти проблемы, что подчёркивает необходимость внедрения интеллектуальных транспортных систем (ИТС) для повышения эффективности и экологичности городского движения.

2.2 Анализ подходов к моделированию движения автотранспортных потоков

Автотранспортный поток, как объект исследования, представляет собой сложную кибернетическую систему, движение которой подчиняется определенным статистическим закономерностям. Установление взаимосвязей между его параметрами (интенсивностью, плотностью, скоростью) сопряжено со значительными трудностями, обусловленными многфакторностью и стохастической природой этих процессов. Для адекватного математического описания требуется учет ряда фундаментальных свойств, усложняющих формализацию:

1. Стохастичность. Параметры автотранспортного потока носят вероятностный характер, что допускает их прогнозирование лишь с определенной степенью достоверности. Данное свойство усугубляется неоднородностью характеристик самой дорожной сети.
2. Нестационарность. Изменчивость состояния автотранспортного потока проявляется в нескольких временных масштабах, наиболее значимыми из которых являются суточная, недельная и сезонная динамика.
3. Ограниченная управляемость. Даже при наличии полной информации о состоянии потока и технической возможности доведения управляющих воздействий до водителей, их выполнение носит вероятностный и рекомендательный характер.
4. Многокритериальность. Оценка эффективности функционирования потока требует учета комплекса зачастую противоречивых показателей (время задержки, средняя скорость, аварийность, экологическая нагрузка). Оптимизация по одному критерию может привести к деградации по другим.

Исторически значимым вкладом в развитие теории стал фундаментальный труд С. Дрю и Р. Дональда «Теория транспортных потоков и управление ими» [23], в котором впервые была системно представлена

концепция системы «водитель – автомобиль – дорога» и заложены основы для построения комплексных математических моделей.

В современной исследовательской практике, согласно отечественным источникам [48, 49], доминируют два принципиально различных подхода к моделированию:

– Микроскопический подход интерпретирует поток как дискретную совокупность взаимодействующих автотранспортных средств. Методологической основой здесь служит теория следования за лидером, где поведение каждого водителя детерминируется динамикой движущегося впереди автотранспортного средства.

– Макроскопический подход рассматривает поток как сплошную среду, характеризуемую усредненными интегральными показателями (интенсивность, плотность, средняя скорость). Данные модели позволяют анализировать потоковые характеристики на уровне сети.

Следует констатировать, что в настоящее время в научном сообществе отсутствует универсальная и общепринятая классификация математических моделей, описывающих взаимодействие параметров улично-дорожной сети с характеристиками автотранспортного потока, что актуализирует необходимость дальнейших исследований в данной области.

Поэтому, для простоты и понимания физического смысла каждой модели их группируют по функциональной роли:

- прогнозные модели;
- оптимационные модели;
- имитационные модели.

Главная задача прогнозных моделей заключается в прогнозировании последствий при совершении изменений в транспортной сети.

Имитационные модели предназначены для детального анализа процесса движения и его развития во времени. Учитывая это можно сказать, что прогнозные и имитационные модели дополняют друг друга.

Оптимизационные модели используют для оптимизации функционирования транспортных сетей, для оптимизации маршрутов перевозок с позиции эффективного использования автотранспортных средств, а также выбора оптимальной конфигурации сети с позиции безопасности перевозочного процесса и дорожного движения.

В ранних исследованиях динамики транспортных потоков была предложена базовая модель, описывающая адаптацию скорости движения автотранспортного средства к скорости лидера [37], однако данная модель обладает существенным ограничением – она не учитывает такие важные аспекты автотранспортного потока, как:

- возникновение и развитие неустойчивости движения;
- формирование и распространение ударных волн;
- процессы образования транспортных заторов.

Современные модификации данной модели включают дополнительные параметры, повышающие ее адекватность. В частности, в работе [4] введен параметр временной задержки $t_d \approx 1,3\epsilon$ отражающий физиологическое время реакции водителя на изменение скорости движения впереди идущего автотранспортного средства. В исследовании [31] предложена интерпретация коэффициента $1/\tau$ как показателя чувствительности водителя α , что позволяет преобразовать исходное уравнение в дифференциально-разностную форму:

$$\dot{x}_i(t + t_d) = \alpha(\dot{x}_i(t) - \dot{x}_{i+1}(t)) \quad (2.1)$$

Анализ устойчивости решения уравнения (2.1) при постоянном значении α показывает, что условие возникновения неустойчивости имеет вид $t_d/\tau > 1/2$. Такая математическая модель успешно описывает:

- механизмы формирования ударных волн в транспортном потоке;
- динамику возникновения и развития заторов.

Однако предположение о постоянстве коэффициента чувствительности не позволяет точно воспроизвести фундаментальную диаграмму транспортного потока. Более точные результаты достигаются при учете зависимости

чувствительности водителя от дистанции до впереди идущего автотранспортного средства: с уменьшением дистанции коэффициент чувствительности возрастает.

Модели должны учитывать максимум возможных факторов, влияющих на заторовые явления и дорожное движение, и быть доступными в их описании (таблица 2.1). Ключевые отличия:

- макромодели – прогнозируют общую плотность и скорость потока;
- микромодели – анализируют ускорение/торможение, дистанции между автотранспортными средствами;
- кинетические – изучают переходы между свободным и загруженным режимами.

Таблица 2.1 – Сравнение моделей транспортного потока

Тип модели	Характеристики	Примеры моделей	Применение
Макромодель	Описывают поток как сплошную среду, используют уравнения гидродинамики	- Модель Лайтхилла-Уизема-Ричардса (LWR) - Модель Танака (диффузионная) - Модель Пейна (ударные волны)	Анализ заторов, прогнозирование плотности потока
Микромодель	Моделируют поведение каждого АТС, учитывают динамику водителей	- Модель следования за лидером - Модель оптимальной скорости (Ньюэлла) - Модель Трайбера (социальные силы) - Клеточные автоматы (Нагель-Шрекенберг)	Оптимизация светофоров, оценка безопасности
Кинетические модели	Комбинируют макро- и микроуровень, статистические ансамбли	- Уравнение Болцмана для транспорта - Вероятностные модели взаимодействий	Исследование фазовых переходов в потоках

2.2.1 Модели формирования и оценки очереди автотранспортного потока

Очереди на сигнализированных пересечениях являются основной причиной задержек движения и изменчивости времени в пути в городских сетях.

Длина очереди – это количество автотранспортных средств, которые скапливаются у пересечения, показатель является одним из важнейших критериев оценки эффективности функционирования регулируемого пересечения.

Оценка длины очереди является важной составляющей теории управления транспортными потоками на узлах УДС. Кроме того, значение длины очереди является основой для расчета задержек автотранспортных средств и дальнейшего определения качества дорожного движения на регулируемом пересечении.

Исследования по оценке очередей можно разделить на два класса моделирования: (1) модели, основанные на совокупном вводе–выводе трафика [30, 34, 49, 50], с ограничением, что эти модели недостаточны для обеспечения пространственного распределения динамики очередей [51] и страдают от ошибок измерений, и (2) модели, основанные на теории ударных волн LWR [52, 53, 54], которые обеспечивают пространственно – временную динамику процесса массового обслуживания с помощью входных данных от петлевых детекторов или зондирующих автотранспортных средств. Кроме того, многие ключевые исследования оценки очередей и задержек в исследованиях транспорта [55, 56, 57] основаны (полностью или частично) на довольно ограниченных предположениях, что приводит к закрытым теоретическим решениям. Эти предположения можно обобщить следующим образом: (а) известные настройки сигнала, (б) известный начальный размер очереди в начале цикла, (в) известная схема прибытия (например, равномерная,

пуассоновская) и (г) ненасыщенные условия, при которых ожидаемое значение прибытия (постоянно) не превышает пропускную способность сигнала.

Подход к оценке длины очереди автотранспортных средств в конце зеленого сигнала представлен в разработанном немецком нормативном документе HBS 2015 [58], в котором средняя длина очереди в конце разрешающего сигнала определяется в зависимости от интенсивности движения и пропускной способности полосы движения.

С позиции методологии математического моделирования, общепринятой является классификация моделей транспортных задержек на детерминированные и стохастические. В современных системах управления дорожным движением наибольшую практическую значимость имеют комбинированные модели, интегрирующие обе составляющие.

Детерминированная компонента задержки рассчитывается в рамках предположения о стационарности транспортного потока, что предполагает выполнение следующих условий:

- начальная очередь в момент включения разрешающего сигнала светофора равна нулю;
- прибытие автотранспортных средств носит регулярный характер с постоянной интенсивностью в пределах цикла регулирования;
- процесс разъезда характеризуется насыщенной интенсивностью при наличии очереди и соответствует интенсивности прибытия при ее отсутствии;
- уровень транспортного спроса не превышает пропускной способности пересечения, определяемой как произведение потока насыщения на долю разрешающей фазы в общем времени цикла [66].

Впервые модель оценки задержки (Z) при жестком светофорном регулировании была предложена Бекманн М. [59] в виде формулы (2.2) с допущением о биноминальном процессе прибытия транспортных средств и детерминированном характере процесса обслуживания:

$$Z = \frac{c-g}{2 \cdot c \cdot (1-q/S)} \cdot \left(\frac{Q_0}{q} + \frac{c-g+1}{2} \right) \quad (2.2)$$

где c – длительность цикла, с; g – эффективная длительность зеленого сигнала, с; q – интенсивность прибытия транспортных средств, ед/с; S – интенсивность разъезда очереди, ед/с; Q_0 – величина остаточной очереди, ед.

Необходимость учета остаточной очереди послужила стимулом в проведении исследований по получению закрытой формы уравнения остаточной очереди, однако оно так и не было получено.

Первая, широко известная приближенная формула, была получена Вебстер Ф.В. [26] при сочетании теоретического подхода и численного моделирования:

$$Z = \frac{(1-g/c)^2}{2 \cdot (1-(g/c) \cdot x)} + \frac{x^2}{2 \cdot q \cdot (1-x)} - 0.65 \cdot \left(\frac{c}{q^2} \right) \cdot x \quad (2.3)$$

где Z – средняя задержка за цикл, с; c – длина цикла регулирования, с; g – эффективная длительность зеленого сигнала, с; x – степень насыщения (отношение интенсивности движения к пропускной способности); q – интенсивность прибытия, ед/ч.

Анализ представленных моделей транспортных задержек выявляет их принципиальное ограничение – необходимость достижения условиями движения стохастического равновесия, теоретически требующего бесконечного временного горизонта при стабильных параметрах. Практическая применимость данных моделей сохраняется в условиях умеренной загрузки дорожной сети, когда отношение интенсивности потока к пропускной способности существенно ниже единицы. В этом случае установление квазистационарного режима происходит за приемлемое время, что позволяет рассматривать такие модели как допустимую аппроксимацию реальных процессов.

Однако при достижении уровнем транспортного спроса величины пропускной способности временной период, необходимый для стабилизации

системы, как правило, превышает продолжительность интервала с постоянными условиями движения. Более того, в условиях пересыщения потока, когда интенсивность превышает пропускную способность, фундаментальные предпосылки моделей нарушаются, что приводит к их некорректности.

Ключевой проблемой в данном контексте является задача оценки длины очереди автотранспортных средств, традиционно решаемая методами натурного наблюдения. Современный тренд предполагает переход к использованию автотранспортных средств в качестве мобильных сенсоров, что открывает возможности для создания распределенных систем мониторинга дорожного движения в режиме реального времени.

При разработке современного автотранспортного оборудования были использованы автономные (электронные) устройства позиционирования и навигации (чтобы помочь водителям в процессе поиска пути и предоставления информации о текущем местоположении и о том, как оно соотносится с пунктом назначения) и системы связи для сбора и распространения информации (например, система радиоданных (Radio Data System (RDS)). Следующим шагом стало сочетание статических навигационных систем и динамической информации о дорожном движении, результатом которого стали первые типы динамической навигации или систем наведения. При достаточно высоком проценте АТС, оборудованных устройством динамического ведения по маршруту (dynamic route guidance (DRG)), действующим как передвижные детекторы движения, возникает система мониторинга трафика, не основанная на инфраструктуре. Такие автотранспортные средства, которые участвуют в транспортном потоке и могут определять условия дорожного движения и передавать их в центр дорожного движения, называются транспортными средствами–зондами.

Сами концептуальные АТС зондового автотранспортного средства действуют как передвижные детекторы движения, которые не привязаны к

конкретным и фиксированным точкам вдоль дорожной инфраструктуры. Поскольку время в пути между двумя точками более надежно, чем измерения скорости автотранспортных средств в одной конкретной точке дороги, зондирование автотранспортных средств, участвующих в дорожном движении, и автоматическое сообщение времени (связи), необходимого для проезда между двумя пересечениями, являются ценным источником информации данных о дорожном движении [60 – 64].

Поскольку концепция мониторинга движения с помощью зондирующих автотранспортных средств имеет потенциальное преимущество, заключающееся в том, что, наконец, может быть получена фактическая информация о транспортных потоках в городских дорожных сетях, метод определения местоположения, который следует выбрать для применения зондового автотранспортного средства, должен иметь высокую производительность в городских районах. По этой причине можно было бы принять гибридную систему позиционирования, сочетающую дифференциальную GPS (DGPS) с сопоставлением карт и точным счислением. Надежность этого комбинированного метода определения местоположения очень высока, а точность составляет от 2 до 10 метров.

2.2.2 Методы управления автотранспортными потоками для без- остановочного движения на регулируемых пересечениях

В городских условиях транспортным потоком можно манипулировать тремя основными способами – остановкой автотранспортных средств, изменением параметров движения, информацией и изменением направления движения. Для этого используются технические средства организации дорожного движения, автоматизированные системы управления дорожным движением и интеллектуальные транспортные системы (рисунки 2.2 и 2.3).



Рисунок 2.2 – Способы и средства управления ТП

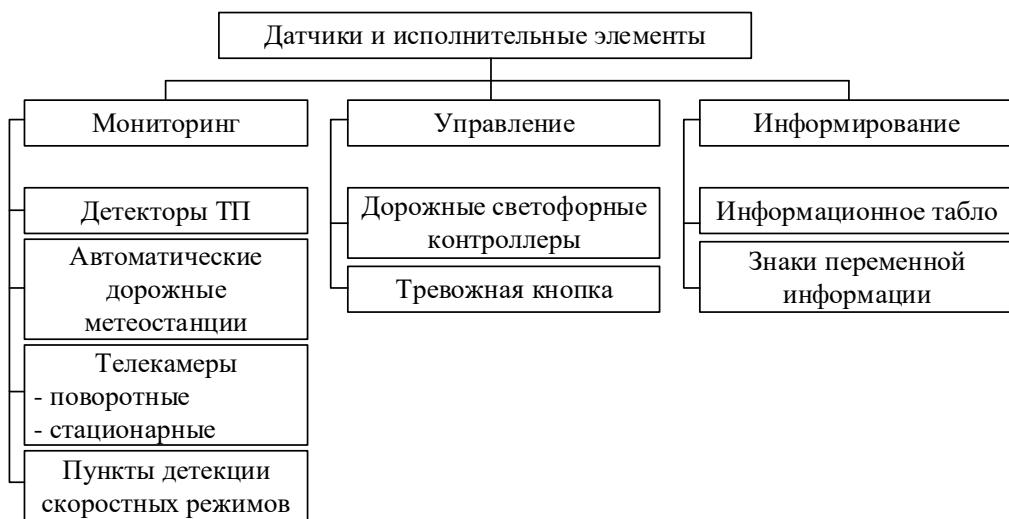


Рисунок 2.3 – Датчики и исполнительные элементы

Технические средства организации дорожного движения (ТСОДД) выполняют системообразующую функцию в обеспечении безопасности дорожного движения, являясь физической основой для реализации проектных решений и оперативного управления транспортными потоками.

Эволюция ТСОДД привела к созданию автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУ ДД) – технологических комплексов, реализующих алгоритмизированное управление параметрами транспортных потоков. Ключевой целевой функцией таких систем выступает минимизация совокупных транспортных задержек в зоне их ответственности (от отдельного пересечения до районной сети).

Современным этапом развития являются интеллектуальные транспортные системы (ИТС), основанные на интеграции телематических технологий. Их фундаментальным отличием является способность к автоматическому формированию и реализации управляющих воздействий в режиме реального времени на основе оперативного мониторинга состояния транспортной системы.

В узлах улично-дорожной сети обеспечение безостановочного движения автотранспортных средств достигается преимущественно за счет оптимизации режимов светофорного регулирования. В современной практике управления выделяются две принципиальные методологии:

- Жесткое программное управление по фиксированным временными циклами;
- Адаптивное управление, параметры которого динамически изменяются в зависимости от текущего состояния транспортного потока.

Одним из эффективных методов повышения пропускной способности УДС является координированное регулирование движения автотранспорта по «зеленой волне». Использование данного метода позволяет снизить транспортные потери с минимальными финансовыми затратами за счет повышения средней скорости и сокращения остановок транспорта у регулируемых пересечений [3, 4, 66, 67].

В основе расчета координированного движения АТС лежит графоаналитический метод. Данный метод достаточно прост, но очень трудоемкий в расчетно-графических операциях, поэтому применение его ограничено (рисунок 2.4).

При организации координированного управления следует учитывать АТС, поворачивающие с примыкающих улиц. Часть из них подъезжает к пересечению на запрещающем сигнале светофора и останавливается, создавая очередь. Такие АТС называют *внегрупповыми* [4].

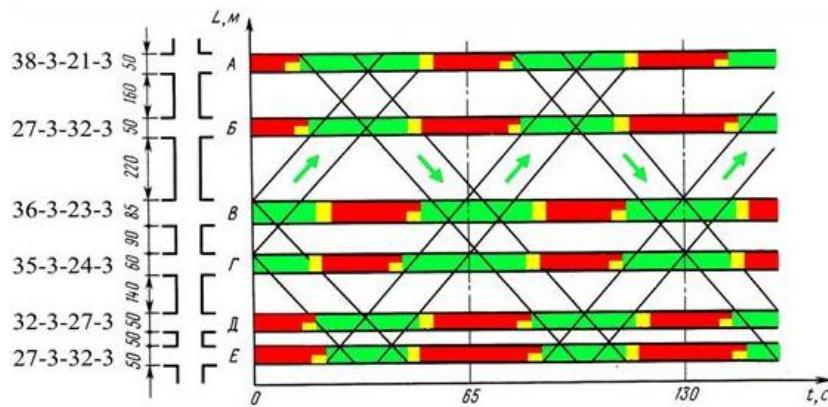


Рисунок 2.4 – График координированного управления движением на городской магистрали

Очередь из внегрупповых АТС является препятствием для безостановочного движения группы, подъезжающей к пересечению к моменту включения разрешающего сигнала светофора. Поэтому разрешающий сигнал должен включаться с некоторым опережением, причем длительность опережения определяется по среднему числу внегрупповых АТС из расчета 2 с на одно автотранспортное средство. Очередь внегрупповых АТС определяют для каждого узла УДС методом натурных наблюдений после внедрения системы координированного управления. В дальнейшем система корректируется [4].

Используемый в настоящее время метод расчета работы светофорных фаз основан на статистических данных о дорожном движении. Такой метод имеет существенные недостатки, так как объем трафика имеет зачастую непредсказуемый характер (праздничные дни, погодные условия и т.п.). Поэтому циклы светофоров должны гибко изменяться соответствующим образом. Интеллектуальное управление светофором означает динамическое изменение времени зеленого и красного света с течением времени. Алгоритмы управления должны основываться на таких входных данных, как плотность трафика, длина очереди, пиковое время, межпиковое время, погода, распределение населения и т. д. для расчета световых циклов.

В рамках исследования области ИТС при организации светофорного регулирования следует сфокусироваться на двух основных критериях:

максимизировать поток, пересекающий пересечение во время зеленого света, и минимизировать время ожидания автотранспортных средств.

Все большее число исследователей признают, что уменьшение задержки и количества остановок на сигнализированных пересечениях является потенциально эффективной стратегией для облегчения транспортных заторов [4, 68].

С тех пор как Вебстер Ф.В. предложил оригинальный метод синхронизации сигналов, который привел к значительному сокращению задержек автотранспортных средств [26], многие исследования предложили стратегии синхронизации сигналов и задокументировали преимущества реализации программ синхронизации сигналов. Большая часть литературы делится на следующие два класса: подход математического программирования и подход, основанный на моделировании [69].

Подход математического программирования использовал набор смешанных целочисленных линейных формулировок программирования (MILP), направленных на минимизацию суммарных задержек пересечения или максимизацию зеленой полосы пропускания [69, 70, 72]. В то время как имитационный подход разработан для представления сложных взаимодействий при вариациях транспортных потоков и параметров синхронизирующих сигналов [73, 74, 75].

2.3 Исследование фактических транспортных потоков

2.3.1 Определение факторов, влияющих на пропускную способность транспортных потоков

Сбор данных в ходе исследования был осуществлен с применением системы интеллектуального мониторинга ТП «AIMS eco» (рисунок 2.5) [83, 84]. Архитектура системы построена на основе сверточной нейронной сети,

которая обеспечивает извлечение и интерпретацию данных о индивидуальных параметрах движения АТС в режиме реального времени (Приложение 1).



Рисунок 2.5 – Обнаружение и отслеживание АТС сверточной нейронной сетью «AIMS eco» г. Челябинск

Система «AIMS eco» предназначена для непрерывного мониторинга параметров АТС и оценки вредных выбросов от ТП [44, 83, 84]. Эта система объединяет в себе современные инструменты технологического мониторинга, автоматизации и искусственного интеллекта. Система построена на использовании существующей телекоммуникационной и метеорологической инфраструктуры городов и позволяет дистанционно подключать и обслуживать цифровые посты в любой точке мира. Система определяет и агрегирует следующие показатели трафика: количество и классификация АТС; средняя скорость и траектории движения АТС; время задержки по типам АТС; уровень загрузки узла УДС (рисунок 2.6). Погрешность определения скорости автотранспортных средств методом проекции с учетом калибровки камеры не превышает 1,5 км/ч [30, 81, 82].

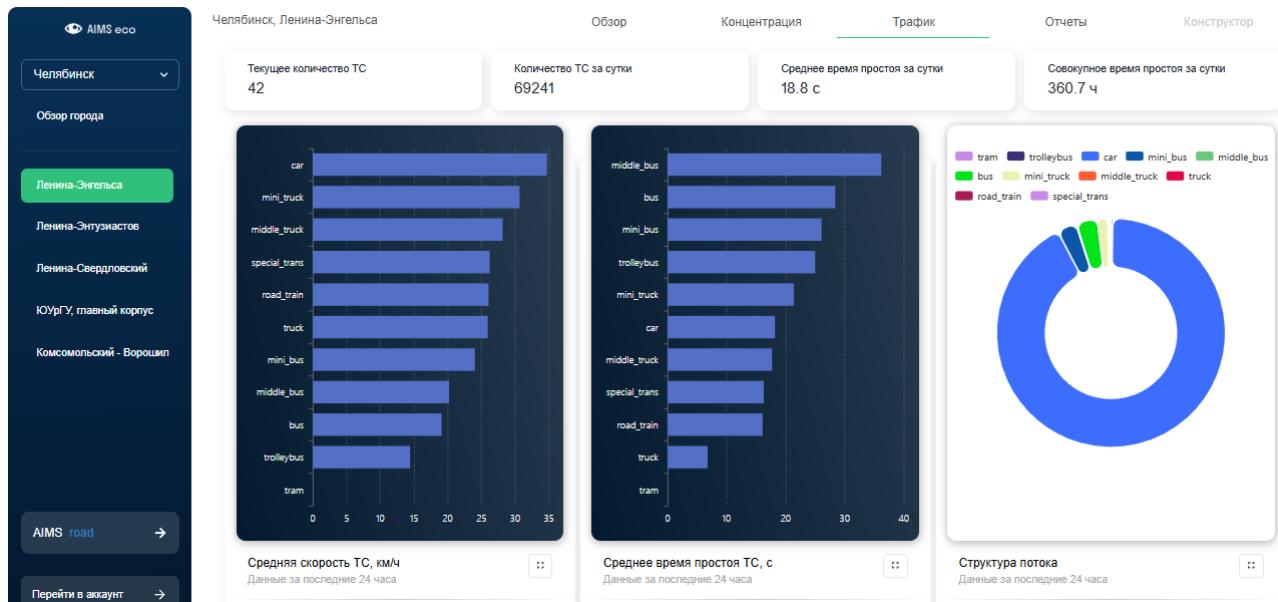


Рисунок 2.6 – Мониторинг трафика в режиме реального времени системой «AIMS eco»

В качестве сенсорной сети применены обзорные камеры уличного видеонаблюдения, оснащённые алгоритмами компьютерного зрения на основе свёрточной нейронной сети. На каждом пересечении мониторинг осуществлялся на полосах движения с разрешённым направлением «прямо», выбранных исходя из критерия оптимального угла обзора и отсутствия визуальных помех со стороны средств видеонаблюдения. При этом фиксировались геометрические параметры полос, а также характеристики ТП. Было выбрано 22 полосы с 11 пересечений (таблица 2.2). Исследования проводились в межпиковый период, характеризующийся значительным количеством деловых поездок и активными личными передвижениями населения.

Каждой исследуемой полосе был присвоен свой идентификационный номер в зависимости от принадлежности к пересечению и направлению движения ТП.

Таблица 2.2 – Идентификационный номер (ID) полосы движения АТС

№ п/п	ID	Наименование пересечения, направление движения
1	Kir_Kal_N	ул. Кирова – ул. Калинина, север
2	Kir_Kal_S	ул. Кирова – ул. Калинина, юг
3	Gag_Rust_NE	ул. Гагарина – ул. Руставели, северо-восток
4	Gag_Rust_S	ул. Гагарина – ул. Руставели, север
5	Koms_Vor_E	Комсомольский пр. – ул. Ворошилова, восток
6	Koms_Vor_W	Комсомольский пр. – ул. Ворошилова, запад
7	Koms_Svred_E	Комсомольский пр. – Свердловский пр., восток
8	Len_Eng_W	пр. Ленина – ул. Энгельса, запад
9	Len_Eng_E	пр. Ленина – ул. Энгельса, восток
10	Len_Svob_W	пр. Ленина – ул. Свободы, запад
11	Len_Svob_E	пр. Ленина – ул. Свободы, восток
12	Pob_Kraszn_W	пр. Победы – ул. Краснознаменная, запад
13	Pob_Kraszn_E	пр. Победы – ул. Краснознаменная, восток
14	Mol_Pob_N	ул. Молодогвардейцев – пр. Победы, север
15	Chich_Pob_NW	ул. Чичерина – пр. Победы, северо-запад
16	Chop_Khokhr_N	ул. Чоппа – ул. Хохрякова, север
17	Chop_Khokhr_S	ул. Чоппа – ул. Хохрякова, юг
18	Saltzm_1Elton_NE	ул. Зальцмана – ул. 1-я Эльтонская, северо-восток
19	Saltzm_1Elton_SW	ул. Зальцмана – ул. 1-я Эльтонская, юго-запад
20	Saltzm_1Elton_SE	ул. Зальцмана – ул. 1-я Эльтонская, юго-восток
21	Saltzm_1Elton_NW	ул. Зальцмана – ул. 1-я Эльтонская, северо-запад
22	Truda_NW	ул. Труда, северо-запад

В результате анализа суточной динамики интенсивности движения, представленной на рисунках 2.7 и 2.8, установлены временные интервалы пиковой нагрузки. Эти данные нужны для определения межпикового времени, так как исследование проводилось для этого времени суток. Анализ выявил утренний час «пик» с 7:00 до 9:00, вечерний – с 16:00 до 18:00. При этом, основное количество поездок (более 80%) осуществляется в межпиковый период.

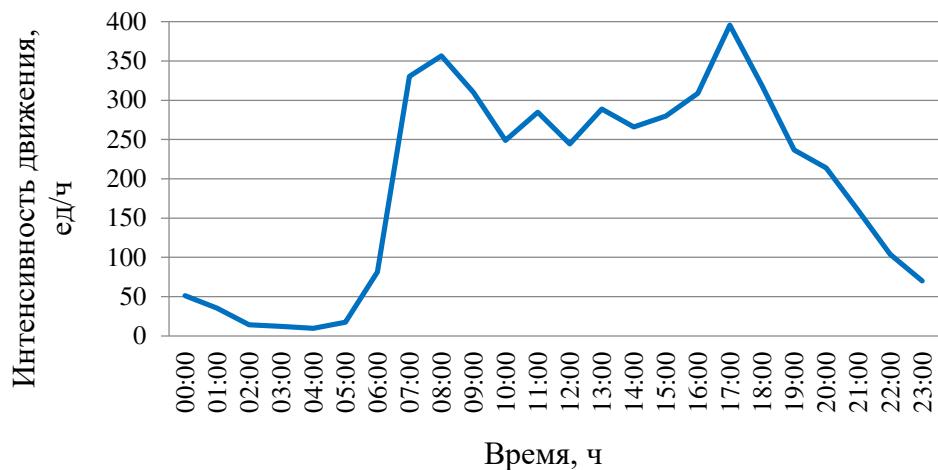


Рисунок 2.7 – Средняя интенсивность движения АТС с выраженным утренним и вечерним пиками нагрузки

Анализ средней интенсивности движения на исследуемых полосах (рисунок 2.4) выявил наличие выраженных пиковых нагрузок в утренние и вечерние часы. Следует отметить, что для некоторых полос, согласно данным рисунка 2.5, характерно наличие только утреннего пика интенсивности.

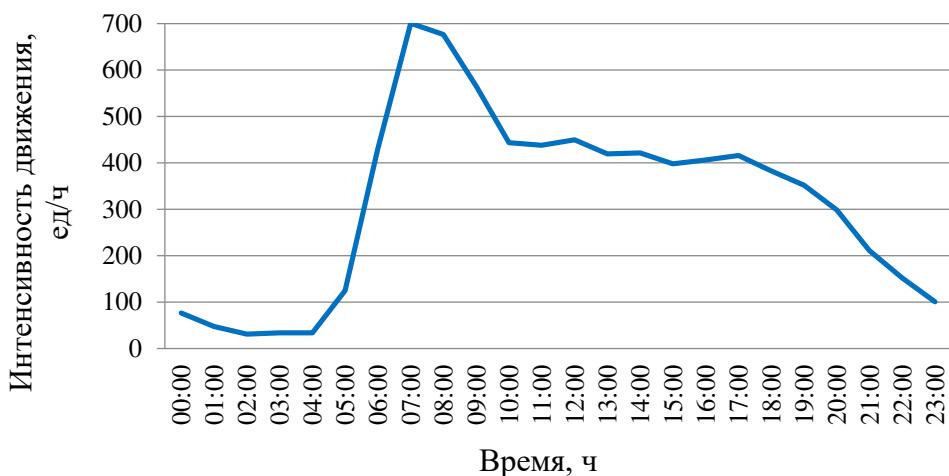


Рисунок 2.8 – Интенсивность движения АТС на полосах с выраженным утренним пиком нагрузки

Максимальный поток насыщения согласно теории транспортных потоков, достигается при скорости 50 км/ч [13, 20, 23, 24, 40, 59]. На рисунке 2.9 представлены данные фактической средней скорости на исследуемых полосах с разрешенным движением только прямо.



Рисунок 2.9 – Средняя скорость проезда пересечения АТС, км/ч

Анализ данных позволяет сделать вывод, что, несмотря на визуальную и структурную схожесть полос, каждая из них характеризуется индивидуальными значениями скорости. Это свидетельствует о наличии специфических факторов, влияющих на транспортный поток на каждой конкретной полосе.

Учет данной особенности является критически важным в рамках исследования, поскольку предположение об идентичности полос может привести к некорректным выводам и неэффективным решениям в области ОДД. Таким образом, необходимо применять дифференцированный подход к анализу каждой полосы, учитывая её уникальные характеристики и параметры движения для обеспечения точности и достоверности результатов исследования.

Анализ параметров транспортных потоков на пересечениях позволил выявить их детальную структуру и количественные характеристики, представленные на рисунке 2.10.

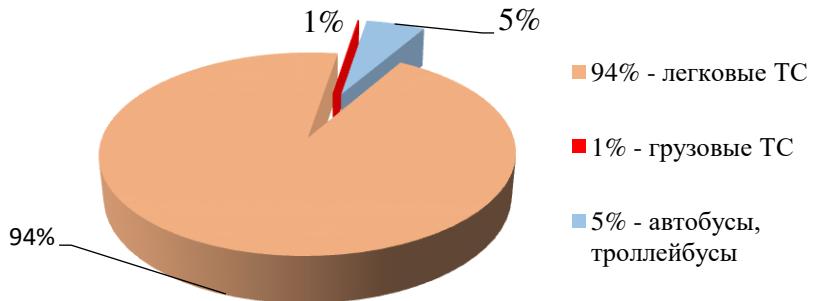


Рисунок 2.10 – Структура ТП

Рисунок наглядно демонстрирует, что транспортный поток на исследуемом участке практически полностью формируется легковыми АТС. Легковые транспортные средства абсолютно преобладают, составляя 94% от общего потока, на автобусы и троллейбусы приходится 5%, доля грузового транспорта является наименьшей – 1%.

Данная информация является основой для разработки оптимизационных мер и уточнения расчетных моделей поведения транспортных потоков в условиях реальной улично-дорожной сети.

В рамках исследования осуществлена количественная оценка стартовых ускорений групповых АТС, начинающих движение из состояния остановки перед стоп-линией при переходе светофорного сигнала в разрешающий режим (рисунок 2.11).

Рисунок 2.11 – Среднее стартовое ускорение первого АТС в очереди, м/с²

В результате анализа ускорений на 22-х полосах, с разрешенным движением только прямо, выявлено, что показатели значительно варьируются (в 2-3 раза) в зависимости от пересечения. На ускорение первого АТС в очереди существенное влияют такие факторы как, качество дорожного покрытия на пересечении (колейность, дорожные ямы, трамвайные рельсы), состояние дорожного покрытия (наличие осадков), структура ТП и др.

В рамках исследования автотранспортные средства были объединены в две обобщённые категории на основе анализа их динамических характеристик (стартового ускорения) (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Классификация автотранспортных средств в зависимости от стартовых ускорений [16].

Категории автотранспортных средств		Средние стартовые ускорения, $\frac{м}{с^2}$	Принятые категории
1	Легковые АТС, небольшие грузовики (фургоны), другие небольшие АТС с прицепом и без него	2,80 - 0,80	I
2	Двухосный грузовик		
3	Трехосный грузовик		
4	Четырехосный грузовик		
5	Двухосный грузовик с прицепом		
6	Трехосный грузовик с прицепом		
7	Автопоезд, 2-х осный тягач с одноосным полуприцепом		
8	Автопоезд, 2-х осный тягач с 2-х осным полуприцепом		
9	Автопоезд, 2-х осный тягач с 3-х осным полуприцепом	1,78 – 0,47	II
10	Автопоезд, 3-х осный тягач с 1 или 2-х осным полуприцепом		
11	Автопоезд, 3-х осный тягач с 3-х осным полуприцепом		
13	Автотранспортное средство с 7-ю и более осями и другие не классифицируемые АТС		
12	Автобус		

Данное решение обусловлено следующими факторами:

1. Статистическая значимость групп. Анализ экспериментальных данных показал, что значения ускорений внутри выделенных двух групп имеют минимальное варьирование, в то время как различия между группами являются статистически значимыми. Это позволяет сохранить репрезентативность данных при сокращении количества категорий.

2. Упрощение модели без потери точности. Объединение АТС в две ключевые категории позволяет снизить сложность расчетов при сохранении адекватности моделирования транспортного потока.

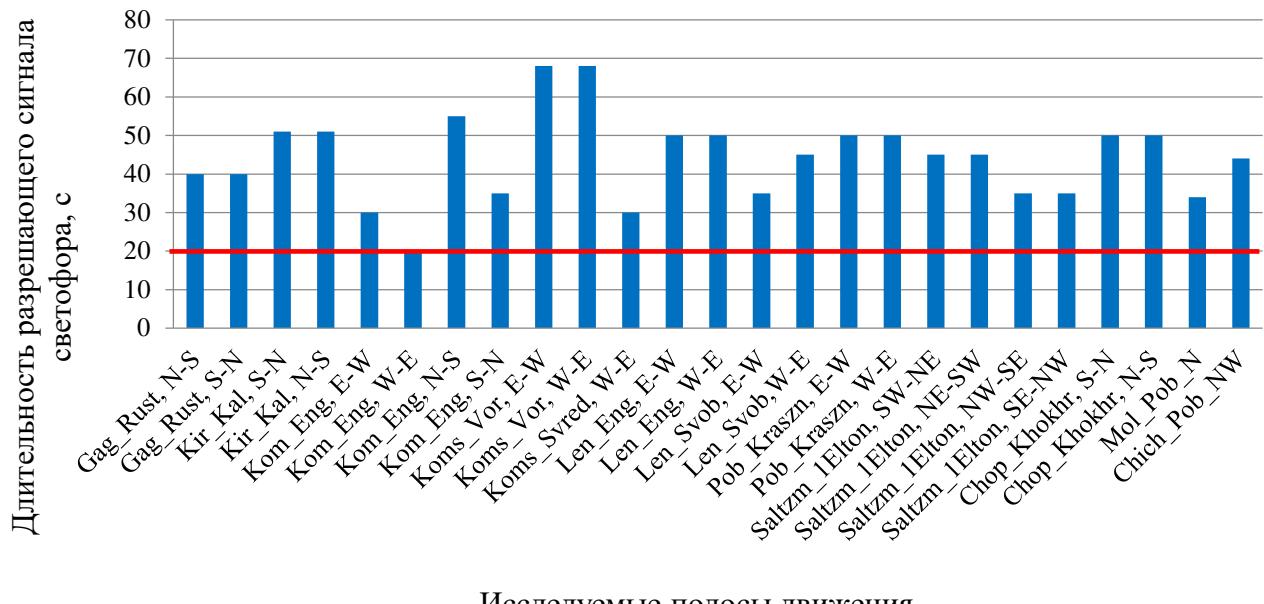
3. Учёт доминирующих типов АТС. Анализ структуры потока показал, что более 90% автотранспортных средств относятся к этим двум категориям, что делает их наиболее релевантными для изучения.

Классификация АТС, представленная в таблице 2.3 является результатом анализа структуры транспортного потока и экспериментально полученных значений ускорения (Приложение 2). Для каждой категории АТС определены характерные диапазоны стартовых ускорений, что отражает объективную связь между типом автотранспортного средства и его динамическими характеристиками. Полученные данные позволяют дифференцированно подходить к моделированию транспортных потоков с учётом реального поведения различных категорий АТС в условиях городского движения.

На следующем этапе исследования выполнена оценка пропускной способности полос движения на пересечении (формула 1.6) [5, 9, 22, 40]. Замеры осуществлялись в течение начальных 20 секунд разрешающей фазы светофорного цикла (рисунок 2.12), что обеспечило стандартизацию условий сбора данных и позволило провести сравнительный анализ всех пересечений в единообразных условиях.

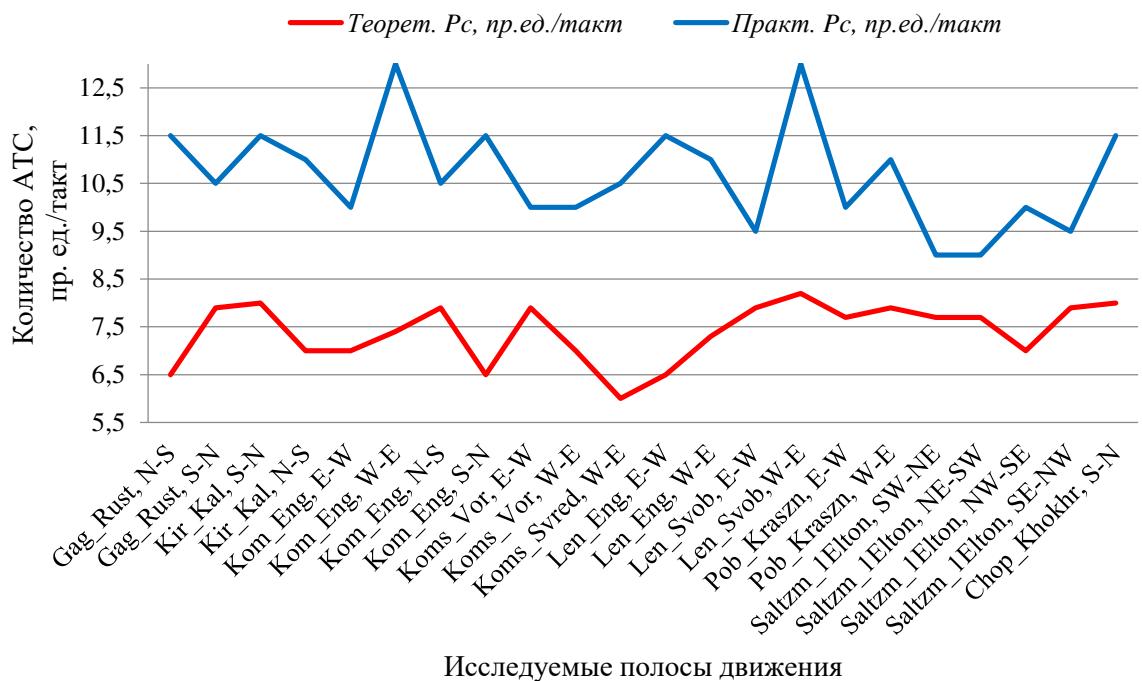
Проведенные расчеты теоретической и практической пропускной способности на рассматриваемых полосах движения АТС выявили расхождения между фактическими и расчетными показателями в диапазоне

10–30% (рисунок 2.13). Установленное отклонение указывает на необходимость дальнейшего изучения факторов, влияющих на пропускную способность, с целью выявления причин обнаруженных расхождений и уточнения расчетных методик.



Исследуемые полосы движения

Рисунок 2.12 – Длительность разрешающего сигнала светофора на исследуемых полосах



Исследуемые полосы движения

Рисунок 2.13 – Пропускная способность исследуемых полос движения ТС за 20 с

Анализ показал, что в большинстве тактов практическая пропускная способность превышает расчётные значения. Это указывает на системную погрешность существующих методик, которые не учитывают критически важные параметры:

- состояние дорожного покрытия;
- вариабельность ускорения АТС в зависимости от внешних условий.
- неоднородность состава транспортного потока.

Игнорирование этих параметров приводит к занижению расчётных показателей и оказывает негативное влияние на эффективность организации дорожного движения, ограничивая возможность разработки оптимальных режимов работы светофорных объектов и координации транспортных потоков.

Человеческий фактор также оказывает влияние на ускорение АТС, а в свою очередь и на пропускную способность пересечений. Влияние можно рассматривать в нескольких аспектах (рисунок 2.14).

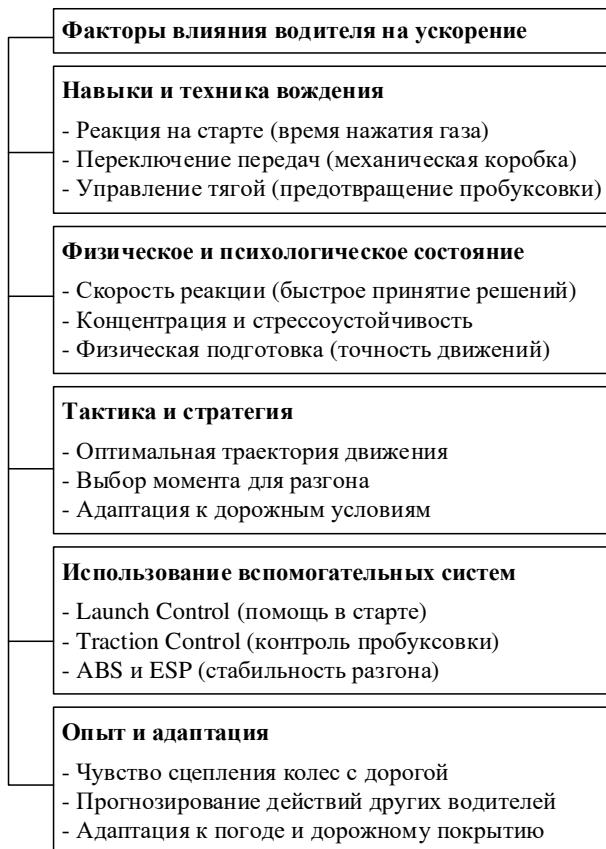


Рисунок 2.14 – Влияние водителя на ускорение автотранспортного средства

Предварительно отобранные факторы, влияющие на пропускную способность пересечения, которые были рассмотрены, представлены на рисунке 2.15, далее будут выявлены закономерности исследуемой системы и отобраны основные факторы.



Рисунок 2.15 – Предварительный отбор факторов

2.3.2 Закономерности работы реальной системы управления дорожным движением

Изучение закономерностей функционирования исследуемой системы управления дорожным движением на регулируемых пересечениях является необходимым этапом для построения достоверной математической модели и последующей оптимизации управления дорожным движением. При организации безостановочного проезда особую роль играют как внешние условия (например, погодные условия), так и внутренние характеристики транспортного потока и пересечений.

В данном исследовании был проведен системный анализ параметров, влияющих на характер движения автотранспортных средств в зоне регулируемых пересечений. Особое внимание уделяется категориальному составу транспортного потока, влиянию погодных условий, а также временным характеристикам разъезда очереди внегрупповых транспортных средств. Эти данные являются исходными при формализации ограничений и построении расчетных сценариев в имитационных и аналитических моделях.

Были рассмотрены следующие аспекты: временные параметры разъезда очереди, пропускная способность пересечения – в зависимости от длины очереди, состава транспортного потока по категориям транспортных средств, состояния дорожного покрытия (погодные условия, качество дорожного покрытия).

Формализованное представление этих факторов необходимо для дальнейшего проведения корректных имитационных и аналитических расчётов. Учет реальных условий позволяет повысить адекватность модели и точность прогнозирования эффективности безостановочного проезда.

Временные параметры разъезда очереди

На время разъезда очереди внегрупповых автотранспортных средств, ожидающих разрешающий сигнал светофора, значительное влияние оказывает динамика ускорения первого АТС в очереди, которая напрямую зависит от состояния дорожного покрытия (рисунок 2.16).

Ускорение первого автотранспортного средства – ключевой параметр, определяющий динамику разъезда всей очереди. Состояние дорожного покрытия оказывает существенное влияние на время разъезда АТС:

- при скользком покрытии (гололед, снежный накат) наблюдается значительное увеличение времени разгона всей очереди из-за пробуксовки и осторожного старта водителей. В таких условиях ускорение первого автотранспортного средства снижается, что приводит к заметному росту общего времени разъезда;

– мокрое покрытие (дождь, лужи, асфальт после дождя) вызывает умеренное увеличение времени разъезда из-за сниженного сцепления шин с дорогой. Особенно заметна разница в динамике между легковыми АТС, которые быстрее адаптируются к условиям, и грузовым автотранспортом, обладающим большей инерционностью.

Кроме состояния покрытия, важную роль играют и другие факторы. Глубокие колеи, особенно на пересечениях с интенсивным движением грузовых АТС, вынуждают водителей снижать скорость, что увеличивает время разъезда на 10–15%. Эта проблема усугубляется в мокрую погоду, когда в колеях застаивается вода, дополнительно ухудшая сцепление. Ямы и выбоины также вносят свой вклад: резкое торможение перед ними нарушает равномерность разгона очереди, а на пересечениях с множественными дефектами покрытия время разъезда может вырасти на 20–25%. Особого внимания заслуживают пересечения с трамвайными путями, где требуется повышенная осторожность при старте. Влияние этого фактора варьируется в зависимости от интенсивности трамвайного движения, но в среднем приводит к увеличению времени разъезда на 15–30%.

На рис. 2.16 показана зависимость времени проезда пересечения от количества внегрупповых автотранспортных средств в очереди для трех различных значений ускорения первого АТС.

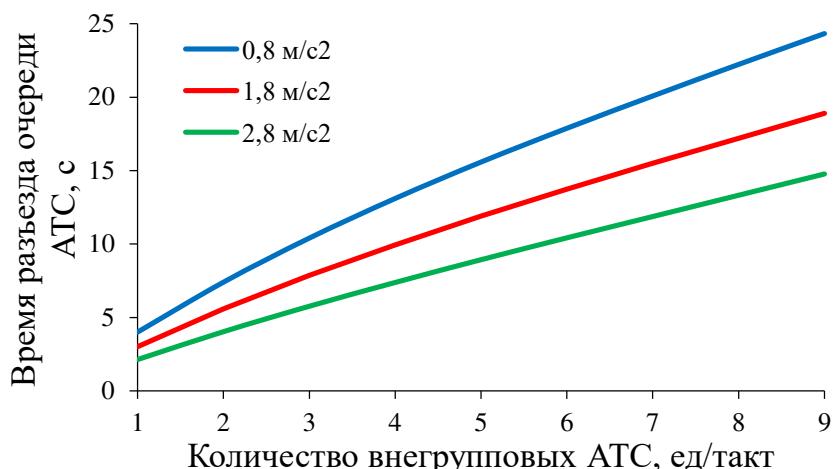


Рисунок 2.16 – Время пересечения стоп-линии каждым АТС из очереди при вариации ускорения первого внегруппового АТС

Увеличение ускорения с $0,8 \text{ м/с}^2$ до $2,8 \text{ м/с}^2$ приводит к существенному сокращению времени разъезда очереди. При максимальном количестве внегрупповых АТС (9 ед.) разница между минимальным и максимальным ускорением составляет до 40%, что подтверждает критическое влияние динамических характеристик автотранспортных средств на пропускную способность пересечения. Состояние дорожного покрытия является критическим фактором, способным увеличивать время разъезда очереди на 30–50% в неблагоприятных условиях. Учет этого параметра необходим для точного прогнозирования задержек и разработки мер по оптимизации транспортных потоков.

Размер очереди автотранспортных средств

В ходе экспериментальных исследований процесса пересечения стоп-линии внегрупповыми автотранспортными средствами на разрешающий сигнал светофора была выявлена статистически значимая зависимость величины ускорения от позиции автотранспортного средства в очереди (рисунок 2.17).

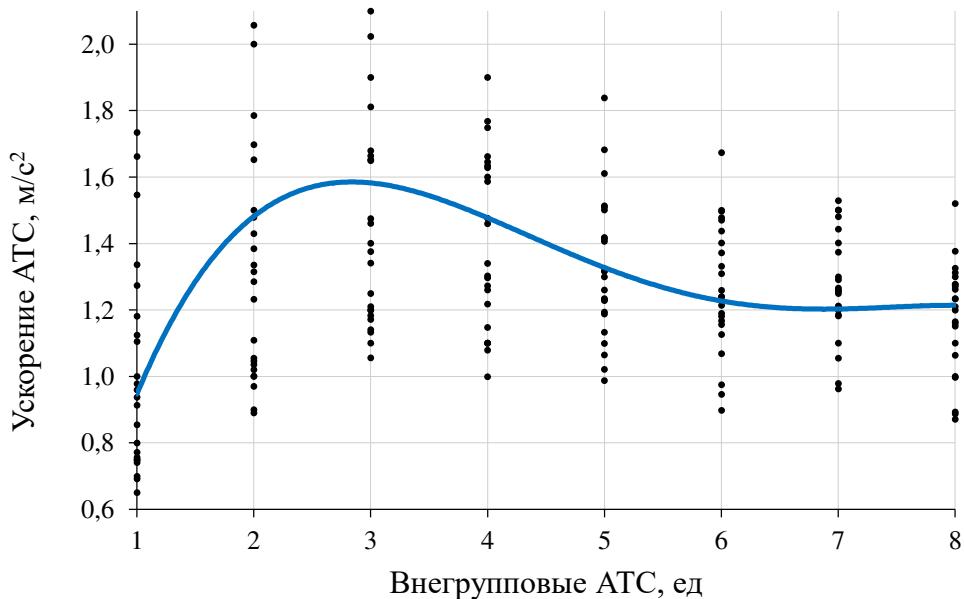


Рисунок 2.17 – Изменение ускорения внегрупповых АТС в зависимости от их позиции при достижении стоп-линии

Графоаналитическая зависимость, представленная на рисунке 2.17, демонстрирует, что максимальные значения ускорения зафиксированы у второго, третьего и четвертого АТС в очереди. Последующие автотранспортные средства пересекали стоп-линию со статистически неразличимыми значениями ускорения.

Полученная закономерность может быть объяснена психофизиологическими особенностями реакции водителей на изменение режима светофорной сигнализации. Первое автотранспортное средство в очереди характеризуется наибольшим временем реакции, обусловленным необходимостью восприятия сигнала и принятия решения о начале движения. Последующие водители имеют возможность предвосхитить реакции, ориентируясь на начало движения впереди стоящего автотранспортного средства, что обеспечивает более динамичный разгон.

Размер очереди автотранспортных средств при ожидании разрешенного сигнала был принят равным 8 ед. (рисунок 2.18).

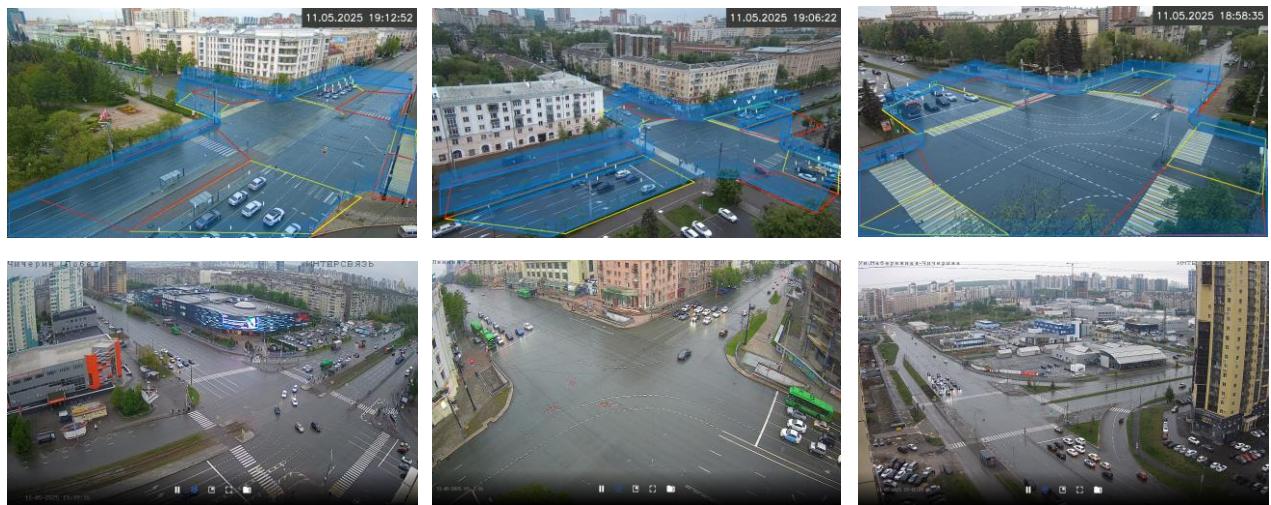


Рисунок 2.18 – Очередь внегрупповых АТС в межпиковое время на пересечениях г. Челябинска

Такое решение обусловлено наблюдением в межпиковое время, так как организация безостановочного проезда возможна только в это время, а также наблюдениями и исследованиями в этой области [45, 46], что после прохождения шестого АТС ускорение транспортного потока стабилизируется и

выравнивается, что обеспечивает равномерный и оптимальный интервал разъезда автотранспортных средств при пересечении стоп-линий. Таким образом, принятие очереди из 8 ед. позволяет учесть динамику ускорений и временные интервалы разъезда АТС.

Длина перегона между пересечениями

Под *перегоном* понимается участок дороги между двумя смежными регулируемыми пересечениями. Его длина определяется расстоянием от стоп-линии одного пересечения до стоп-линии следующего и является критически важным параметром, влияющим на пропускную способность магистралей, безопасность движения и возможность реализации систем координации светофорного регулирования, таких как «зеленая волна».

Эффективная организация безостановочного проезда автотранспортных средств напрямую зависит от характеристик перегонов, поскольку их длина определяет время подхода к следующему пересечению, необходимое для расчета временных интервалов разрешающих сигналов светофоров. Анализ распределения длин перегонов в городской среде (рисунок 2.19) позволяет выявить типовые сценарии движения, оптимизировать режимы работы светофорных объектов и минимизировать задержки АТС.

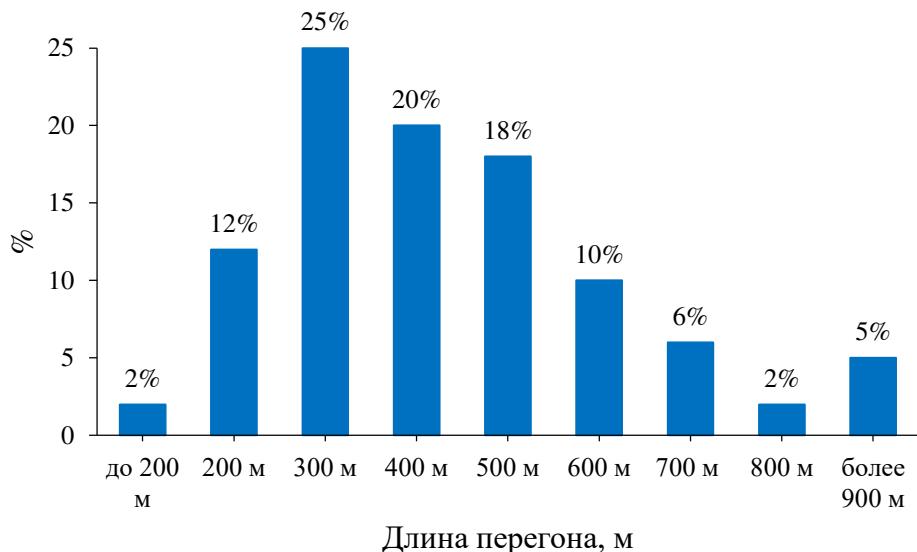


Рисунок 2.19 – Распределение длин перегонов в г. Челябинске

Как показывают данные анализа городской дорожной сети, распределение длин перегонов имеет ярко выраженную асимметрию: 59% всех перегонов имеют длину не более 400 метров, при этом наиболее распространенная длина составляет 300 метров (25% от общего числа). Такая структура сети напрямую влияет на проектирование системы «зеленой волны», поскольку короткие перегоны требуют точной синхронизации светофорных циклов для обеспечения непрерывного движения, в то время как ограниченная длина снижает допустимый диапазон скоростных режимов. Таким образом, успешная реализация координации светофорного регулирования на такой сети возможна только при условии адаптации алгоритмов под доминирующие короткие перегоны и учета их преобладания в общей структуре.

2.4 Расчёт основных факторов, влияющих на интенсивность потока насыщения регулируемых пересечений

Проведенный анализ выявил устойчивую закономерность: наибольшее влияние на величину пропускной способности пересечения оказывает временной показатель, характеризующий процесс освобождения пересечения от внегрупповых автотранспортных средств. На время разъезда очереди оказывают влияние ряд выявленных факторов, (рисунок 2.20).

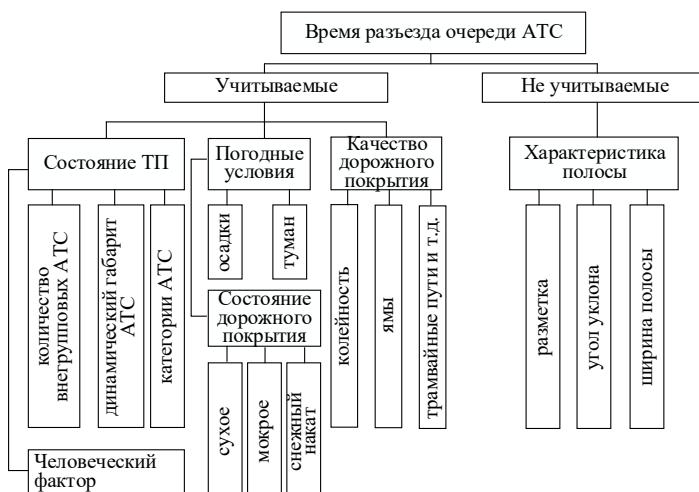


Рисунок 2.20 – Факторы, влияющие на время разъезда очереди

Время разъезда очереди внегрупповых АТС (t_{ro}) рассчитывается по формуле [30]:

$$t_{ro} = \sqrt{\frac{2 \cdot (1,5 + D_i \cdot (n_i - 1))}{a_i}} \quad (2.4)$$

где D_i – динамический габарит i -го АТС, м; n_i – количество внегрупповых АТС в очереди, ед.; a_i – ускорение i -го АТС, м/с².

Формула описывает время, необходимое для разъезда очереди, исходя из динамики разгона, которая основана на уравнении равноускоренного движения:

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot S}{a}} \quad (2.5)$$

где t – время, с; S – расстояние, м; a – ускорение, м/с².

Исходная формула основана на предположении о синхронном старте всех автотранспортных средств с одинаковым ускорением a_i . Однако в реальных условиях необходимо учитывать два критических фактора: временную задержку между стартами АТС, обусловленную реакцией водителей; различие динамических характеристик автотранспортных средств разного типа.

Эти ограничения делают формулу пригодной лишь для теоретических оценок «идеального» времени разъезда. Для практического применения в транспортном моделировании требуется учет времени реакции водителей на разрешающий сигнал, введение поправочных коэффициентов для разных типов ТС и состояния дорожного покрытия, а так же добавление времени ожидания, связанного с задержкой движения после включения разрешающего сигнала светофора.

Изменение текущего состояния дорожного покрытия (например, при дожде, снеге, гололёде) и наличие в очереди грузовых АТС и автобусов существенно влияет на время разъезда очереди внегрупповых автотранспортных средств. Чтобы учесть эти значимые факторы в данном исследовании были введены следующие коэффициенты:

– коэффициент динамики разъезда очереди, учитывающий состояние покрытия дорожного покрытия (k_{dr});

– коэффициент учитывающий категорию наиболее инерционного в очереди автотранспортного средства (k_{kts}).

Чтобы определить заявленные коэффициенты, был проведен анализ статистических данных полученных с 22-х полос 11-ти пересечений.

Набор исходных переменных из видеопотока, используемых в исследовании, а также вычисляемые переменные представлены в таблицах 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4 – Обозначение исходных переменных, используемых в исследовании

№	Переменная	Единица измерения
1	L_1 - расстояние от стоп-линии до площади пересечения	м
2	S_{int} - ширина пересекаемого пересечения	м
3	V_{sr} - средняя скорость выезда легкового АТС с пересечения	км/ч
4	a_i – среднее стартовое ускорение первого внегруппового АТС	м/с ²

Таблица 2.5 – Исходные данные используемые в исследовании

№ п/п	ID полосы	L_1 , м	L_{pr} , м	V_{sr} , км/ч	a_i , м/с ²
1	Kir_Kal_N	24	40	55	2,11
2	Kir_Kal_S	14	35	48	2,48
3	Gag_Rust_NE	17	31	44	0,80
4	Gag_Rust_S	18	30	44	1,16
5	Koms_Vor_E	20	33	50	1,45
6	Koms_Vor_W	17	30	47	1,31
7	Koms_Svred_E	24	54	59	2,34
8	Len_Eng_W	23	50	57	2,31
9	Len_Eng_E	20	48	57	2,50
10	Len_Svob_W	27	42	60	2,80
11	Len_Svob_E	25	51	62	2,70

№ п/п	ID полосы	L_1 , м	L_{pr} , м	V_{sr} , км/ч	a_i , м/с ²
12	Pob_Kraszn_W	19,5	33	54	0,98
13	Pob_Kraszn_E	20	34	52	0,82
14	Mol_Pob_N	40	75	23	0,94
15	Chich_Pob_NW	33,5	80	22	1,35
16	Chop_Khokhr_N	24	43	54	2,60
17	Chop_Khokhr_S	25	41	46	1,80
18	Saltzm_1Elton_NE	15	33	39	1,91
19	Saltzm_1Elton_SW	16	34	46	2,13
20	Saltzm_1Elton_SE	21	40	48	2,05
21	Saltzm_1Elton_NW	16	35	47	2,47
22	Truda_NW	40	50	35	0,80

Анализ данных, представленных в таблице 2.5, свидетельствует о наличии существенных различий в параметрах отдельных полос движения, которые оказывают непосредственное влияние на их пропускную способность. Индивидуальные особенности полос требуют дифференцированного подхода при повышении эффективности ОДД.

Статистическая обработка исходных данных

Необходимо оценить степень подобия характера движения транспортных потоков по полосам, выбранным для анализа. Для этого наилучшим методом выступает кластерный анализ, реализованный в профессиональном статистическом пакете Statistical Package for the Social Sciences (SPSS).

Единый тип анализируемых групп движения определяется мерой близости или разности значений их характеризующих параметров по квадрату нормированного евклидова расстояния. Для определения расстояния между кластерами мы выбрали метод Уорда как наиболее корректный подход к формированию «сферических» кластеров.

Процедура кластеризации представляет собой представление последовательной комбинации исходных объектов в однотипные группы –

древовидную диаграмму, указывающую расстояние агломерации как меру устойчивости кластеризации.

На дендрограмме (рисунок 2.21) хорошо видно, что нижняя группа трёх полос движения (14, 15, 22), сильно отличается от основного массива данных. Это обусловлено наличием на них пересекаемых автотранспортом трамвайных путей, что приводит к существенному отличию характера движения, в частности – замедлению проезда площади пересечения.

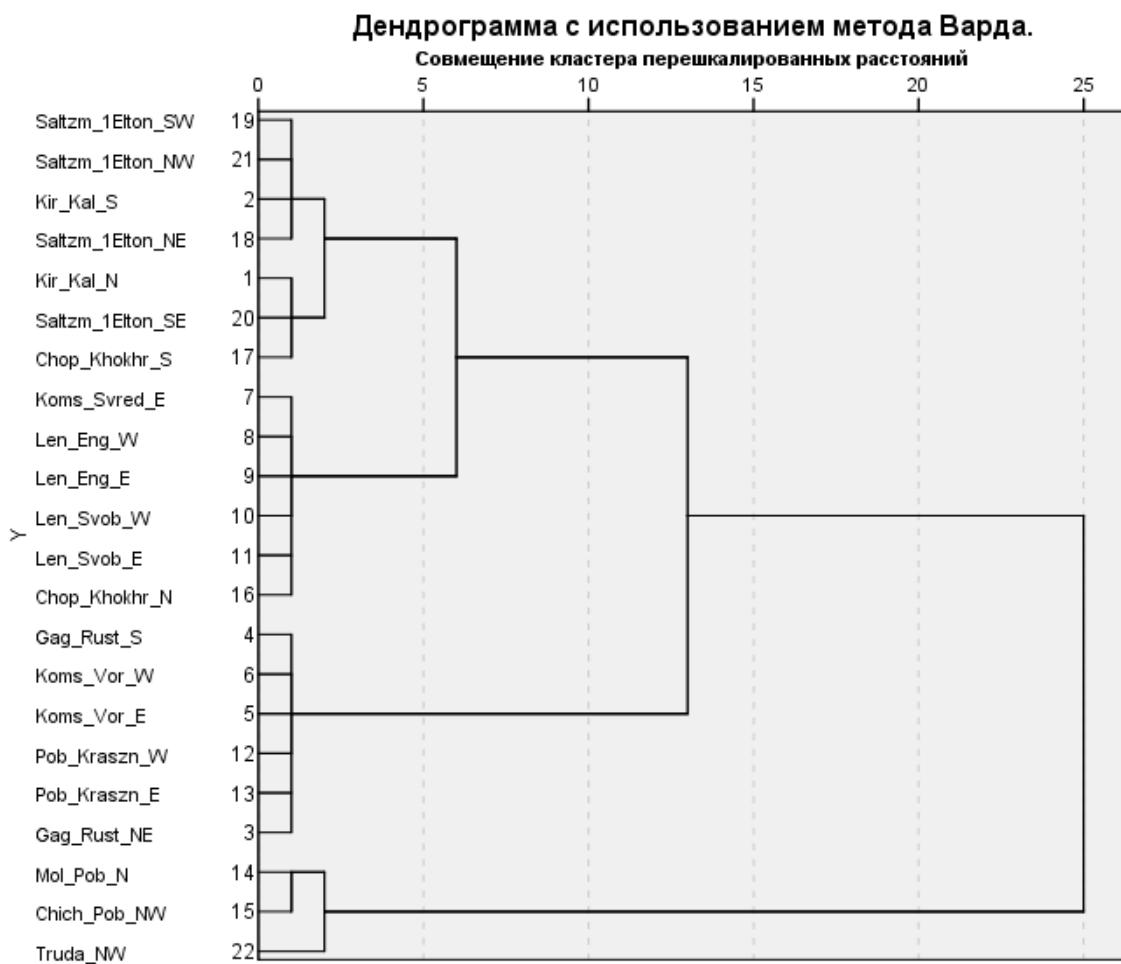


Рисунок 2.21 – Древовидная диаграмма подобия анализируемых пересечений

Дополнительный анализ средних значений исходных параметров как в 4-х, так и в 3-х и 2-х кластерах показал статистически значимое отличие этого кластера от остальных на уровне 0,0% (при общепринятом пороге – не более 5%). Это обусловлено существенным отличием средних значений всех параметров для 4-го кластера (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Средние значения параметров в 4-х кластерах

Ward Method		L_1	S_{int}	V_{srv}	a_i
1 кластер	Среднее	18,7143	36,8571	47,1000	2,1129
	N	7	7	7	7
2 кластер	Среднее	18,5833	31,8333	48,3617	1,0850
	N	6	6	6	6
3 кластер	Среднее	23,8333	48,0000	58,1233	2,5717
	N	6	6	6	6
4 кластер	Среднее	37,8333	68,3333	28,1133	1,0300
	N	3	3	3	3
Всего	Среднее	22,6818	42,8182	47,8614	1,8100
	N	22	22	22	22
	Стандартное отклонение	7,22520	13,44348	10,13261	0,69310

Такие пересечения, имеющие помеху естественному движению АТС, в данном исследовании исключены из анализа общих закономерностей, так как требуют рассмотрения других специфических подходов исследования.

Остальные 19 полос движения также были подвержены процедуре кластеризации, результаты которой отражены на рисунке 2.22.

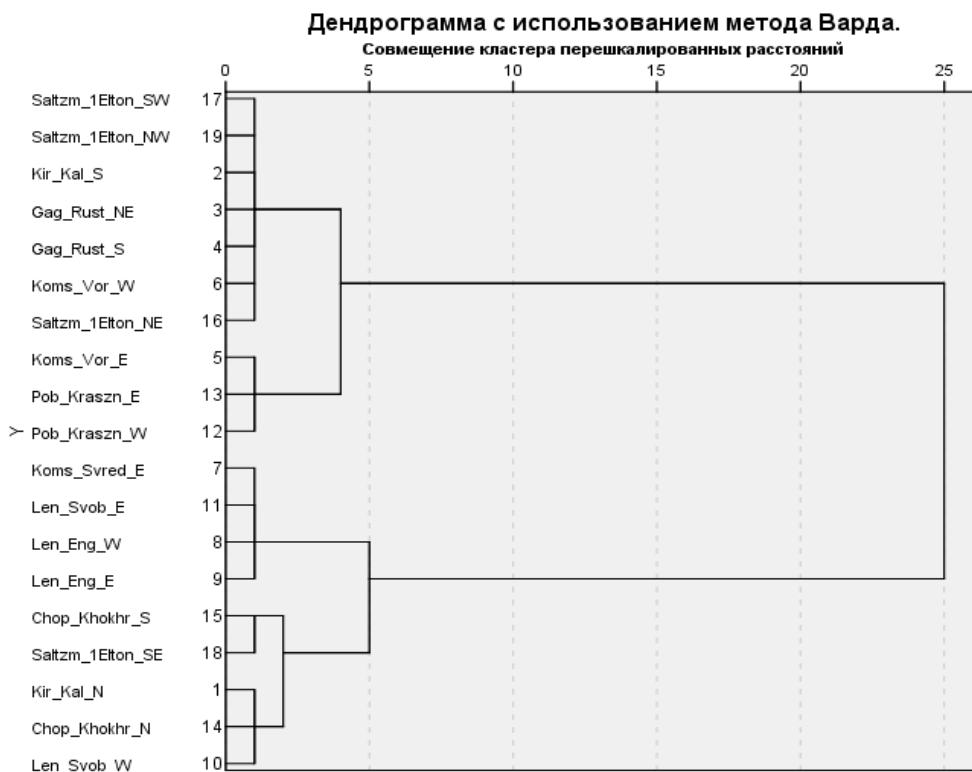


Рисунок 2.22 – Древовидная диаграмма подобия пересечений без трамвайных путей

Как следует из рисунка 2.22, явно выражены два кластера подобия пересечений, усреднённые параметры в которых отражены в таблице 3, а статистическая значимость различий каждого из параметров для этих двух кластеров представлена в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Усреднённые параметры для двух кластеров

Ward Method		L_1	S_{int}	V_{srv}	a_i
1 кластер	Среднее	23,8571	46,8571	57,6414	1,8157
	N	7	7	7	7
	Стандартное отклонение	2,11570	5,24177	2,74364	0,11530
2 кластер	Среднее	18,2083	34,0833	47,0933	1,6558
	N	12	12	12	12
	Стандартное отклонение	3,05598	3,44986	3,97639	0,27533

Как следует из расчётов, два кластера пересечений различны по их геометрическим параметрам. А также, соответственно и по средней скорости выезда АТС с пересечения. Но ускорения различаются несущественно, что предварительно предполагает одинаковый характер их движения на всех анализируемых пересечениях. Эти предположения нуждаются в статистической проверке, результаты которой отражены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Статистическая значимость различий исходных параметров для двух кластеров пересечений

		Сумма квадратов	ст.св.	Средний квадрат	F	Значимость
L_1	Междугруппами (Совместно)	141,072	1	141,072	18,507	0,000
S_{int}	Междугруппами (Совместно)	721,384	1	721,384	41,463	0,000
V_{srv}	Междугруппами (Совместно)	491,897	1	491,897	38,167	0,000
a_i	Междугруппами (Совместно)	0,113	1	0,113	2,103	0,165

Анализ различий проведён с помощью параметрического метода «дисперсионный анализ» для средних значений выборок. Как и предполагалось, два кластера пересечений значимо различаются между собой по геометрии, а также по скорости выезда АТС с пересечений. Но ускорения

разгона АТС остаются в пределах доверительного интервала, о чём говорит их незначимое различие между собой (значимость в 16,5% превосходит статистически допустимый порог в 5%). Следовательно, характер движения АТС, определяемый их ускоренным движением после полной остановки перед запрещающим сигналом светофора, остаётся одинаков для всех анализируемых пересечений.

Диапазон ускорений имеет значения: $0,80 - 2,80 \text{ м/с}^2$; среднее значение составляет $1,8 \text{ м/с}^2$. Эти значения берутся за основу при дальнейших модельных исследованиях.

Определение «типовой» полосы движения автотранспортных средств

Модельные эксперименты влияния параметров на рекомендуемую скорость проезда перегона между пересечениями проведём для «типовой» полосы движения АТС, которая была определена по методу средних значений. Этот метод основан на сборе данных с нескольких реальных полос (22 полосы) и вычислении средних значений ключевых параметров.

Базовые (средние) значения «типовой» полосы движения АТС:

- средняя скорость ТС на перегоне 50 км/ч;
- длина перегона до следующего пересечения 500 м;
- время сдвига разрешающего сигнала светофора 26 с;
- количество внегрупповых АТС 8 ед.

2.4.1 Алгоритм расчёта коэффициента динамики разъезда очереди внегрупповых автотранспортных средств

Коэффициент динамики разъезда (k_{dr}) определяется как отношение ускорения АТС в заданных условиях к ускорению в базовых условиях. Методика расчёта коэффициента динамики включает следующие этапы:

1. Определение базового ускорения $a_i^{\text{условие}}$:

– исследуется движение АТС в нормальных условиях (сухое покрытие, температура выше 0°C);

- производятся замеры стартового ускорения первого АТС в очереди;
- вычисляется среднее значение ускорения и принимается за базовое.

2. Определение ускорения $a_i^{\text{норма}}$ в различных метеоусловиях:

- проводятся аналогичные замеры при мокром и снежном накате;
- вычисляются средние значения ускорений.

3. Расчёт коэффициента k_{dr}

По формуле 2.6 определяются значения коэффициента:

$$k_{dr} = \frac{a_i^{\text{условие}}}{a_i^{\text{норма}}} \quad (2.6)$$

Дадим оценку диапазонов вариации k_{dr} – по исходному массиву данных – таблице диапазона ускорений (таблица 2.9).

Таблица 2.9 – Диапазоны стартовых ускорений внегрупповых АТС

	Состояние покрытия		
	нормальное	мокрое	снежный накат
$a_i, \text{ м/с}^2$	2,80 - 0,80	2,5 - 0,7	1,5 - 0,5

Для «типовой» полосы $a_i = 1,8 \text{ м/с}^2$. Принимаем его как базу, т.е. для этого значения принимаем $k_{dr} = 1$. Тогда имеем следующий диапазон для k_{dr} (таблица 2.10).

Таблица 2.10 – Диапазон k_{dr}

	Состояние покрытия		
	нормальное	мокрое	снежный накат
$a_i, \text{ м/с}^2$	2,80 - 0,80	2,5 - 0,7	1,5 - 0,5
k_{dr}	1,556 – 0,444	1,389 – 0,389	0,833 – 0,277

Методика определения коэффициента динамики основана на анализе изменений ускорения АТС при различных состояниях дорожного покрытия. Коэффициент позволяет учитывать состояние дорожного покрытия при

моделировании движения и принятии решений по регулированию транспортных потоков (рисунок 2.23).

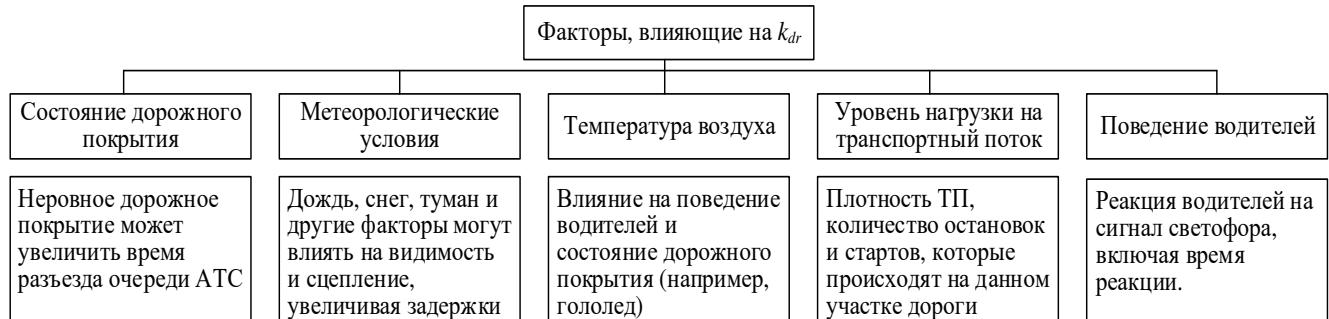


Рисунок 2.23 – Факторы, влияющие на k_{dr} .

2.4.2 Алгоритм расчёта коэффициента, учитывающего категорию АТС

Коэффициент, учитывающий категорию автотранспортного средства (k_{kts}), определяется как отношение ускорения АТС данной категории к базовому ускорению.

При расчёте времени разъезда очереди внегрупповых АТС, ожидающих включения разрешающего сигнала светофора, необходимо учитывать различия в динамических характеристиках АТС. В первую очередь, это связано с разной интенсивностью разгона легковых и тяжёлых АТС (автобусов, грузовых АТС), что влияет на общую пропускную способность пересечения.

Методика определения коэффициента категории АТС k_{kts}

1. Обоснование необходимости коэффициента. Для точного расчета времени разъезда очереди АТС необходимо учитывать:

- различие динамических характеристик АТС разных категорий;
- влияние состояния дорожного покрытия на параметры движения;
- взаимное влияние АТС в очереди.

2. Исходные данные. Используются исходные данные ускорений для разных категорий АТС в трех состояниях дорожного покрытия (таблица 2.11).

Таблица 2.11 – Диапазоны стартовых ускорений АТС различных категорий

$a_i, \text{м/с}^2$	Состояние покрытия		
	нормальное	мокрое	снежный накат
1 категория	2,80 – 0,80	2,5 – 0,7	1,5 – 0,5
2 категория	1,78 – 0,47	1,5 – 0,4	1,0 – 0,3

3. Алгоритм расчета коэффициента k_{kts} .

Этап 1. Определение коэффициентов уменьшения ускорения АТС. Для каждой градации метеоусловий рассчитывается:

1). Коэффициент для верхних значений диапазона:

$$k_{\text{aepx}} = \frac{a_{\text{aepx}(1)}}{a_{\text{aepx}(2-3)}} \quad (2.7)$$

2) Коэффициент для нижних значений диапазона:

$$k_{\text{aepx}} = \frac{a_{\text{hiw}(1)}}{a_{\text{hiw}(2-3)}} \quad (2.8)$$

3) Среднее значение коэффициента для данной градации

Этап 2. Расчет средних коэффициентов по метеоусловиям

1). Для нормальных условий: $k_{\text{aepx}} = 1,573$; $k_{\text{hiw}} = 1,702$; Среднее= 1,638.

2). Для мокрого покрытия: $k_{\text{aepx}} = 1,667$; $k_{\text{hiw}} = 1,75$; Среднее= 1,709.

3). Для снежного наката: $k_{\text{aepx}} = 1,5$; $k_{\text{hiw}} = 1,667$; Среднее= 1,584.

Этап 3. Определение итогового значения k_{kts} .

На основании расчетов принимаем усредненное значение коэффициента:

$k_{kts} = 1,64$ (среднее по всем метеоусловиям).

4. Применение коэффициента. Коэффициент $k_{kts} = 1,64$ применяется в случаях:

- при появлении в очереди (составной из АТС категорий 1) хотя бы одного ТС категории II;
- для корректировки расчетного времени разъезда очереди;
- в сочетании с соответствующим изменением значения ускорения a_i .

5. Особенности методики:

1) Учет инерционности АТС:

- коэффициент отражает снижение динамических характеристик тяжелых автотранспортных средств;
- одновременно корректируется как k_{kts} так и a_i .

2) Универсальность:

- принятное значение $k_{kts} = 1,64$ справедливо для всех состояний дорожного покрытия;
- позволяет упростить расчеты без существенной потери точности.

Данная методика позволяет количественно оценить влияние состава очереди АТС на время разъезда, учитывая, как категорию АТС, так и условия движения.

2.5 Методика расчета времени безостановочного проезда регулируемого пересечения группой автотранспортных средств

Под *групповыми автотранспортными средствами* понимается организованная совокупность АТС, формирующуюся на регулируемом пересечении и движущуюся в одном направлении единым потоком. Критерием принадлежности к группе является движение с минимальными дистанционными интервалами, характерными для режима насыщения на светофорном объекте (временной интервал 1,5 – 2,5 с, что при городских скоростях соответствует дистанции примерно 20 – 40 м). Группа АТС играет важную роль в ОДД, так как от её характеристик (количество АТС, скорость, дистанция между ними) зависит общая эффективность ТП, а также безопасность на дорогах. Управление такими группами может включать меры, направленные на оптимизацию светофорного регулирования и других систем контроля движения, чтобы повысить пропускную способность пересечений и

минимизировать задержки. Для обеспечения безостановочного проезда группы АТС можно рассмотреть несколько стратегий и методов (таблица 2.12).

Таблица 2.12 – Стратегии обеспечения безостановочного проезда группы автотранспортных средств

Стратегия	Описание	Технологии/Методы	Эффект
Система приоритетного светофорного регулирования	Настройка светофоров для приоритетного пропуска группы	Датчики движения, камеры, алгоритмы адаптивного управления	Снижение времени ожидания на пересечениях
Информирование водителей	Предоставление данных о светофорах и дорожной обстановке	Табло переменной информации, мобильные приложения	Оптимизация скорости, поддержание потока
Умные светофоры	Автоматическая регулировка сигналов в зависимости от потока	Адаптивные светофоры, ИИ-анализ трафика	Уменьшение заторов, плавное движение
Оптимизация дорожной инфраструктуры	Проектирование пересечений для плавного проезда	Удлиненные полосы разгона/торможения, кольцевые развязки	Снижение резких остановок
Координированный контроль скорости	Поддержание оптимального скоростного режима для безостановочного движения	<ul style="list-style-type: none"> – Динамические знаки с рекомендуемой скоростью («зеленая волна»), – Адаптивные системы ограничения скорости, – Камеры с алгоритмами анализа потока 	<ul style="list-style-type: none"> - Снижение резких торможений - Увеличение пропускной способности - Снижение расхода топлива
Координация на городском уровне	Единая система управления транспортом	Центры мониторинга, взаимодействие служб	Синхронизация стратегий
Технологии V2I (Vehicle-to-Infrastructure)	Обмен данными между АТС и инфраструктурой	Датчики, 5G, облачные платформы	Упреждающая адаптация к изменениям

Основная проблема современного дорожного движения заключается в том, что, когда группа АТС вынуждена останавливаться из-за не успевших покинуть пересечение внегрупповых АТС, это создает цепную реакцию негативных последствий для всего ТП.

Ключевые риски таких остановок включают:

- повышенную аварийность - резкие торможения увеличивают вероятность столкновений, особенно типа «сзади»;
- снижение пропускной способности - каждая остановка нарушает ритм движения, создавая волновой эффект заторов;
- ухудшение экологии - частые циклы "разгон-торможение" повышают выбросы вредных веществ;
- психологический дискомфорт водителей - приводит к агрессивному поведению на дороге.

Каскадная реакция остановок начинается, когда одна группа АТС, движущаяся по дороге, внезапно останавливается. Это может произойти по различным причинам, включая необходимость пропустить пешеходов, отсутствие места для выезда на пересечение или очередь на светофоре. Указанные факторы оказывают комплексное влияние на безопасность дорожного движения:

1. Снижение времени реакции. Когда АТС в группе внезапно останавливаются, водители, находящиеся позади, могут не успеть среагировать. Если расстояние до переднего АТС меньше безопасного, это приводит к сокращению времени реакции. Водитель может не заметить, что впереди происходит остановка, и в итоге станет причиной столкновения.

2. «Колебания потока». Этот термин обозначает явление, когда при остановке или замедлении одного из АТС возникают затруднения, передающиеся на последующие АТС, что приводит к образованию волнообразных изменений в скорости и плотности потока. Эти колебания могут вызвать дополнительное замедление и остановки в транспортном потоке, что значительно снижает общую пропускную способность дороги и увеличивает риск ДТП.

3. Нарушение порядка движения. Когда АТС останавливаются, и начинается каскад остановок, другие водители могут захотеть обойти этот затор, что создает дополнительные риски. Водители могут принимать

импульсивные решения о перестроении направо или налево, чтобы попытаться обойти ТП, что может закончиться потенциальными столкновениями.

4. Опасность для мотоциклистов и велосипедистов. Череда остановок, особенно в условиях плотного движения, может стать особенно опасной для мотоциклистов и велосипедистов. Поскольку они могут двигаться быстрее, чем АТС, и могут оказаться в ситуации, где не успевают среагировать на замедление или остановку АТС, что может привести к серьезным авариям.

5. Психологические и эмоциональные последствия. Частые остановки и старты могут вызывать стресс у водителей, что в свою очередь провоцирует агрессивное поведение и увеличение риска аварий. Водители, испытывающие разочарование из-за задержек, могут начать принимать более рискованные решения, такие как резкое ускорение или обгон.

Таким образом, череда остановок, вызванная необходимостью остановки группы АТС, может создать сложные проблемы для дорожной безопасности. Предотвращение каскадной реакции остановок требует внедрения систем, которые обеспечивают плавность дорожного движения и минимизируют внезапные остановки.

Существует возможность оптимизировать организацию дорожного движения: если водители будут заранее информированы, с какой скоростью надо двигаться, чтобы проехать пересечение без остановки, то можно будет задать оптимальную модель их движения. Согласно социологическим опросам, 41% водителей, выезжая с пересечения, стремятся достичь максимальной скорости, хотя в итоге им все равно придется остановиться на следующем светофоре. Резкие ускорения и торможения в городских условиях крайне нежелательны, поскольку повышают риск ДТП, особенно в плохую погоду (что подтверждается макроскопической моделью Танака), создают «phantomные заторы» из-за цепной реакции торможений (микроскопическая

модель следования за лидером), приводят к перерасходу топлива, ускоренному износу АТС и росту затрат на обслуживание.

В связи с данными проблемами, рекомендуется предупреждать водителей об оптимальном режиме движения до следующего пересечения. При этом сообщать информацию об оптимальной скорости движения можно с помощью навигационных программ, которыми сейчас пользуются 95% водителей.

Определим выделенные категории как *A*, *B*, *C* и *D* и проведем их детальный анализ, представив на едином графике (рисунок 2.24) динамику для каждого случая:

A – движение на слишком большой скорости опасно чрезмерным ускорением и торможением, а также оно приведет к раннему приезду на пересечение до завершения фазы красного сигнала светофора и простою на светофоре;

B – в этом случае автотранспортное средство вынуждено прекратить движение по достижении светофора и в тот же момент продолжить его с ускорением, что приведет к перерасходу топлива, увеличенной вероятности износа деталей;

C – автотранспортное средство проезжает пересечение без изменения набранной скорости движения;

D – недостаточная скорость автотранспортных средств приведет к замедлению транспортного потока, следующего за ним.

Очевидно, что среди предложенных вариантов наиболее предпочтительным является случай *C*. В дальнейшем требуется с помощью математической модели определить оптимальную скорость движения и довести эту информацию до водителя посредством динамических знаков и навигационных систем.

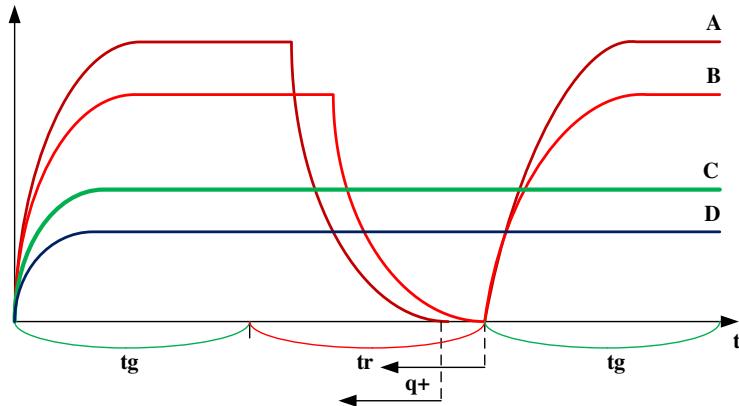


Рисунок 2.24 – Варианты движения группы АТС

Безостановочный проезд группы автотранспортных средств на следующем пересечении предоставляет множество преимуществ, как для участвующих автотранспортных средств, так и для системы дорожного движения в целом:

1. Увеличение пропускной способности. Безостановочный проезд позволяет большему количеству автотранспортных средств эффективно и быстро проезжать пересечение, что увеличивает общую пропускную способность дорожной сети.
2. Снижение времени в пути. Автотранспортные средства, следящие за лидером, уменьшают задержки, связанные с ожиданием светофоров. Это способствует общему снижению времени в пути для водителей и пассажиров.
3. Снижение заторов. Безостановочное движение помогает избежать образования заторов на подходах к пересечению, особенно в часы пик. Это улучшает общую ситуацию с дорожным трафиком.
4. Улучшение безопасности. Снижение частоты остановок и стартов уменьшает риск дорожно-транспортных происшествий, связанных с резкими маневрами. Это также позволяет водителям лучше контролировать ситуацию на дороге.
5. Сокращение выбросов и экономия топлива. Плавное движение без частых остановок сокращает расход топлива и выбросы автотранспортных

средств, что положительно сказывается на экологии и уменьшает уровень загрязнения воздуха.

6. Лучшее восприятие пассажирами. Пассажиры, находящиеся в автотранспортных средствах, ощущают более комфортные условия поездки, избегая резких остановок и ускорений.

7. Оптимизация управления ТП. Управление движением может стать более эффективным, так как заранее прогнозируемые группы автотранспортных средств могут быть обрабатываемы с учетом их скорости и движения.

8. Повышение уровня удовлетворенности водителей. Снижение задержек и повышение комфортности проезда положительно сказываются на общем опыте водителя, что может отразиться на поведении на дороге и соблюдении правил.

Успешное внедрение систем, обеспечивающих безостановочный проезд, требует комплексного подхода к проектированию и организации дорожного движения, но принесенные ими преимущества могут значительно улучшить общую инфраструктуру и безопасность.

Чтобы обеспечить непрерывное движение группы автотранспортных средств при приближении к следующему пересечению, рекомендуется заранее регулировать скорость до определенного уровня. Этот уровень, учитывающий среднюю скорость потока на участке между пересечениями, должен быть отображен на динамическом дорожном знаке «6.2» как рекомендуемая скорость (рисунок 2.25) [76, 77].

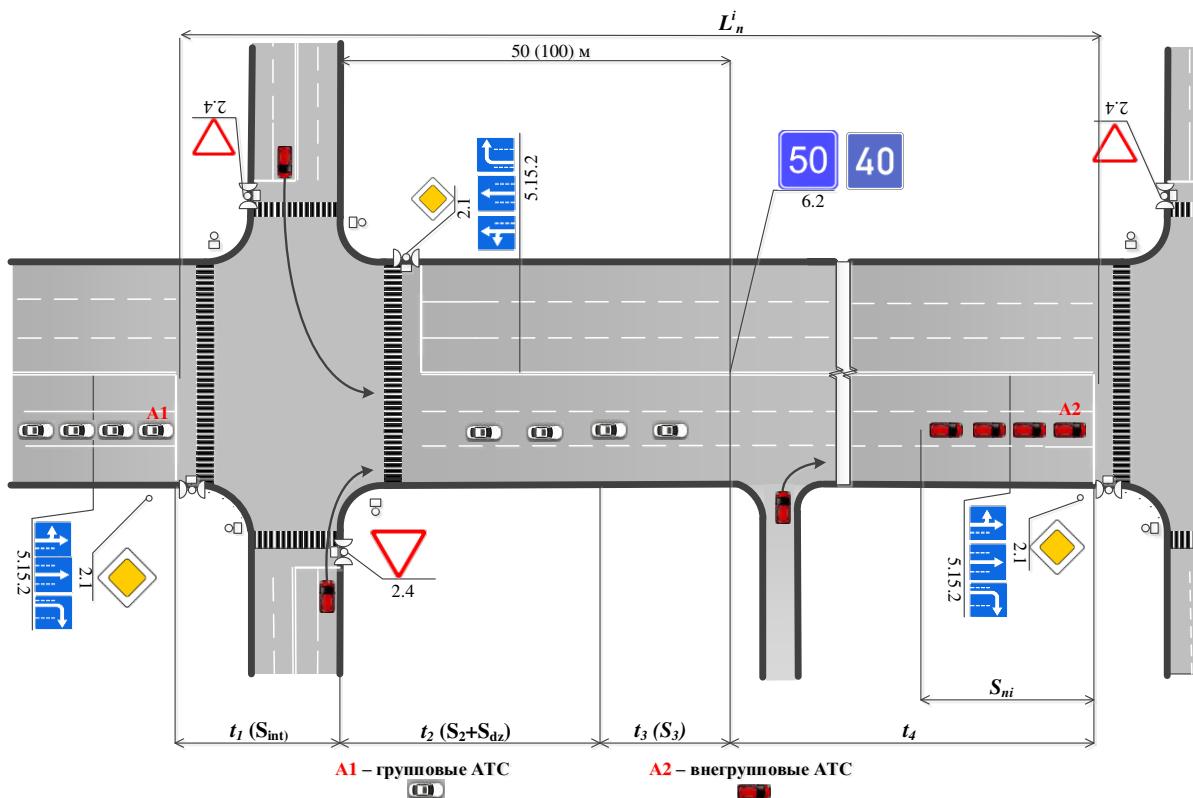


Рисунок 2.25 – Схема движения АТС между последовательными пресечениями и расположения динамических знаков

В этом случае, если перед пересечением наблюдаются внегрупповые АТС, временной интервал $t(n_i)$ движения автотранспортных средств от стоп-линии предыдущего пересечения до достижения следующего пересечения определяется с учетом ряда факторов:

- преодоление условным групповым АТС (A1) участка разгона до достижения средней скорости потока на маршруте между пересечениями;
- проезд участка с данной средней скоростью потока между пересечениями;
- уменьшение скорости до величины, рекомендованной динамическим знаком «6.2», которая обеспечивает безостановочный проезд через пересечение;
- длина участка пути, на котором необходимо скорректировать скорость в зависимости от скорости, которая набирается последним внегрупповым АТС в очереди на данной полосе (A2), начавшим движение на разрешающий сигнал светофора;

– времени, необходимого последнему внегрупповому АТС для разгона и пересечения стоп-линии.

Это время можно представить в виде формулы:

$$t(n_i) = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (2.9)$$

где t_1 – время, затраченное лидирующим АТС (A1), который был первым в очереди, начиная с момента включения разрешающего сигнала светофора на пересечении, предшествующем исследуемому участку УДС, и заканчивая его достижением дальней границы пересекаемой проезжей части, с; t_2 – время, затраченное АТС A1 после того, как он преодолел дальнюю границу пересекаемой проезжей части на пересечении, предшествующем исследуемому участку УДС, до момента, когда он достиг средней скорости ТП на перегоне, с; t_3 – время, затраченное АТС A1 с момента достижения средней скорости ТП на участке к следующему пересечению до начала снижения скорости, установленной динамическим дорожным знаком, с; t_4 – время, затраченное АТС A1 с момента достижения средней скорости ТП на участке к следующему пересечению до начала снижения скорости, установленной динамическим дорожным знаком, с.

Время t_1 в свою очередь зависит от длины пересечения и времени реакции водителя и ускорения АТС A1 [30, 78]:

$$t_1 = h_i^{sl} + \sqrt{\frac{2 \cdot S_{int}}{a_i^{int}}} + \tau_i^r, \quad (2.10)$$

где h_i^{sl} – время на достижение стоп-линии i -го АТС с момента включения разрешающего сигнала светофора, с; S_{int} – длина пересечения (задается для каждого пересечения отдельно), м; a_i^{int} – ускорение i -го АТС при проезде участка пересечения, $\text{м}/\text{с}^2$; τ_i^r – время реакции водителя 1-го АТС (запаздывание старта первого АТС), с.

После того, как первое стартовавшее на зеленый свет светофора АТС (A1) покинуло дальнюю границу пересекаемой проезжей части, оно как правило должно достигнуть скорости, максимально разрешенной на данном участке

улично-дорожной сети. Как правило, эта скорость составляет 60 км/ч согласно ПДД [77].

Тогда время t_2 будет зависеть от скорости, на которой АТС $A1$ покинуло дальнюю границу пересекаемой проезжей части и рассчитывается по формуле 2.11 [30, 78]:

$$t_2 = \frac{v_i^m - v_i^{int}}{a_i}, \quad (2.11)$$

где v_i^m – максимально разрешенная скорость i -го АТС на перегоне между пересечениями, м/с; v_i^{int} – скорость i -го АТС, достигнутая на дальней границе пересекаемой проезжей части, м/с; a_i – ускорение i -го АТС за пределами конкретного узла УДС до момента достижения максимально разрешенной скорости потока АТС на отрезке пути между узлами УДС, м/с².

Время t_3 рассчитывается по формуле 2.12 [30, 78]:

$$t_3 = \frac{S_3}{v_i^m}, \quad (2.12)$$

где S_3 – расстояние до динамического знака с точки, в которой i -ое АТС достигло v_i^m , в связи с приближением к внегрупповому АТС ($A2$) (м) и определяется по формуле 2.13 [30, 78]:

$$S_3 = L_i^n - S_2 + S_{dz}, \quad (2.13)$$

где L_i^n – длина i -го перегона, м; S_2 – отрезок пути, преодолеваемый лидирующим АТС от дальней границы пересекаемой проезжей части на пересечении до места достижения средней скорости потока АТС на перегоне между узлами УДС, м; S_{dz} – участок пути, который лидирующее АТС проезжает начиная с момента снижения скорости от средней на данном отрезке до рекомендованной, установленной динамическим знаком (максимально близкой к скорости, которую должен достичь последний внегрупповой АТС ($A2$), возобновляющий движение на разрешающий сигнал светофора до достижения стоп-линии [30, 78]):

$$S_2 = \frac{(v_i^m)^2 - (v_i^{int})^2}{2 \cdot a_i} \quad (2.14)$$

$$v_i^{int} = \sqrt{2 \cdot S_{int} \cdot a_i^{int}} \quad (2.15)$$

$$S_2 = \frac{(v_i^m)^2 - (\sqrt{S_{int} \cdot a_i^{int}})^2}{2 \cdot a_i} = \frac{(v_i^m)^2 - (2 \cdot S_{int} \cdot a_i^{int})}{2 \cdot a_i} \quad (2.16)$$

Расстояние, необходимое первому из групповых АТС (A1) для снижения скорости до значения, указанного на динамическом дорожном знаке, определяется по формуле 2.17 [30, 78]:

$$S_{dz} = \frac{(v_i^m)^2 - v_{ni}^2}{2 \cdot J_{dz}} \quad (2.17)$$

где v_{ni} – скорость, достигнутая последним АТС, стоящим в очереди (A2) к моменту достижения стоп-линии, м/с, J_{dz} – темп снижения скорости лидирующего АТС при приведении ее к величине, указанной на динамическом дорожном знаке [30, 78]:

$$v_{ni} = \sqrt{2 \cdot S_{ni} \cdot a_{ni}} \quad (2.18)$$

где S_{ni} – расстояние, преодолеваемое АТС (A2) от места, занимаемого им в очереди внегрупповых АТС, до пересечения стоп-линии на пересечении, м, a_{ni} – ускорение, с которым АТС (A2) набирает скорость при приближении к стоп-линии, м/с².

В свою очередь, для снижения скорости в указанных выше пределах АТС (A1) потребуется время [30, 78]:

$$t_{dz} = \frac{v_i^m - v_{ni}}{J_{dz}}. \quad (2.19)$$

Поскольку момент достижения последним стоящим в очереди внегрупповым АТС (A2) практически сопоставим с моментом достижения стоп-линии первым групповым АТС (A1), можно сделать вывод о том, что $t_{dz} = t_{ni}$, где t_{ni} – время разъезда очереди внегрупповых АТС, необходимое для освобождения полосы движения АТС (A1), с момента включения

разрешающего сигнала светофора до достижения стоп-линии и рассчитывается по формуле 2.20:

$$t_{n_i} = \sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}}} + t_i^z, \quad (2.20)$$

где t_i^z – время задержки начала старта движения АТС от начала разрешающего такта, с.

Из системы уравнений следует:

$$\sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}}} + t_i^z = \frac{v_i^m - v_{n_i}}{J_{dz}}, \quad (2.21)$$

$$J_{dz} = \frac{v_i^m - v_{n_i}}{\sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}} + t_i^z}}, \quad (2.22)$$

$$S_{dz} = \frac{(v_i^m)^2 - v_{n_i}^2}{2 \cdot J_{dz}} = \frac{(v_i^m)^2 - v_{n_i}^2}{\frac{v_i^m - v_{n_i}}{\sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}} + t_i^z}}} = \frac{\left((v_i^m)^2 - v_{n_i}^2 \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}}} + t_i^z \right)}{2 \cdot (v_i^m - v_{n_i})} \quad (2.23)$$

Поскольку скорость, рекомендованная динамическим дорожным знаком (V_{cp}^i), равна скорости, достигнутой разгоняющимся АТС (А2), к моменту достижения стоп-линии v_{n_i} , приведенная выше формула приобретает вид:

$$S_{dz} = \frac{\left((v_i^m)^2 - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i}) \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}}} + t_i^z \right)}{2 \cdot (v_i^m - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i}))} \quad (2.24)$$

Тогда:

$$t_3 = \frac{L_i^n - \frac{(v_i^m)^2 - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i})}{a_i} + \frac{(v_i^m)^2 - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i}) \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}}} + t_i^z \right)}{2 \cdot (v_i^m - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i}))}}{v_i^m} \quad (2.25)$$

Продолжительность времени t_4 как времени, затраченного АТС (A1) с момента достижения им скорости, рекомендованной динамическим дорожным знаком «6.2», до момента достижения стоп-линии равно продолжительности времени, необходимого последнему из внегрупповых АТС (A2), находящемуся перед ним, пересечь ту же стоп-линию:

$$t_4 = \sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}}} + t_i^z, \quad (2.26)$$

$$S_{n_i} = 1,5 + D_i \cdot (n_i - 1), \quad (2.27)$$

где D_i – динамический габарит i -го АТС, м; n_i – порядковый номер в очереди i -го АТС, м.

Таким образом t_4 рассчитывается по формуле 2.28:

$$t_4 = \sqrt{\frac{2 \cdot (1,5 + D_i \cdot (n_i - 1))}{a_{n_i}}} + t_i^z, \quad (2.28)$$

Продолжительность времени движения $t(n_i)$ автотранспортных средств от стоп-линии предыдущего пересечения до достижения следующего пересечения определяется по формуле 2.29:

$$\begin{aligned} t(n_i) = & h_i^{sl} + \sqrt{\frac{2 \cdot S_{int}}{a_i^{int}}} + \tau_i^r + \frac{v_i^m - v_i^{int}}{a_i} + \\ & L_i^n \frac{(v_i^m)^2 - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i})}{a_i} + \frac{(v_i^m)^2 - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i}) \cdot \left(\sqrt{\frac{2 \cdot S_{n_i}}{a_{n_i}}} + t_i^z \right)}{2 \cdot (v_i^m - (2 \cdot S_{n_i} \cdot a_{n_i}))} + \\ & + \frac{v_i^m}{\sqrt{\frac{2 \cdot (1,5 + D_i \cdot (n_i - 1))}{a_{n_i}} + t_i^z}} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Данная методика отличается от предыдущих исследований учетом времени задержки начала старта движения внегрупповых АТС от начала разрешающего такта, для более точной оценки динамики движения АТС. Этот фактор влияет на время разъезда очереди внегрупповых АТС, а также на время проезда пересечения группой АТС [30, 78].

2.6 Математическая модель безостановочного проезда регулируемого пересечения группой автотранспортных средств

Для оптимизации потока АТС, пересекающих пересечение во время зеленого сигнала светофора, а также для сокращения времени ожидания, в данном исследовании разработана математическая модель, которая позволяет рассчитать среднюю скорость группы АТС для беспрепятственного проезда регулируемого пересечения. Изменение скорости зависит от времени смещения разрешающего сигнала светофора в рамках координированного управления, а также от числа внегрупповых АТС в очереди, которое определяется на основе анализа видеопотока с использованием обученной нейронной сети. Полученные значения средней скорости помогут планировать скорость движения на участке между пересечениями, увеличивая вероятность получения зеленого сигнала при приближении к регулируемому пересечению. Эта скорость должна быть указана как рекомендуемая на динамическом дорожном знаке «6.2». Математическая модель расчета средней скорости группы АТС, для безостановочного проезда регулируемого пересечения при координированном управлении дорожным движением:

$$V_{cp} = \frac{3,6 \cdot L_i^n}{t_{cd} - \left(h_{cl} + \sqrt{\frac{2 \cdot S_{int}}{a_{int}}} + \tau_r \right) + \sqrt{\frac{2 \cdot (1,5 + D_i \cdot (n_i - 1))}{a_i \cdot k_{dr}} + \frac{(n_i - 1) \cdot t_i^z}{k_{dr}}} \cdot k_{kts}} \quad (2.30)$$

где V_{cp} – средняя скорость группы АТС, км/ч; L_i^n – длина i -го перегона до следующего пересечения, м; t_{cd} – время сдвига разрешающего сигнала светофора, с; h_{cl} – время на достижение стоп-линии лидирующего АТС с момента включения разрешающего сигнала светофора, с; S_{int} – длина анализируемого пересечения, м; a_{int} – ускорение лидирующего АТС при проезде участка пересечения, $\text{м}/\text{с}^2$; τ_r – время реакции водителя лидирующего АТС (запаздывание старта), с; D_i – динамический габарит i -го АТС, м; n_i – количество внегрупповых АТС в очереди, ед; a_i – ускорение i -го АТС, $\text{м}/\text{с}^2$; t_i^z – среднее стартовое время задержки следующего в очереди АТС, которое дает

ему предыдущий, с; k_{dr} – коэффициент динамики разъезда очереди, учитывающий состояние дорожного покрытия; k_{kts} – коэффициент учитывающий категорию наиболее инерционного в очереди АТС.

2.7. Факторный модельный анализ средней скорости групп автотранспортных средств

Для оценки влияния ключевых параметров на выходную величину модели (2.30) – среднюю скорость группы АТС – был проведён факторный анализ. Исследование выполнено на базе «типовой» полосы движения, параметры которой определены методом средних значений. План эксперимента включал два этапа: однофакторный анализ влияния каждого параметра модели в отдельности и многофакторный анализ, учитывающий одновременное варьирование наиболее значимых факторов.

Для проведения анализа необходимо проявить точку отсчёта – «базовую точку V_{0cp} », относительно которой будем вести прогнозные расчёты влияния возмущающих факторов. Это есть рекомендуемая скорость на перегоне между пересечениями для легкового АТС I категории при средних значениях всех параметров модели и «нормального» состояния дорожного покрытия.

Расчёт базовой точки V_{0cp}

Расчёт ведем для потока АТС, состоящего из только легковых АТС. Экспертная оценка значений параметров модели: $L_n = 500$ м; $t_{cd} = 26$ с; $h_{cl} = 2,5$ с; $S_{int} = 50$ м; $a_{int} = 2,47$ м/с²; $\tau_r = 1,5$ с; $D_i = 5,5$ м (для 1 категории); $n_i = 8$; $a_i = 2,8$ м/с²; $t_i^z = 2,1$ с; $k_{kts} = 1$ (очередь состоит только из легковых АТС); $k_{dr} = 1$ (динамика при «нормальном» дорожном покрытии).

$$\begin{aligned}
 V_{0cp} &= \frac{3,6 \cdot 500}{26 - \left(2,5 + \sqrt{\frac{2 \cdot 50}{2,47}} + 1,5 \right) + \sqrt{\frac{2 \cdot (1,5 + 5,5 \cdot (8 - 1))}{2,8 \cdot 1}} + \frac{(8 - 1) \cdot 2,1}{1} \cdot k_{kts}} \\
 &= \frac{1800}{26 - 10,36 + 5,62 + 14,7} = \frac{1800}{35,96} = 50,06 \text{ км/ч}
 \end{aligned}$$

Итак, базовое значение рекомендуемой скорости АТС на «типовой» полосе принимается равной 50 км/ч.

2.7.1 Однофакторный анализ

Нас интересует анализ частного влияния следующих параметров (факторов) на рекомендуемую скорость в следующей постановке:

$$V_{cp} = f(L_n; t_{cd}; n_i; k_{dr}; k_{kts}) \quad (2.31)$$

где: L_n – длина перегона до следующего пересечения, м; t_{cd} – время сдвига разрешающего сигнала, с; n_i – количество внегрупповых АТС в очереди перед следующим пересечением, ед; k_{dr} – коэффициент динамики, учитывающий состояние дорожного покрытия; k_{kts} – коэффициент, учитывающий категорию наиболее инерционного в очереди АТС (отражает структуру очереди АТС на последующем пересечении).

1 фактор. Анализ влияния L_n (длина перегона до следующего пересечения). Прочие факторы считаются соответствующими V_{0cp} . Математическая модель в данной постановке имеет вид:

$$V_{cp} = f(L_n) = L_n \cdot \frac{3,6}{35,96} = 0,1001 \cdot L_n \quad (2.32)$$

При изменении L_n в диапазоне (100м; 1000м), график $V_{cp} = f(L_n)$ показан на рисунке 2.26. Базовая точка соответствует значению $L_n = 500\text{м}$. При этом $V_{0cp} = 50 \text{ км/ч}$.

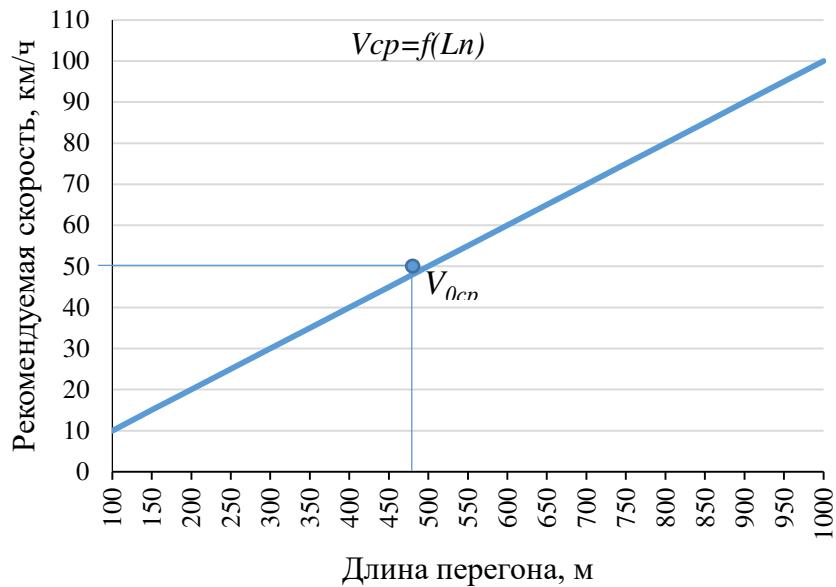


Рисунок 2.26 – Влияние длины перегона на рекомендуемую скорость

Как следует из рисунка 2.26, при увеличении длины перегона от 100 м до 1000 м рекомендуемая скорость линейно возрастает. Фактическое значение 500 м соответствует рекомендации 50 км/ч, при увеличении перегона до 1000 м рекомендация повышается до 60 км/ч, а при уменьшении до 100 м – снижается до 30 км/ч.

2 фактор. Анализ влияния t_{cd} (время сдвига разрешающего сигнала). Прочие факторы считаются соответствующими V_{0cp} . Математическая модель преобразуется к виду:

$$V_{cp} = f(t_{cd}) = \frac{1800}{t_{cd} + 9,96} \quad (2.33)$$

При изменении t_{cd} в диапазоне (0с; 50с), график $V_{cp} = f(t_{cd})$ показан на рисунке 2.27. Базовая точка соответствует значению $t_{cd} = 26$ с. При этом $V_{0cp} = 50$ км/ч.

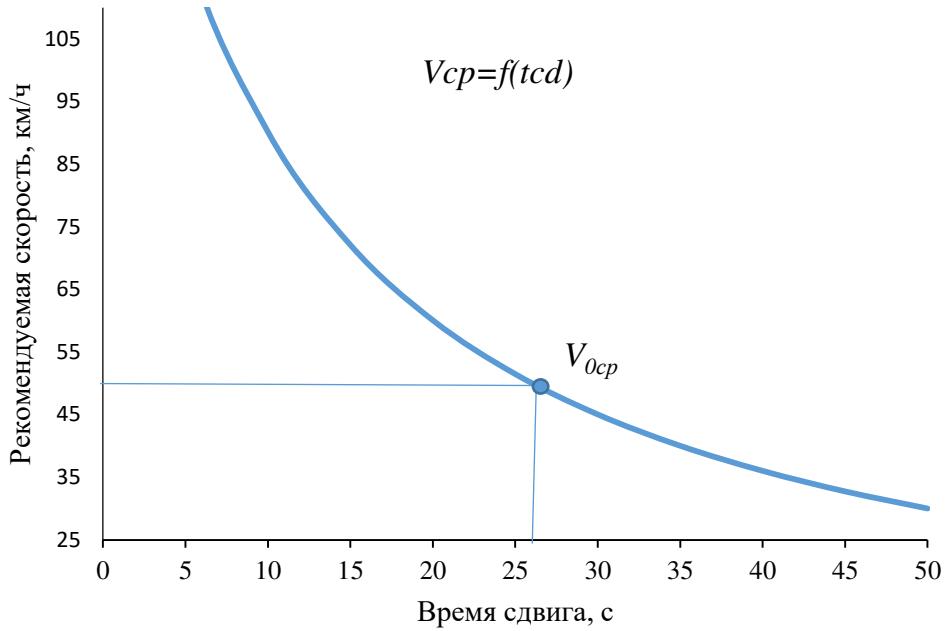


Рисунок 2.27 – Влияние времени сдвига разрешающего сигнала светофоров

Вариации время сдвига разрешающего сигнала смежных светофоров в диапазоне 0–50 секунд, показывают, что увеличение этого параметра приводит к снижению рекомендуемой скорости. Фактическое значение сдвига в 26 секунд соответствует базовой рекомендации скорости движения на перегоне в 50 км/ч. При увеличении сдвига до 50 секунд рекомендуемая скорость движения на перегоне падает до 35 км/ч.

3 фактор. Анализ влияния n_i (количество АТС в очереди перед следующим пересечением). Прочие факторы считаются соответствующими V_{0cp} . Модель в данном подходе имеет вид:

$$V_{cp} = f(n_i) = \frac{1800}{15,64 + \sqrt{1,215 + 4,543 \cdot (n_i - 1) + 2,1 \cdot (n_i - 1)}} \quad (2.34)$$

При изменении n_i в диапазоне (0; 15), график $V_{cp} = f(n_i)$ показан на рисунке 2.28. Базовая точка соответствует значению $n_i = 8$ легковых АТС. При этом $V_{0cp} = 50$ км/ч.

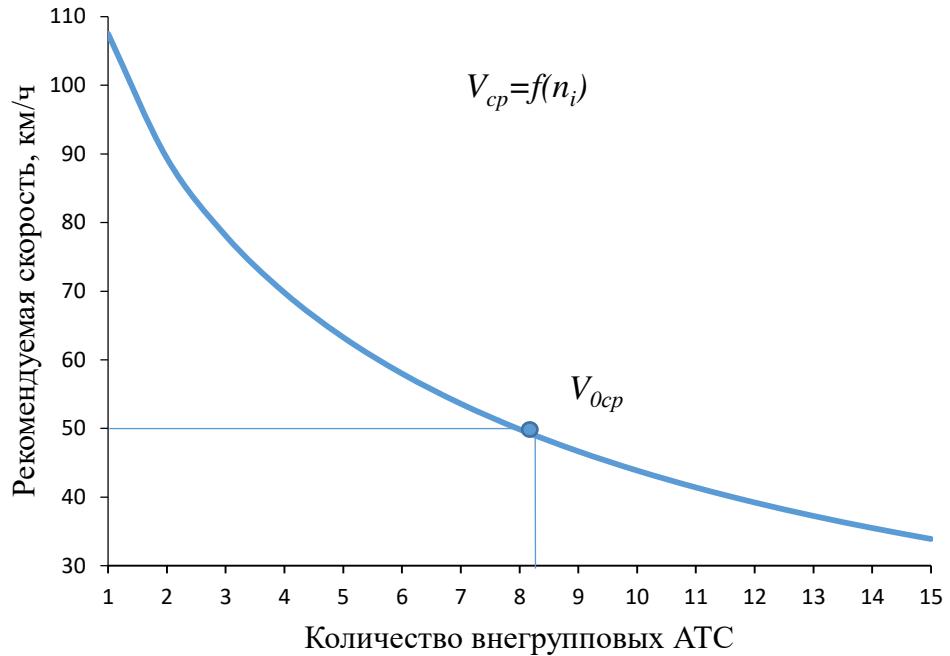


Рисунок 2.28 – Влияние количества АТС в очереди на последующем пересечении

Из рисунка следует, что при увеличении количества АТС перед пересечением от 0 до 15, скорость движения имеет тенденцию на снижение. Для базового расчётного значения в 8 АТС оптимальная скорость составляет 50 км/ч, при 15 АТС она уже уменьшается до 35 км/ч, а при отсутствии очереди достигает предела для разрешённого в городе движения в 60 км/ч.

4 фактор. Анализ влияния k_{dr} (коэффициент динамики, учитывающий состояние дорожного покрытия). Прочие факторы считаются соответствующими V_{0cp} . Модель имеет вид:

$$V_{cp} = f(k_{dr}) = \frac{1800}{15,64 + \sqrt{\frac{31,58}{k_{dr}} + \frac{14,7}{k_{dr}}}} \quad (2.35)$$

При изменении k_{dr} в указанных в таблице диапазонах для трёх ситуаций (норма; мокро; скользко), график $V_{cp} = f(n_i)$ показан на рисунке 2.29. Базовая точка соответствует значению $k_{dr} = 1$. При этом $V_{0cp} = 50$ км/ч.

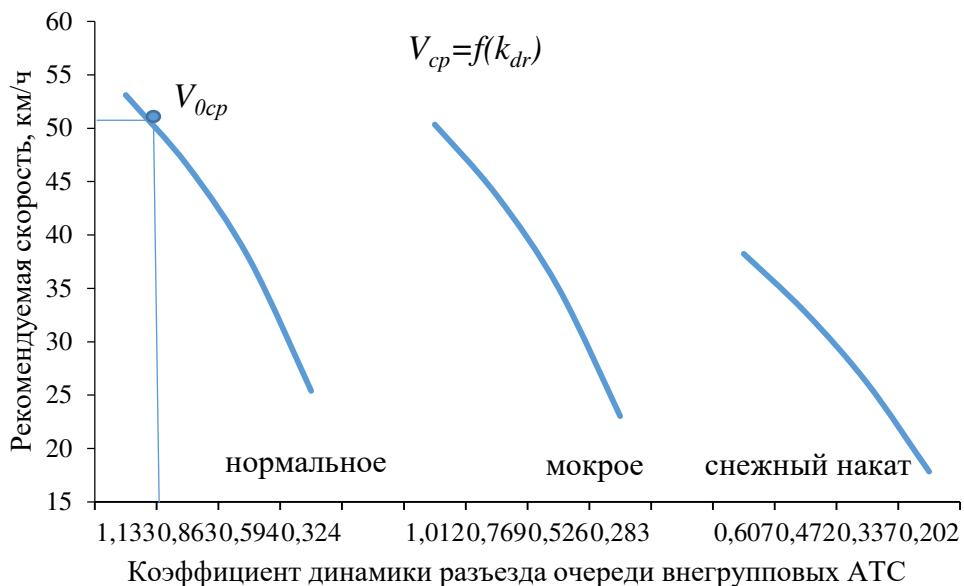


Рисунок 2.29 – Влияние состояния покрытия на рекомендуемую скорость движения группы АТС

На рисунке представлены три кривые для различных условий: нормальные условия движения, мокрое дорожное покрытие и снежный накат. В нормальных условиях базовая рекомендуемая скорость составляет 50 км/ч, при мокром покрытии – снижается до 40 км/ч, а при снежном накате снижается сильнее – до 30 км/ч.

5 фактор. Анализ влияния k_{kts} (коэффициент, учитывающий категорию наиболее инерционного в очереди АТС, находящихся у следующего пересечения). Прочие факторы считаются соответствующими V_{0cp} . Расчётная формула имеет вид:

$$V_{cp} = \frac{3,6 \cdot 500}{15,64 + \sqrt{\frac{78}{a_i}} + 14,7 \cdot k_{kts}} \quad (2.35)$$

Следует отметить, что инерционное АТС, находящееся в очереди на следующем пересечении, определяет не только коэффициент k_{kts} , но и ускорение a_i . Поэтому необходимо определять синхронное изменение k_{kts} и a_i в зависимости от категории АТС.

При изменении a_i в указанных в таблице диапазонах для ситуации «нормальное», график $V_{cp} = f(a_i)$ для двух значений $k_{kts} = 1$ и $k_{kts} = 1,64$

показан на рисунке 2.30. Базовая точка соответствует значению $k_{kts} = 1$; $a_{int} = 2,47 \text{ м/с}^2$.

При этом $V_{0cp} = 50 \text{ км/ч}$.

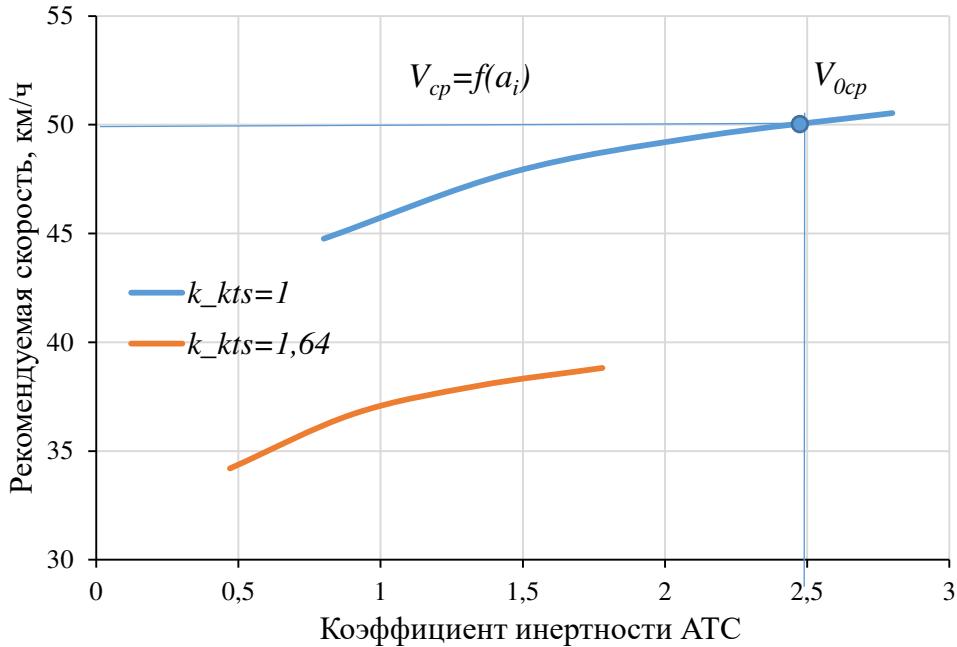


Рисунок 2.30 – Влияние инерционности ATC

График на рисунке показывает, что наличие в очереди хотя бы одного инерционного ATC (категории II) снижает скорость движения. Если очередь состоит только из легковых ATC (категория I), рекомендуемая скорость составляет 50 км/ч, а при появлении автобуса или крупногабаритного грузового ATC – снижается ниже 40 км/ч.

2.7.2 Многофакторный анализ

Нас интересует, в вероятностной постановке, анализ поля рассеивания рекомендуемых скоростей V_{cp} относительно базовой точки V_{0cp} при вариации двух факторов одновременно. Моделирование будем рассматривать для «типового» пересечения, когда $L_n = \text{const}$. Также из рассмотрения убираем фактор k_{kts} , так как ATC инерционных категорий движутся во многих ситуациях практически по выделенной полосе. Тогда на анализ выносится три фактора:

$$V_{cp} = f(t_{cd}; n_i; k_{dr}) \quad (2.36)$$

где: t_{cd} – время сдвига разрешающего сигнала, с; n_i – количество внегрупповых АТС, ед; k_{dr} – коэффициент динамики, учитывающий состояние дорожного покрытия.

Диапазоны вариации факторов:

- t_{cd} (20с – 50с);
- n_i (3 – 14) легковых АТС;
- k_{dr} (нормальное = 1; мокрое = 0,65; снежный накат = 0,4) – три градации состояния дорожного покрытия.

Диапазон вариации выходной переменной V_{cp} определим по значениям факторов – «одновременно минимизирующие» и «одновременно максимизирующие» значения выходной переменной.

1) Значения факторов, максимизирующие V_{cp} – (20; 3; норма=1). Это соответствует максимуму для V_{cp} . Примем максимум V_{cp} в 100 км/ч. Это соответствует движению АТС с произвольной скоростью без рекомендуемых ограничений.

2) Значения факторов, минимизирующие V_{cp} – (50; 14; скользко=0,4). Это соответствует минимуму для V_{cp} . Примем минимум для $V_{cp}=15$ км/ч.

Общий вывод – минимаксный диапазон рекомендуемых скоростей движения:

- минимум $V_{cp}=15$ км/ч;
- максимум $V_{cp}=100$ км/ч (теоретически, так как ограничение скорости в городе – 60 км/ч).

Рассмотрим прогнозную визуализацию поля рассеивания рекомендуемых скоростей V_{cp} , для АТС на перегоне между пересечениями с учётом следующих предположений: входные факторы считаются независимыми, а их функции принадлежности являются гауссовскими, что наиболее адекватно отражает реальное поведение случайных факторов.

Прогнозная модель оценки влияния входных факторов на рекомендуемую скорость V_{cp} , построена на основе метода нечеткой логики и компьютерной программы *fuzzyTECH*. Прогнозируется зависимая переменная V_{cp} (рекомендуемая скорость для АТС на перегоне между пересечениями) в зависимости от значений независимых переменных t_{cd} (время сдвига), n_i (количество АТС в очереди на последующем пересечении) и k_{dr} (состояние дорожного покрытия). Структурная схема построенной модели приведена на рисунке 2.31.

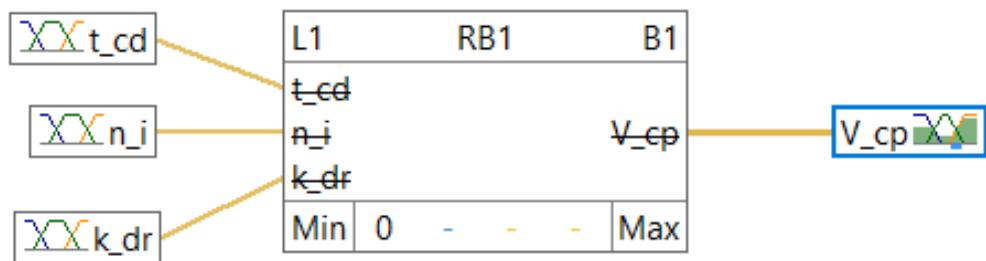


Рисунок 2.31 – Структурная схема модели по методу нечёткой логики

На стадии фазификации переменных в качестве сплайнов применены гауссовые функции принадлежности. Это в наибольшей степени соответствует постановке задачи в стохастическом варианте. Параметры гауссовых термов определены по экспертным оценкам авторов на основе практической работы с данными о транспортных потоках. Для независимых переменных число термов принимается равным 3, а для зависимой – устанавливается равным 5. Распределение значений по термам независимой переменной t_{cd} (аналогично для n_i ; k_{dr}) и зависимой V_{cp} показано на рисунке 2.32 соответственно.

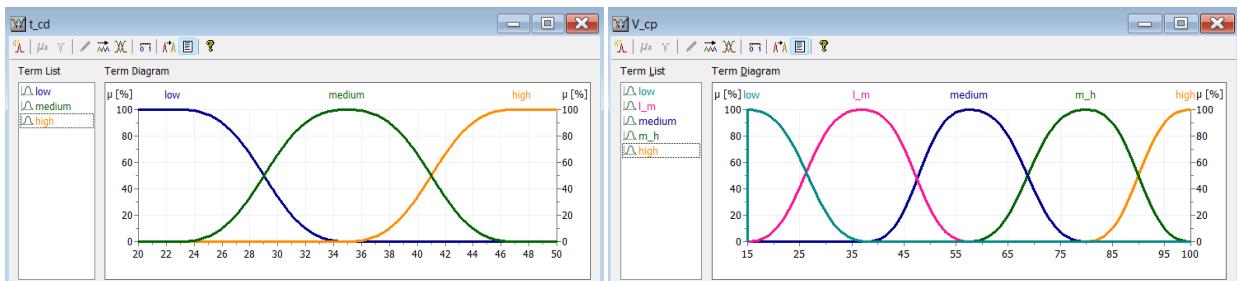


Рисунок 2.32 – Распределение значений термов для переменных

Нечеткая логическая модель для прогнозирования значений зависимой переменной была определена таблицей её взаимоотношений с независимыми переменными с помощью блока редактора правил Spreadsheet (рисунок 2.33).

	If	And	And	Then
B1.G1.R2	Δ t_cd.low	Δ n_j.low	Δ k_dr.medium	Δ V_cp.high
B1.G1.R3	Δ t_cd.low	Δ n_j.low	Δ k_dr.high	Δ V_cp.high
B1.G1.R4	Δ t_cd.low	Δ n_j.medium	Δ k_dr.low	Δ V_cp.medium
B1.G1.R5	Δ t_cd.low	Δ n_j.medium	Δ k_dr.medium	Δ V_cp.m_h
B1.G1.R6	Δ t_cd.low	Δ n_j.medium	Δ k_dr.high	Δ V_cp.m_h
B1.G1.R7	Δ t_cd.low	Δ n_j.high	Δ k_dr.low	Δ V_cp.low
B1.G1.R8	Δ t_cd.low	Δ n_j.high	Δ k_dr.medium	Δ V_cp.l_m
B1.G1.R9	Δ t_cd.low	Δ n_j.high	Δ k_dr.high	Δ V_cp.l_m
B1.G1.R10	Δ t_cd.medium	Δ n_j.low	Δ k_dr.low	Δ V_cp.medium
B1.G1.R11	Δ t_cd.medium	Δ n_j.low	Δ k_dr.medium	Δ V_cp.medium
B1.G1.R12	Δ t_cd.medium	Δ n_j.low	Δ k_dr.high	Δ V_cp.m_h
B1.G1.R13	Δ t_cd.medium	Δ n_j.medium	Δ k_dr.low	Δ V_cp.l_m
B1.G1.R14	Δ t_cd.medium	Δ n_j.medium	Δ k_dr.medium	Δ V_cp.medium
B1.G1.R15	Δ t_cd.medium	Δ n_j.medium	Δ k_dr.high	Δ V_cp.medium
B1.G1.R16	Δ t_cd.medium	Δ n_j.high	Δ k_dr.low	Δ V_cp.low
B1.G1.R17	Δ t_cd.medium	Δ n_j.high	Δ k_dr.medium	Δ V_cp.low
B1.G1.R18	Δ t_cd.medium	Δ n_j.high	Δ k_dr.high	Δ V_cp.low
B1.G1.R19	Δ t_cd.high	Δ n_j.low	Δ k_dr.low	Δ V_cp.low
B1.G1.R20	Δ t_cd.high	Δ n_j.low	Δ k_dr.medium	Δ V_cp.low
B1.G1.R21	Δ t_cd.high	Δ n_j.low	Δ k_dr.high	Δ V_cp.l_m
B1.G1.R22	Δ t_cd.high	Δ n_j.medium	Δ k_dr.low	Δ V_cp.low
B1.G1.R23	Δ t_cd.high	Δ n_j.medium	Δ k_dr.medium	Δ V_cp.low
B1.G1.R24	Δ t_cd.high	Δ n_j.medium	Δ k_dr.high	Δ V_cp.l_m
B1.G1.R25	Δ t_cd.high	Δ n_j.high	Δ k_dr.low	Δ V_cp.low
B1.G1.R26	Δ t_cd.high	Δ n_j.high	Δ k_dr.medium	Δ V_cp.low
B1.G1.R27	Δ t_cd.high	Δ n_j.high	Δ k_dr.high	Δ V_cp.low

Рисунок 2.33 – Таблица правил взаимоотношений переменных в модели

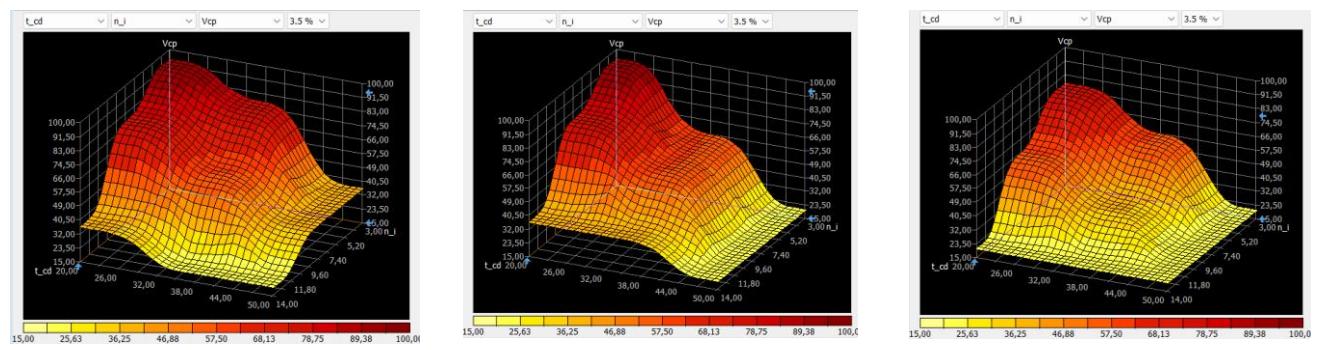
Следует отметить, что полное рассмотрение всех взаимоотношений в таблице правил может привести к некоторым аномалиям в модели, так как могут существовать некоторые непоследовательные или даже противоречивые правила взаимоотношений [79]. В общем случае, для решения этой проблемы целесообразно определять меру сходства «в системе, основанной на правилах». Но в данном практическом исследовании, являющемся начальным этапом оценки ситуаций в городской транспортной сети в условиях ряда неопределённостей, решение отмеченной проблемы пока не выносится на проработку. Хотя в дальнейшем, более детальном применении методов нечёткой логики, планируется проверка нечётких правил как в статическом, так и в динамическом подходе.

Экспериментальные исследования построенной модели позволяют сделать прогнозы зависимой переменной по фактическим значениям независимых, а также представить графически в виде объёмных поверхностей поле распределения взаимовлияния переменных.

Наиболее интересен, в свете поставленной задачи, взгляд на рекомендуемую скорость на перегоне между пересечениями V_{cp} для двух подходов:

- 1) информативная пара факторов $t_{cd} - n_i$ при вариации фактора k_{dr} ;
- 2) информативная пара факторов $n_i - k_{dr}$ при вариации фактора t_{cd} .

Для первого аналитического подхода на рисунке 2.34 показаны графики зависимой переменной V_{cp} от влияния времени сдвига светофорных циклов t_{cd} и размера очереди АТС n_i (независимые переменные) при изменении состояния дорожного покрытия в исследуемом диапазоне («нормальное»; «мокрое»; «снежный накат»).



Нормальное дорожное покрытие

Мокрое дорожное покрытие

Снежный накат

Рисунок 2.34 – Первый подход: графики взаимовлияния переменных

Несколько другой угол зрения даёт графическое представление влияния на рекомендуемую скорость V_{cp} ситуации на последующем пересечении – размер очереди АТС (n_i) и состояние дорожного покрытия, определяющие временные возможности проезда этих АТС (k_{dr}), при вариации времени сдвига светофорных циклов t_{cd} . Эти графики отражены на рисунке 2.35.

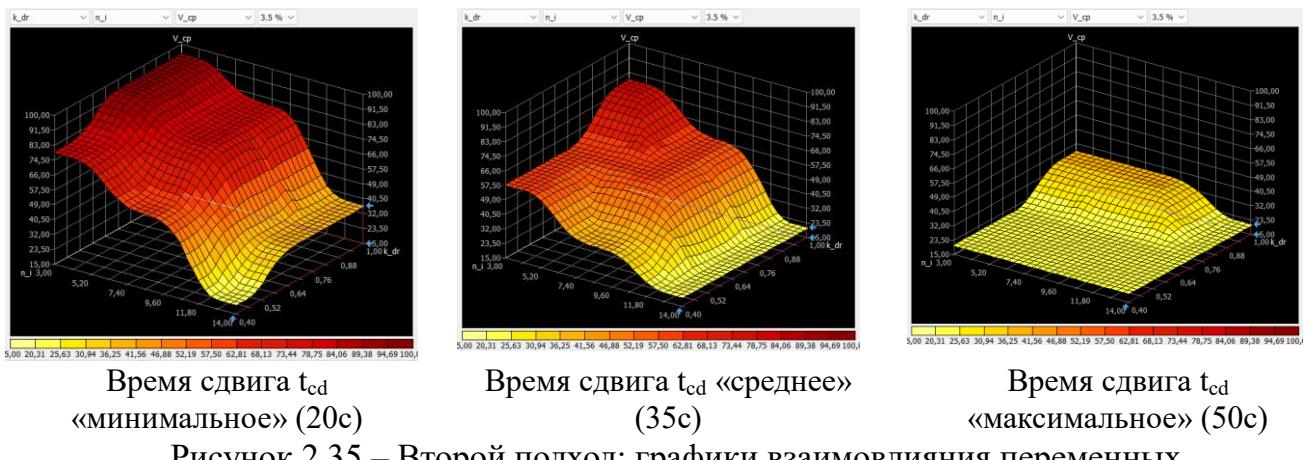


Рисунок 2.35 – Второй подход: графики взаимовлияния переменных

Анализ результатов двух подходов в проведённых экспериментах с моделью на основе нечёткой логики показывает характер изменения рекомендуемой скорости на перегоне между пересечениями при случайной вариации трёх принципиально различных факторов:

- времени сдвига светофорных циклов на ограничивающих перегон пересечениями;
- размера очереди АТС на последующем пересечении;
- состояния дорожного покрытия, определяющего характер движения АТС.

Проведённое исследование подтверждает, что метод нечёткой логики позволяет учитывать сложные взаимосвязи между входными параметрами по их влиянию на рекомендуемую скорость в зависимости от вариации текущих условий движения.

2.8 Оценка пропускной способности полосы и снижения задержек АТС при движении с рекомендуемой скоростью

Цель исследования: количественная оценка пропускной способности полосы и снижения задержек группы АТС, обусловленной вынужденным замедлением или остановкой при проезде пересечения вследствие образования очереди внегрупповых АТС.

2.8.1 Количественная оценка пропускной способности полосы

Пропускная способность полосы движения определяется комплексом факторов, включая количество АТС в очереди, скорость группы АТС, параметры светофорного регулирования (время сдвига фаз и длительность разрешающего такта). Для количественной оценки влияния этих факторов методом микромоделирования в среде PTV VISSIM было определено удельное время проезда ($T_{УВП}$) – временной интервал между прохождением последовательных АТС через стоп-линию в течение разрешающего сигнала светофора (рисунок 2.36). Полученные значения удельного времени проезда позволяют установить зависимость между временем разъезда очереди внегрупповых АТС и пропускной способностью полосы, что является основой для разработки методики проведения экспериментальных исследований [5, 28, 40].

$$T_{УВП} = \frac{t_g}{N_{TC}} \quad (2.37)$$

где t_g – длительность зеленой фазы, с; N_{TC} – количество АТС проехавших за цикл, ед.

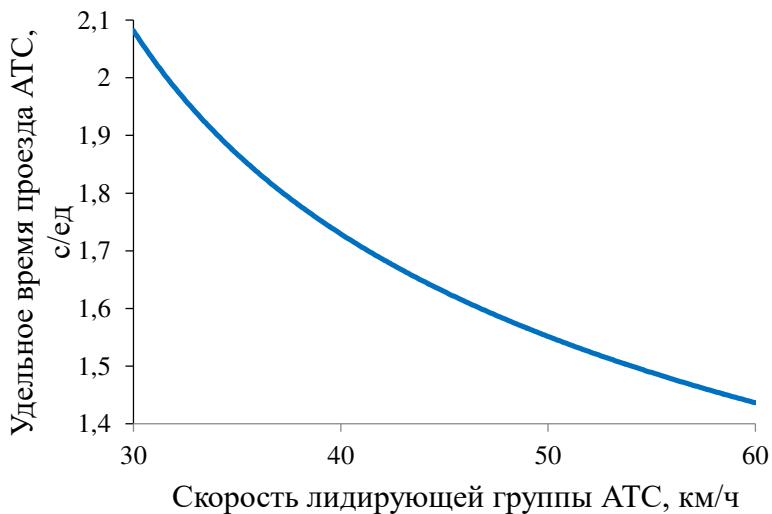


Рисунок 2.36 – Удельное время проезда АТС

Рост скорости группы АТС приводит к уменьшению времени, необходимого на проезд одного АТС через стоп-линию. Это объясняется более

высокой кинетической энергией потока, требующей меньших затрат времени на разгон после остановки, а также увеличением производительности полосы движения в единицу времени.

Соответственно при скорости группы АТС 30 км/ч удельное время проезда будет составлять 2,1 с/ед, 40 км/ч – 1,7 с/ед, 50 км/ч – 1,55 с/ед, 60 км/ч – 1,45 с/ед. При повышении скорости с 30 до 40 км/ч $T_{УВП}$ снизится на 19%, с 50 до 60 км/ч на 6%. Это свидетельствует о наиболее эффективной скорости ТП 50 км/ч. Несмотря на то, что $T_{УВП}$ при 60 км/ч минимально, необходимо учитывать рост задержек для группы АТС из-за неоптимального времени сдвига фаз, рассчитанного на другие скорости. Это подтверждают выводы из последующих теоретических исследований.

Исходные данные были получены в ходе экспериментальных исследований (таблица 2.4) для трёх значений стартовых ускорений первого АТС в очереди и представлены в таблице 2.13 (рисунок 2.37).

Таблица 2.13 – Время преодоления стоп-линии пересечения каждым АТС из очереди при вариации ускорения первого внегруппового АТС

n_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$a_1 = 2,8 \text{ м/с}^2$										
$t_1^{a_1,n_i}, \text{ с}$	2,13	1,90	1,73	1,62	1,55	1,49	1,45	1,45	1,45	1,45
$t_{0\text{ч}1}^{a_1,n_i}, \text{ с}$	2,13	4,03	5,76	7,38	8,93	10,42	11,87	13,32	14,77	16,22
$a_2 = 1,8 \text{ м/с}^2$										
$t_2^{a_2,n_i}, \text{ с}$	3,00	2,57	2,30	2,08	1,95	1,84	1,75	1,70	1,70	1,70
$t_{0\text{ч}2}^{a_2,n_i}, \text{ с}$	3,00	5,57	7,87	9,95	11,90	13,74	15,49	17,19	18,89	20,59
$a_3 = 0,8 \text{ м/с}^2$										
$t_3^{a_3,n_i}, \text{ с}$	4,00	3,40	3,00	2,70	2,48	2,30	2,20	2,15	2,10	2,10
$t_{0\text{ч}3}^{a_3,n_i}, \text{ с}$	4,00	7,40	10,40	13,10	15,58	17,88	20,08	22,23	24,33	26,43

где $t_{0\text{ч}1}^{a_1,n_i}, t_{0\text{ч}2}^{a_2,n_i}, t_{0\text{ч}3}^{a_3,n_i}$ – время разъезда очереди внегрупповых АТС, с; $t_1^{a_1,n_i}$, $t_2^{a_2,n_i}$, $t_3^{a_3,n_i}$ – время, затрачиваемое на проезд одного внегруппового АТС с учетом ускорения и места в очереди, с.

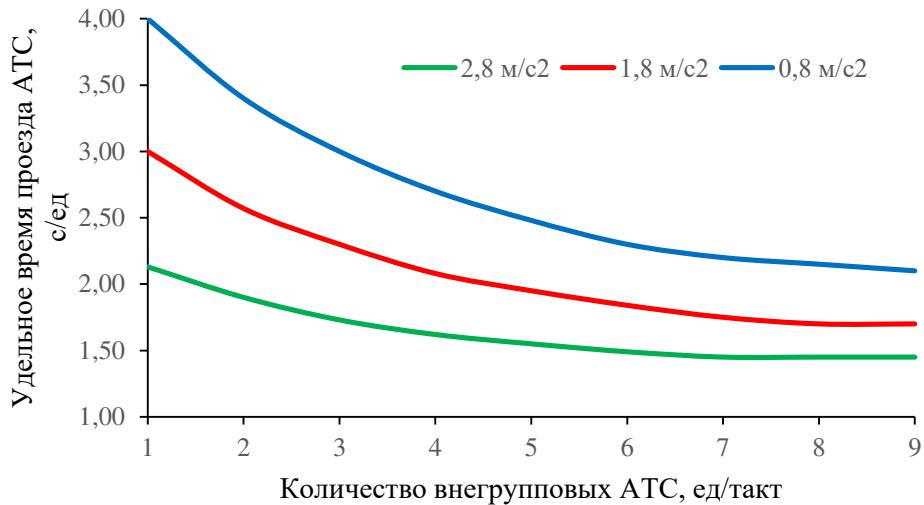


Рисунок 2.37 – Время, затрачиваемое на проезд одного внегруппового ATC с учетом ускорения и места в очереди

Как следует из рисунка 2.37, при ускорении выезда в 2,8 м/с² время выезда становится постоянным, начиная с 7-го ATC, и составляет 1,45 с. Аналогично, при ускорении выезда в 1,8 м/с² время выезда становится постоянным, начиная с 8-го ATC, и составляет 1,7 с. И при ускорении выезда в 0,8 м/с² время выезда становится постоянным, начиная с 9-го ATC, и составляет 2,1 с.

Каждому среднему ускорению первого внегруппового ATC в очереди было присвоено свое удельное время проезда для расчета пропускной способности полосы (таблица 2.14).

Таблица 2.14 – $T_{УВП}$ в зависимости от ускорения первого внегруппового автотранспортного средства

a_i (м/с ²)	$T_{УВП}$ (с/ед)
2,8	1,45
1,8	1,7
0,8	2,1

Пропускная способность полосы при длительности размещающего такта (t_g) определяется:

$$P_c = t_{\text{ож}}^{a_i, n_i} + t_{\text{ож}}^{N_{TC}} + \frac{t_g}{T_{УВП}^{a_i}} \quad (2.38)$$

где $t_{\text{оч}}^{a_i, n_i}$ – время разъезда очереди внегрупповых АТС, с; $t_{\text{оч}}^{N_{\text{TC}}}$ – время разъезда вторичной очереди из АТС группы, с; $T_{\text{УВП}}^{a_i}$ – удельное время проезда, в зависимости от ускорения, с/ед.

Проведенный анализ позволяет выявить оптимальные сочетания этих параметров, обеспечивающие максимальную пропускную способность полосы при сохранении безопасности движения. Особое значение имеет исследование предельных значений эффективности системы, когда дальнейшая оптимизация отдельных параметров не дает существенного результата (рисунок 2.38) (Приложение 2).

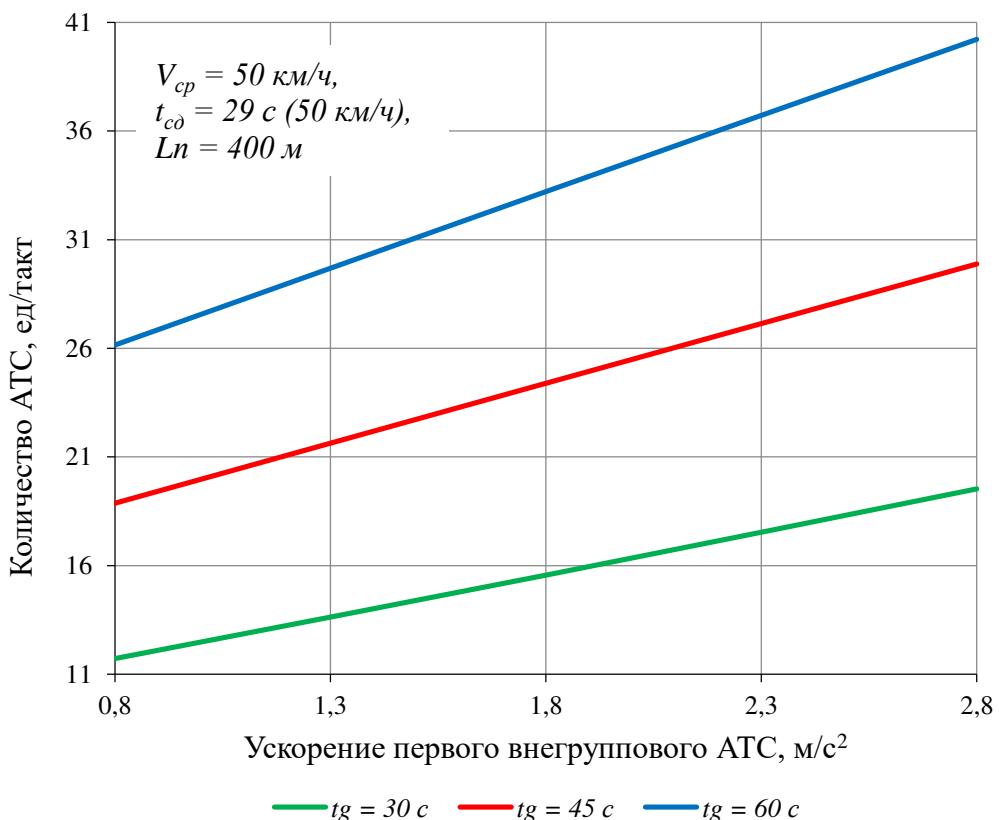


Рисунок 2.38 – Зависимость пропускной способности полосы от ускорения первого внегруппового АТС при разной длительности разрешающего сигнала светофора

Анализ данных, представленных на рис. 2.38, позволил выявить следующие закономерности. Влияние ускорения первого внегруппового автотранспортного средства на пропускную способность полосы проявляется в том, что максимальная пропускная способность на уровне 40 ед/такт

достигается при ускорении $2,8 \text{ м/с}^2$, тогда как при снижении ускорения до $0,8 \text{ м/с}^2$ наблюдается падение показателей на 35–40%, до уровня 12 ед/такт. Исследование зависимости пропускной способности полосы от длительности фазы показало, что увеличение длительности разрешающего сигнала светофора до 60 секунд приводит к росту пропускной способности на 10–12% по сравнению с 45-секундной фазой, в то время как сокращение длительности сигнала до 30 секунд вызывает снижение пропускной способности на 15–20%.

В третьей главе диссертации приведены результаты комплексного исследования, позволившего установить величину пропускной способности полосы движения на экспериментальном пересечении.

2.8.2 Оценка снижения задержек автотранспортных средств при движении с рекомендуемой скоростью

Эффект от движения автотранспортных средств по городским магистралям с рекомендуемой скоростью, рассчитываемой по полученной модели (формула (2.31)), целесообразно оценивать по снижению времени задержек АТС перед пересечениями. Снижение задержек времени при вариации количества внегрупповых АТС перед пересечением, определим как разницу между двумя расчётными временными отрезками для 1-го АТС группы. Первый временной отрезок определяется как суммарное время:

- время проезда перегона длиной в 500 м со скоростью 50 км/ч при координированном движении;
- время ожидания проезда до стоп-линии перед пересечением, обусловленное выездом с пересечения внегрупповых АТС.

Второй временной отрезок определяется безостановочным временем проезда перегона с рекомендуемой скоростью, при которой проезд пересечения происходит без остановки перед стоп-линией.

При расчётах принято время сдвига фаз светофорного регулирования, обуславливающее безостановочный проезд первым АТС группы последующего пересечения при отсутствии перед ним внегрупповых АТС, со скоростью 50 км/ч, что соответствует расчётной рекомендованной скорости также 50 км/ч. Соответствующие расчёты уровня снижения задержек 1-го АТС группы при вариации количества внегрупповых АТС, и ускорении их выезда с пересечения $0,8 \text{ м/с}^2$, отражены в таблице 2.15.

Таблица 2.15 – Расчёт снижения задержек 1-го группового АТС

Количество внегрупповых ТС, ед.	0	2	4	6	8
Время для 1-го АТС группы, с:					
- проезда перегона со скоростью 50 км/ч;	36,0	46,4	51,6	56,1	60,3
- ожидания выезда внегрупповых АТС с пересечения					
Задержка времени 1-го АТС группы, с	0	10,4	15,5	20,1	24,3
Рекомендованная скорость на перегоне, км/ч	50	41	37	33	31
Время для 1-го АТС группы, движущегося с рекомендованной скоростью, с	36,0	43,4	49,1	53,9	58,2
Снижение задержки, %	0	6,5	4,8	3,9	3,5

Следует заметить, что ускорение выезда АТС с пересечения в расчётах принято в градации трёх значений ($0,8 \text{ м/с}^2$; $1,8 \text{ м/с}^2$; $2,8 \text{ м/с}^2$), что обусловлено как различными метеоусловиями, так и состоянием дорожного покрытия пересечения.

Аналогичные расчёты, фрагмент которых отражен в таблице 2.13, проведены для различных ускорений выезда АТС с пересечения, а также при вариации длины перегона (300 м; 500 м; 700 м) (Приложение 2).

Прогнозная визуализация поля распределения анализируемого показателя – процента снижения задержек 1-го АТС группы, отражена на рисунке 2.39, где представлены 3 поверхности:

- верхняя соответствует длине перегона 300 м;
- средняя соответствует длине перегона 500 м;
- нижняя соответствует длине перегона 700 м.

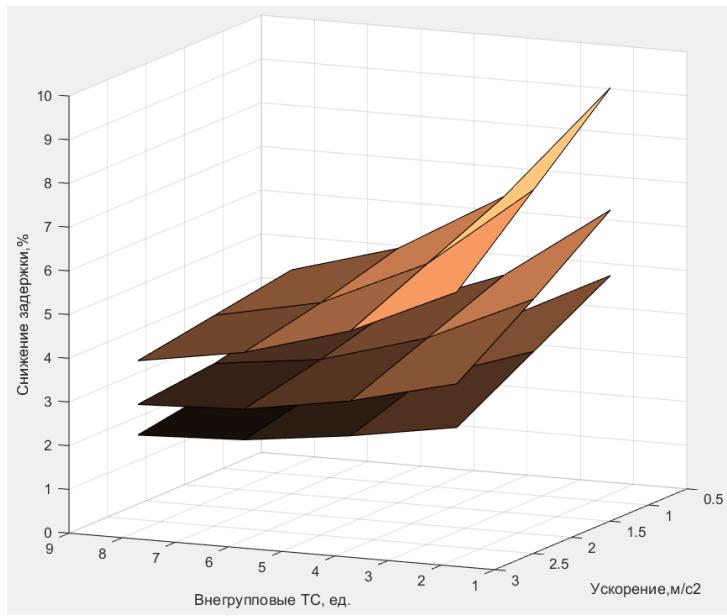


Рисунок 2.39 – Поле распределения снижения задержек

Как следует из анализа рисунка 2.39, каждая поверхность стремится к максимальным значениям при минимальном ускорении выезда АТС с пересечения и небольшом наличии внегрупповых АТС, что хорошо согласуется с априорными предположениями.

Общий диапазон снижения задержек, при вариации рассмотренных параметров в общепринятых пределах, варьируется от 2,2% до 9,5%. Такие оценки эффективности движения АТС с рекомендуемой скоростью можно считать существенными при решении задач оптимизации транспортного движения по городским магистралям.

2.9 Выводы по главе 2

Проведенные исследования позволили выявить ключевые закономерности влияния временных параметров разъезда очереди внегрупповых АТС на эффективность функционирования регулируемых пересечений. Установлено, что время разъезда очереди является критическим фактором, определяющим пропускную способность пересечения, при этом оно существенно зависит от состояния дорожного покрытия и структурного состава очереди:

1) Влияние состояния дорожного покрытия: При изменении условий от нормальных к снежному накату время разъезда очереди увеличивается до 50%, что снижает пропускную способность полосы до 40%.

2) Влияние состава очереди: Наличие в очереди II категории АТС снижает динамику разъезда. При появлении хотя бы одного такого автотранспортного средства в очереди из 8 АТС рекомендуемая скорость для лидирующей группы снижается на 22%.

3) Разработана модель (2.30) для расчета средней скорости группы автотранспортных средств, обеспечивающей безостановочный проезд регулируемых пересечений в межпиковый период. Модель интегрирует ключевые параметры: состав очереди, состояние покрытия, длину перегона и время сдвига переключения светофорной сигнализации. Модель имеет следующие ограничения: ее применение эффективно только в условиях координированного движения; количество АТС в очереди не должно превышать 8 единиц.

4) В рамках однофакторного анализа исследовано влияние изменения каждого параметра в отдельности на рекомендуемую скорость движения. Для комплексной оценки совместного воздействия факторов использован метод нечёткой логики, позволяющий учесть вероятностный характер изменения входных параметров в условиях неопределённости.

5) Оценка эффективности движения с рекомендуемой скоростью показала снижение задержек для первого АТС группы от 2,2% до 9,5% в зависимости от длины перегона, размера очереди и ускорения внегрупповых АТС.

Таким образом, представленные результаты подтверждают, что учет временных параметров разъезда очереди, ее состава и погодных условий позволяет разработать эффективные управляющие воздействия (рекомендуемая скорость) для реализации безостановочного проезда и снижения задержек группы автотранспортных средств.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Цель, задачи и методы экспериментальных исследований

Целью экспериментальных исследований являлась верификация математической модели безостановочного проезда пересечения группой автотранспортных средств.

Задачи экспериментальных исследований:

1. разработка и тестирование имитационной модели следования за лидером (Extended IDM with Speed Adaptation, EIDM-SA);
2. создание и калибровка микромодели в PTV VISSIM;
3. проведение натурных испытаний на реальном пересечении;
4. подтверждение адекватности математической модели на основе триангуляции данных (EIDM-SA – PTV VISSIM – натурные испытания).

3.2 Общая методика проведения экспериментального исследования

Исследование основано на системном подходе, объединяющем теоретическое моделирование, компьютерное моделирование и натурные эксперименты, такой комплексный метод позволяет обеспечить высокую достоверность результатов за счет взаимной верификации данных, полученных разными способами.

Этапы экспериментального исследования:

1. Имитационное моделирование EIDM-SA.

Моделирование проводилось с использованием имитационной модели Extended IDM with Speed Adaptation (EIDM-SA), адаптированной для условий городских пересечений. Особенностью реализации стало:

- введение категоризации автотранспортных средств по габаритам и динамическим характеристикам;

- учёт светофорного регулирования посредством виртуального автотранспортного средства;
- моделирование задержки реакции водителей при старте;
- учет минимальных безопасных дистанций между автотранспортными средствами.

Для реализации модели была разработана специализированная программа на языке Python, позволяющая:

- задавать параметры пересечения (длину перегона, длительность фаз светофорного объекта);
- моделировать различные сценарии ТП;
- визуализировать процесс движения АТС;
- экспортировать данные для последующего анализа.

2. Микроскопическое моделирование в PTV VISSIM.

Особенности реализации:

- создание геометрии перегона длиной 400 м;
- настройка характеристик автотранспортных средств (ускорение, скорость, категории АТС);
- задание режимов движения для групповых и внегрупповых групп автотранспортных средств;
- определение динамики разгона АТС на основе экспериментальных данных.

Сценарии моделирования:

- анализ пропускной способности при варьировании количества внегрупповых АТС (от 2 до 8 ед/такт);
- фиксация времени разъезда очереди и формирования вторичных задержек АТС.

3. Натурный эксперимент.

В рамках натурного эксперимента, проведённого на реальных пересечениях города Челябинска в соответствии с требованиями безопасности, исследовалась

зависимость пропускной способности и снижение задержек от соблюдения автотранспортными средствами рекомендуемой средней скорости. Полученные данные позволили выявить закономерности корректировки скоростного режима на перегоне, обусловленные влиянием переменных параметров, определяющих условия выезда очереди внегрупповых автотранспортных средств с пересечения.

3.3 Имитационная модель Extended IDM with Speed Adaptation (EIDM-SA)

Для экспериментального исследования была выбрана модель умного водителя «Расширенная IDM с адаптацией скорости» (Extended IDM with Speed Adaptation (EIDM-SA)). Это модифицированная версия имитационной модели Intelligent Driver Model (IDM) [85, 86, 87]. Модель основана на интеллектуальной модели водителя и использует интуитивно понятные поведенческие параметры: желаемую скорость, ускорение, комфортное замедление автотранспортного средства (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Базовые уравнения EIDM-SA

Параметр	Уравнение
Безопасная дистанция	$S = S_{min} + V_1 \cdot T + \frac{V_1 \cdot dV}{2 \cdot \sqrt{a_{max} \cdot a_{min} }}$
Коэффициент динамики	$k = 1 - \left(\frac{V_1}{V_{max}} \right)^q - \left(\frac{S}{d} \right)^2$
Ускорение	$a = k \cdot a_{max}$

где, S_{min} – минимальное расстояние до впереди идущего автотранспортного средства, м; V_1 – текущая скорость автотранспортного средства, м/с; T – минимальное время до впереди идущего автотранспортного средства, с; dV – разница между скоростями текущего автотранспортного средства и впереди идущего АТС, м/с; a_{max} – максимально возможное ускорение, м/с²; a_{min} – минимально возможное ускорение при торможении, м/с²; V_{max} – максимально возможная скорость, м/с; q – коэффициент агрессивности вождения; d – текущее расстояние до впереди идущего автотранспортного средства, м.

В таблице 3.2 представлены отличия стандартной имитационной модели Intelligent Driver Model (IDM) от модифицированной версии Extended IDM with Speed Adaptation (EIDM-SA).

Таблица 3.2 – Отличия от стандартной Intelligent Driver Model (IDM)

Параметр	Классическая IDM	EIDM-SA
Желаемая скорость	v_0 (фиксирована)	V_{max} (может адаптироваться)
Дистанция	$s^* = s_0 + v \cdot T + \frac{v \cdot \Delta v}{2\sqrt{a \cdot b}}$	$S = S_{min} + V_1 \cdot T + \frac{V_1 \cdot dV}{2 \cdot \sqrt{a_{max} \cdot a_{min}}}$
Плавность	$\delta = 4$	q (настраиваемый)

Для вычисления средних размеров АТС были записаны несколько видео. Часть видео с очередями внегрупповых АТС была вырезана с наложением линейки.

Вручную были определены средние длины АТС: категории I = $4,5 \pm 0,5$ м; II = $5,5 \pm 0,5$ м; III = $7 \pm 0,5$ м; IV = 18 ± 3 м; V = 12 ± 1 м.

Типы АТС были взяты согласно ГОСТ Р 56162-2019 [80] для более точного моделирования.

Параметры легковых АТС (натурные исследования):

- максимальное ускорение = $2,8 \pm 0,2$ м/с²;
- максимальное ускорение при торможении = $-3 \pm 0,2$ м/с²;
- задержка при старте = $1,7 \pm 0,2$ с;
- минимальное расстояние между АТС = $2,7 \pm 0,5$ м;
- минимальное время до впереди идущего АТС = 1,5 с.

Для выбора параметра q было проанализировано его влияние на коэффициент k. Были приняты следующие параметры q для разных категорий ТС: для I – 10, для II – 8, для III, IV и V – 4.

Вычисления производятся 24 раза в секунду. Каждый раз для каждого АТС вычисляется ускорение с помощью модели EIDM-SA с учетом впереди идущего АТС. Во время запрещающего такта светофора создается виртуальное АТС, стоящее перед стоп-линией пересечения. Для АТС, которые еще не пересекли стоп-линию, вычисляется также ускорение с учетом этого виртуального АТС. В

результате ускорение берется равным минимальному из ускорений для впереди идущего автотранспортного средства и для виртуального АТС. Если впереди нет автотранспортного средства, то ускорение принимается за максимальное. На основе полученного ускорения вычисляются скорость и координата. Если скорость при торможении оказывается меньше 2км/ч, то автотранспортное средство останавливается.

При старте с места находящегося впереди автотранспортного средства последующее АТС не сразу начинает двигаться, а только после задержки (характеристика каждого АТС).

Перед началом моделирования перед стоп-линией создается очередь стоящих автотранспортных средств на минимальном расстоянии друг от друга. Также на заданном расстоянии от стоп-линии создается очередь из движущихся с заданной максимальной скоростью автотранспортных средств (группа АТС). После включения разрешающего такта максимальная скорость становится равной 60км/ч.

Если для конкретного моделирования не указан режим работы светофора, то запрещающий такт длится 32 секунды, а разрешающий 53 секунды. Моделирование начинается с запрещающего сигнала светофора. После его окончания включается разрешающий. После него снова включается запрещающий, и через несколько секунд моделирование заканчивается. Определяются и сохраняются в файл следующие параметры (рисунок 3.1):

- количество автотранспортных средств из двигающихся к пересечению, пересекших стоп линию во время разрешающего такта светофора;
- время задержки лидирующего автотранспортного средства из двигающихся к пересечению группы АТС в секундах (на сколько это автотранспортное средство остановилось);
- время разъезда очереди внегрупповых АТС при различных стартовых ускорениях.

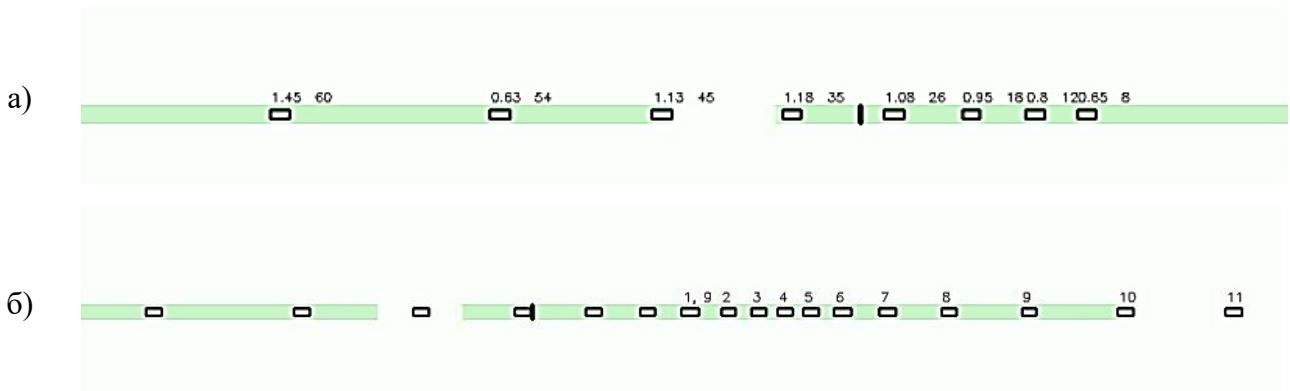


Рисунок 3.1 – Имитационное моделирование EIDM-SA: а) время разъезда очереди внегрупповых АТС, с; б) пропускная способность регулируемого пересечения, ед/такт

Исследование проведено для трех различных длин перегона (300 м, 400 м, 500 м) при фиксированной длительности разрешающего сигнала светофора (30 с), время сдвига рассчитано как при координированном управлении дорожным движением (t_{cd} при 50 км/ч) (Приложение 3). Рисунок 3.2 демонстрирует зависимость пропускной способности пересечения от двух ключевых параметров средней скорости группы АТС (V_{cp} , км/ч), длины очереди внегрупповых АТС (ТС-очередь).

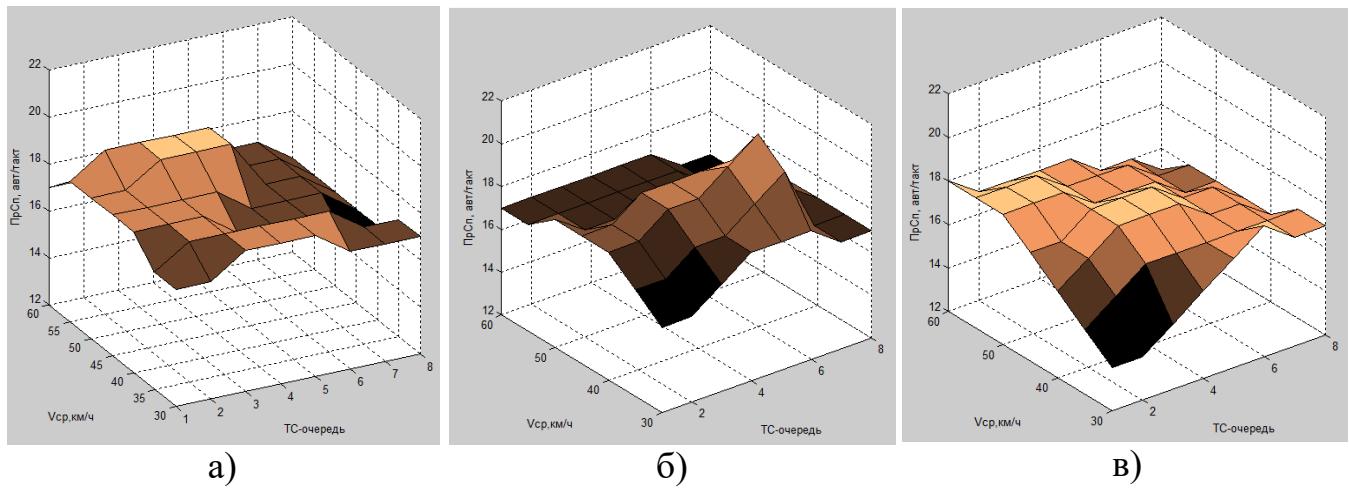


Рисунок 3.2 – Зависимость пропускной способности пересечения от средней скорости группы АТС и очереди внегрупповых АТС: а) $L_n = 300$ м; б) $L_n = 400$ м; в) $L_n = 500$ м

Результаты экспериментального исследования:

При перегоне 300 м пропускная способность резко снижается при увеличении очереди АТС. Максимальная эффективность достигается при средней скорости группы АТС 50-60 км/ч и минимальной очереди (от 2 до 4 АТС). При скорости ниже 40 км/ч наблюдается значительное падение пропускной

способности из-за несоответствия времени сдвига светофорной сигнализации. Короткие перегоны требуют строгого контроля скорости группы АТС для минимизации задержек.

При длине перегона 400 м оптимальная скорость смещается к 45–55 км/ч. Пропускная способность менее чувствительна к длине очереди по сравнению с перегоном 300 м. Увеличение длины перегона до 400 м улучшает устойчивость потока, но требует поддержания скорости в узком диапазоне.

При длине перегона 500 м наибольшая пропускная способность достигается при средней скорости группы ТС 50–60 км/ч и очереди до 5 ТС. Длинный перегон (500 м) позволяет нивелировать влияние очереди за счет большего пространства для маневров. При средней скорости группы АТС более 50 км/ч наблюдается рост задержек АТС из-за раннего прибытия к пересечению на запрещающий сигнал светофора. Перегоны 500 м обеспечивают баланс между скоростью и загруженностью, но требуют ограничения скорости группы АТС.

3.4 Моделирование в PTV VISSIM

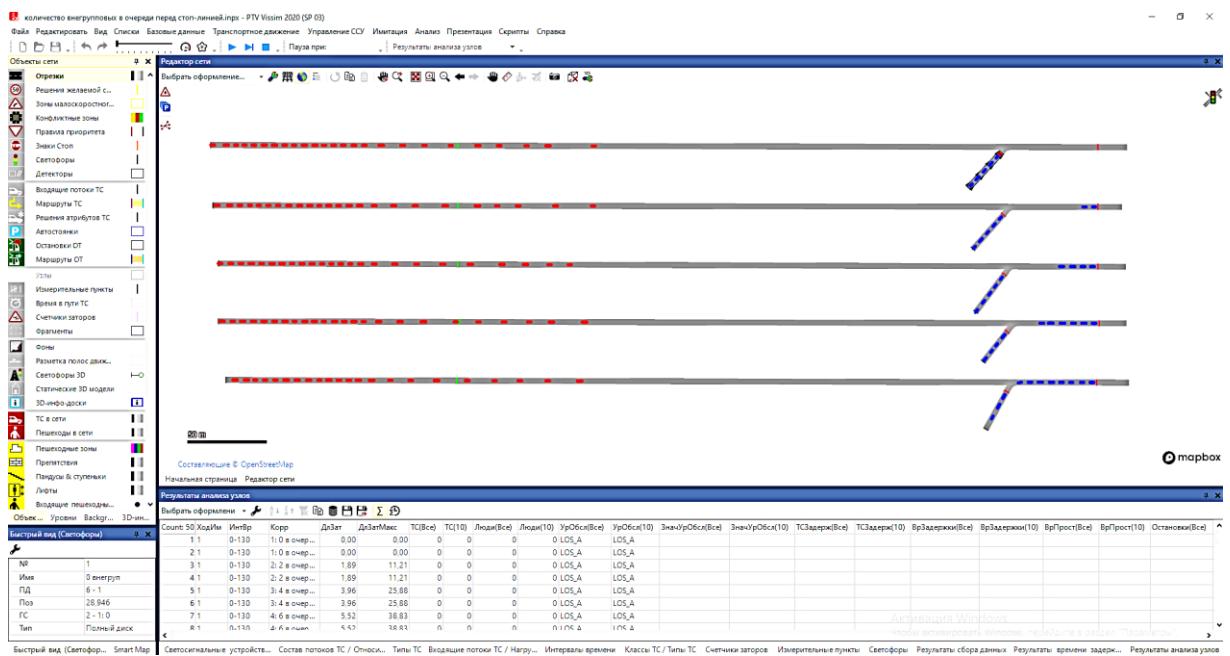
Моделирование в среде PTV VISSIM было выполнено для верификации результатов теоретических исследований, проведенных в предыдущих разделах работы. В качестве объекта моделирования был выбран перегон длиной 400 метров, поскольку именно эта длина, согласно имитационному моделированию EIDM-SA, демонстрирует более высокую эффективность с точки зрения пропускной способности и минимизации задержек (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Схема полосы движения АТС

Так как возможности программы PTV VISSIM ограничены, для создания очереди на 2-ом светофоре, вблизи построен дополнительный отрезок с собственным светофором, дозирующим количество внегрупповых АТС в очереди. Изменением длительности зеленой фазы удаётся добиться нужного количества внегрупповых АТС в очереди.

Моделирование позволило воспроизвести реальные условия движения автотранспортных средств, включая динамику разгона АТС, взаимодействие ТП и формирование очередей внегрупповых АТС, что обеспечило возможность комплексного анализа влияния различных факторов на работу пересечения (рисунок 3.4).



регулирования в условиях заданной программы координации. Красные АТС обозначают группу, которая начала движение в момент включения разрешающего сигнала, в то время как синие АТС относятся к внегрупповым и ожидают включение разрешающего сигнала светофора.

В нижней части интерфейса представлена таблица с результатами имитационного моделирования (Приложение 3). Она содержит ключевые показатели качества функционирования исследуемой системы:

- Delay (задержка) – среднее время задержки автотранспортных средств;
- Volume (объём движения) – количество автотранспортных средств, прошедших через контрольное сечение;
- LOS (Level of Service) – уровень обслуживания по шкале от A до F;
- Stops (число остановок) – фиксируется при попадании автотранспортного средства в фазу красного сигнала.

Ход и результаты эксперимента. Для определения пропускной способности полосы движения АТС в зависимости от времени разъезда очереди внегрупповых автотранспортных средств была произведена настройка ускорений для внегрупповых ТС в очереди (рисунок 3.5).

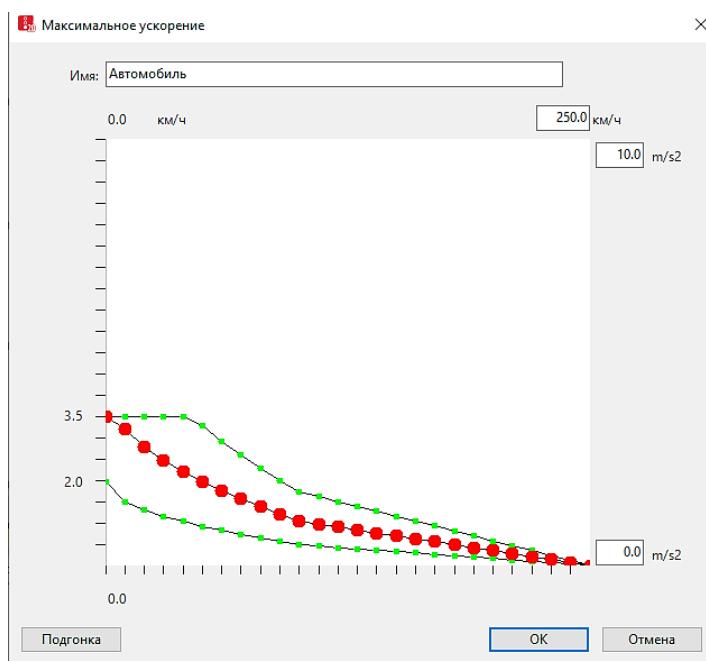


Рисунок 3.5 – Настройка ускорений АТС в PTV VISSIM

В ходе моделирования был выявлен существенный недостаток стандартного подхода к моделированию в PTV VISSIM: усреднение времени разъезда очереди и приведение его к фиксированному значению 2 с на одно автотранспортное средство. Такой подход не учитывает влияние ускорения автотранспортных средств на процесс разъезда очереди, что приводит к значительным погрешностям при оценке пропускной способности. Например, при высоком ускорении ($2,8 \text{ м/с}^2$) время разъезда сокращается на 15–25% по сравнению со стандартными расчетами.

Для имитации времени разъезда очереди внегрупповых автотранспортных средств с учетом вариации ускорений первого внегруппового автотранспортного средства настройка светофора была произведена вручную (рисунок 3.6).

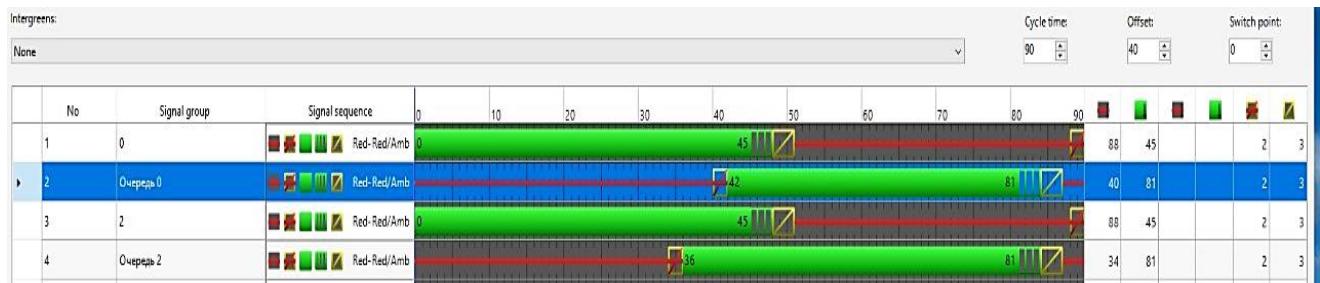


Рисунок 3.6 – Настройка светофора для определения вторичной очереди АТС.

На рисунке 3.6 представлено смещение времени сдвига на время проезда внегрупповых автотранспортных средств в зависимости от их количества. Такой подход позволяет смоделировать процесс формирования вторичной очереди, возникающей из группы автотранспортных средств.

В ходе моделирования была подтверждена гипотеза о формировании вторичной очереди из группы автотранспортных средств (рисунок 3.7). Данное явление возникает вследствие задержки выезда внегрупповых АТС, что приводит к накоплению последующих автотранспортных средств даже при разрешающем сигнале светофора. Кроме того, было определено удельное время проезда, которое составило 1,45–2,10 с/ед в зависимости от динамических характеристик автотранспортных средств и условий движения. Более подробный анализ удельного времени проезда представлен в разделе 2.8.



Рисунок 3.7 – Образование вторичной очереди из внегрупповых АТС

На рисунке 3.7 представлена схема движения автотранспортных средств. На 3-й, 4-й и 5-й полосе наблюдается процесс формирования вторичной группы автотранспортных средств из группы, начавшей движение при разрешающем сигнале светофора. Такое разделение потока позволяет проанализировать особенности проезда пересечения автотранспортных средств, а также оценить влияние внегрупповых автотранспортных средств на общую пропускную способность полосы движения АТС.

Проведенное микромоделирование в PTV VISSIM позволило:

- выявить и количественно оценить эффект формирования вторичной очереди, который существенно влияет на пропускную способность пересечения;
- обнаружить ограничения стандартных настроек моделирования, связанные с игнорированием динамических параметров автотранспортных средств (ускорения), что требует разработки адаптированных методик для повышения точности расчетов.

Полученные результаты подчеркивают необходимость учета реальных динамических характеристик автотранспортных средств при проектировании систем управления дорожным движением, а также целесообразность использования микромоделирования для верификации теоретических моделей.

Дальнейшие исследования предлагается направить на разработку скорректированных алгоритмов расчета времени разъезда очереди внегрупповых автотранспортных средств с учетом переменного ускорения АТС.

3.5 Натурные исследования

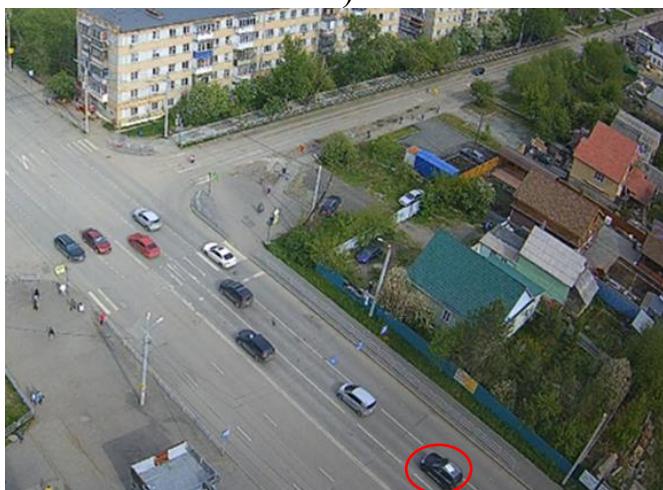
Натурные исследования проводились на полосах, отобранных по критериям наличия достаточного обзора камер видеонаблюдения, соответствующей длины перегона и оптимального времени сдвига фаз светофорной сигнализации. Примеры приведены на рисунке 3.8.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.8 - Натурные исследования на пересечениях: а) Комсомольский пр. – ул. Ворошилова; б) пр. Ленина – ул. Энгельса; в) ул. Зальцмана – ул. 2-я Эльтонская; г) ул. Зальцмана – ул. 1-я Эльтонская

На рис. 3.8 красной меткой выделен АТС экспериментальной группы. Отбор объектов исследования осуществлялся методом оценки пригодности полосы для обеспечения безостановочного проезда АТС (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Критерии отбора полосы

Наименование пересечения	Направление	Длина перегона (L_n), м	Время сдвига ($t_{сд}$), с
ул. Трашутина – ул. 2-я Эльтонская	E	285	41
пр. Ленина – ул. Энгельса	WE	360	9
ул. Чичерина – ул. 250-летия Челябинска	NW	620	54
ул. Труда	NW	390	3
ул. Зальцмана – ул. 1-я Эльтонская	SW	409	57
ул. Зальцмана – ул. 2-я Эльтонская	NE	445	36
Комсомольский пр. – ул. Молдавская	E	650	10
Комсомольский пр. – ул. Ворошилова	E	180	25
Ул. Чичерина – ул. Бр. Кашириных	SE	620	104

Обоснование выбора параметров:

При времени сдвига менее 25 с АТС группы прибывают к пересечению уже при включенном разрешающем сигнале светофора и осуществляют проезд без остановки, поскольку очередь внегрупповых АТС успевает покинуть пересечение к их прибытию. Однако в условиях межпикового периода существует вероятность отсутствия очереди внегрупповых АТС, что приводит к неэффективному использованию светофорного цикла: конфликтующие направления простаивают в ожидании разрешающего сигнала в то время, когда на исследуемой полосе отсутствует транспортный поток.

Напротив, при времени сдвига свыше 40 с групповые АТС неизбежно прибывают к пересечению на запрещающий сигнал светофора независимо от выбранной скорости движения, что обусловливает возникновение задержек АТС и снижение пропускной способности.

По итогам проведенного обследования для эксперимента была выбрана полоса с разрешенным движением «прямо» на пересечение ул. Зальцмана – ул. 2-я Эльтонская в направлении NE, поскольку параметры организации движения (время сдвига 36 с, длина перегона 445 м) наиболее соответствуют требованиям координированного движения.

Сбор исходных данных для анализа ТП осуществлялся с применением методов компьютерного зрения на основе предварительно обученной сверточной нейронной сети.

Обработка видеопотоков в реальном времени позволила получить репрезентативную выборку данных, включая:

- количество внегрупповых автотранспортных средств в очереди на запрещающий сигнал светофора;
- скорость проезда стоп-линии для каждого автотранспортного средства в очереди;
- среднее время проезда стоп-линии последнего внегруппового АТС в очереди с начала включения разрешающего такта.

Использование нейросетевых алгоритмов обеспечило высокую точность измерений и исключило субъективный фактор при обработке больших объемов видеоданных.

Для определения очередей внегрупповых автотранспортных средств была произведена разметка центров полос движения (рисунок 3.9). Автотранспортное средство считается находящимся в полосе, если для него найден отрезок центра полосы на расстоянии меньше 1,2 метра. После определения принадлежности каждого автотранспортного средства своей полосе вычисляется порядок их в очереди. Для этого считается расстояние от каждого автотранспортного средства до начала отрезка. Все отрезки размечены так, что первая точка расположена ближе к пересечению.

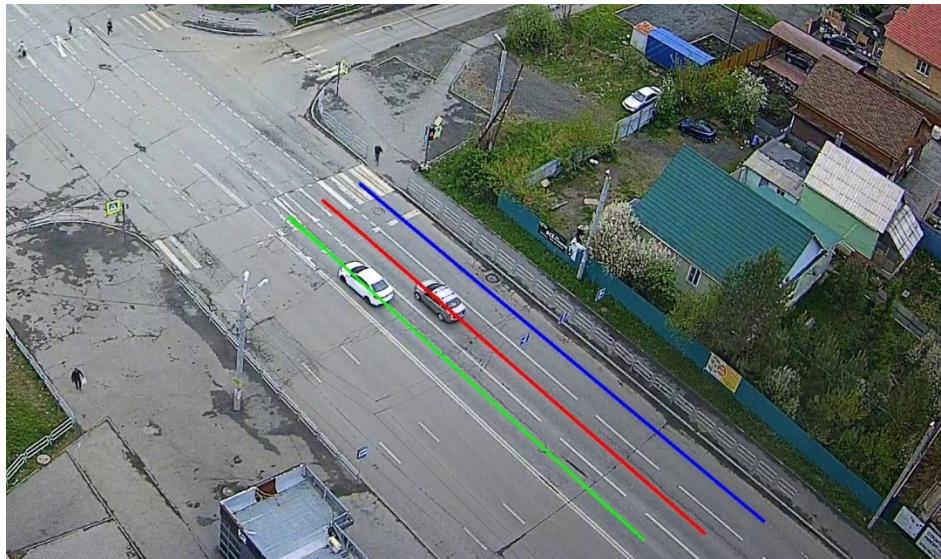


Рисунок 3.9 – Разметка центров полос движения для определения очередей внегрупповых АТС

Режим работы светофора на пересечении ул. Зальцмана – ул. 2-я Эльтонская осуществляется в следующем режиме:

- длительность цикла – 84 с;
- длительность разрешающего такта – 45 с;
- длительность запрещающего такта – 36 с.

Определять время начала разрешающего такта можно автоматически по параметрам движения АТС. Если автотранспортные средства стоят в полосе, то текущий сигнал светофора запрещающий. Как только скорость первого внегруппового АТС в очереди превысила 5 км/ч, считается, что включился разрешающий такт. Скорость в 5 км/ч была взята из-за погрешностей обнаружения нейронной сети. Но не всегда автоматическое определение времени начала разрешающего такта может работать правильно из-за ошибок обнаружения нейронной сети, отслеживания трекера, плохой видимости, отсутствия АТС в очереди, начала движения АТС не на разрешающий сигнал светофора и других причин. Алгоритм автоматического определения времени начала разрешающего такта был разработан и проработал 3 часа. После этого были вычислены разницы между каждыми парами соседних обнаружений включения разрешающего такта. Если разница больше половины длительности цикла (42 секунды), то из нее вычитается длительность цикла, пока разница не станет меньше половины. На

рисунке 3.10 показана разница между обнаруженными соседними включениями разрешающего такта. Большое количество ошибок (разница больше 1 секунды) говорит о том, что невозможно точно определить каждое включение разрешающего такта по отдельности.

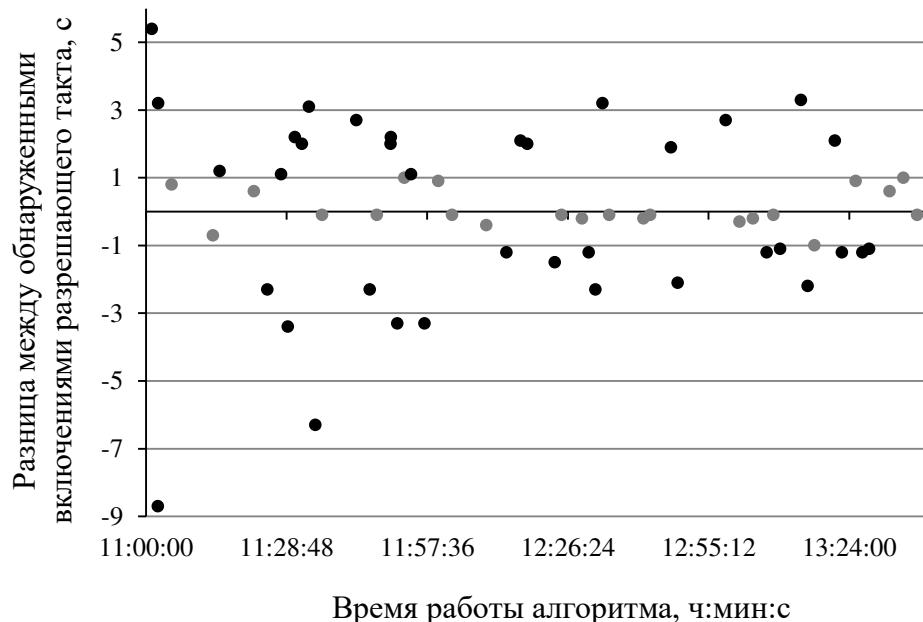


Рисунок 3.10 – Разница между обнаруженными включениями разрешающего такта после приведения к значению меньше половины длительности цикла. Серые обозначения – разница меньше 1 с, черные – больше 1 с.

Так как в результате измерений могут быть ошибки по разным причинам, то решение о начале разрешающего такта можно принять только при анализе большого количества данных. Для этого был разработан следующий алгоритм:

- время начала движения первого АТС в очереди сохраняется в список;
- записи старше 3 часов удаляются;
- вычисляется матрица разницы в секундах между каждой парой временных меток из списка;
- из каждой разницы вычитается длительность цикла (84 секунды) пока значение не станет меньше длительности цикла;
- для каждой временной метки создается счетчик количества других временных меток, расположенных от текущей на целое число циклов работы светофора;

- если полученное значение разницы меньше 1 секунды или больше длительности цикла минус 1 секунда (83 секунды), то счетчик для временных меток пары увеличивается на 1;
- выбирается временная метка с наибольшим значением счетчика, это и будет самое точное время начала разрешающего сигнала светофора;
- к полученному времени прибавляется задержка видеопотока 1 секунда.

3.5.1 Анализ данных и интерпретация результатов

Для обработки данных, полученных в ходе видеонаблюдения и работы нейронной сети, был разработан комплексный аналитический подход. В течение одного дня (с 7:00 до 21:00) было зафиксировано 334 полных светофорных цикла. Часть данных была исключена из дальнейшего анализа (84 записи) из-за ошибок трекинга автотранспортных средств и неточностей в определении момента начала разрешающего такта.

Статистика формирования очереди внегрупповых автотранспортных средств на полосе движения АТС представлена на рисунке 3.11.

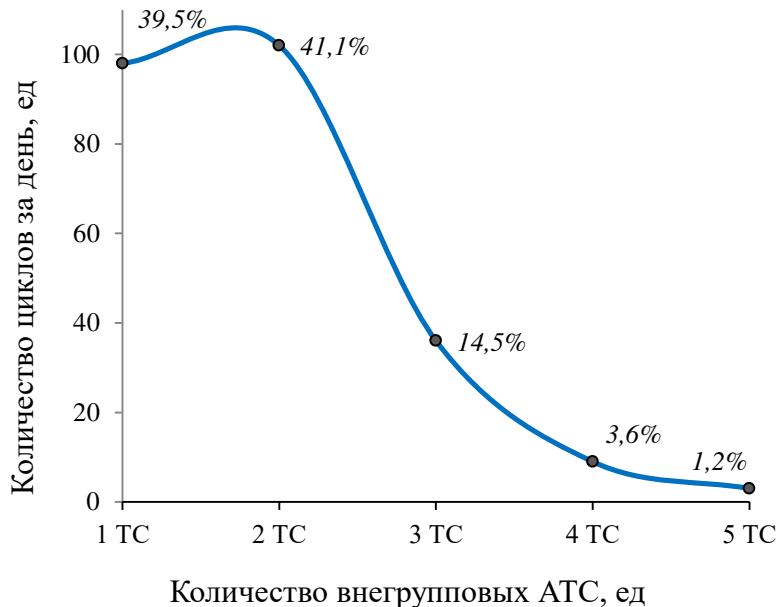


Рисунок 3.11 – Соотношение количества внегрупповых АТС в очереди на запрещающем такте светофора в течение дня

Анализ распределения количества внегрупповых автотранспортных средств в очереди на запрещающий сигнал светофора (рисунок 3.11) показал преобладание коротких очередей (от 1 до 3 АТС) в течение большей части суток, что характерно для межпикового периода. Наличие очередей длиной 5 автотранспортных средств наблюдалось преимущественно в утренние и вечерние часы пиковой нагрузки.

Динамика проезда стоп-линии внегрупповыми автотранспортными средствами (рисунок 3.12).

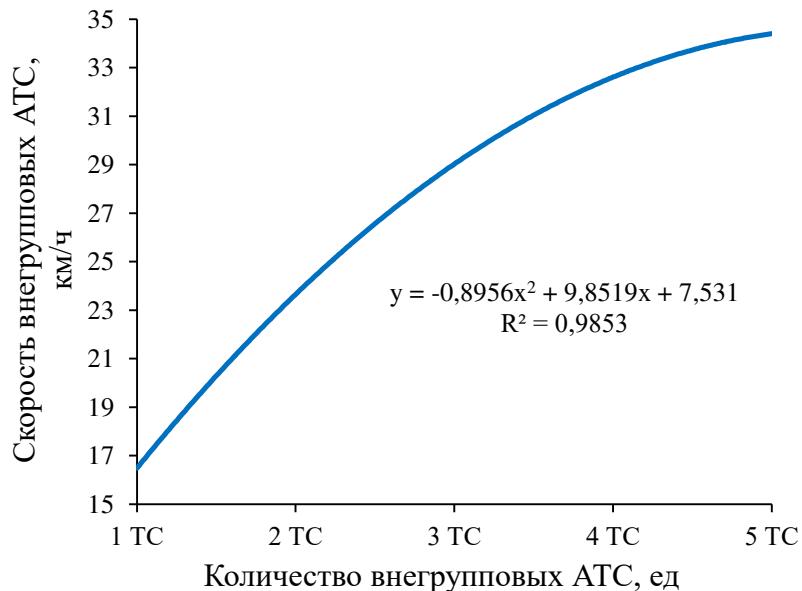


Рисунок 3.12 – Средняя скорость проезда стоп линии последним АТС в очереди в зависимости от размера очереди, км/ч

Анализ скорости проезда стоп-линии последним автотранспортным средством в очереди (рисунок 3.12) выявил обратную зависимость между длиной очереди и скоростью движения внегрупповых автотранспортных средств:

- при коротких очередях (от 1 до 3 АТС) средняя скорость составляла 16–28 км/ч, что объясняется необходимостью разгона после полной остановки и инерционностью потока;
- при длинных очередях (5 АТС) скорость возрастала до 32–35 км/ч, так как последние АТС в очереди начинали движение с уже разогнавшегося потока и не испытывали необходимости в полной остановке.

Данная закономерность подтверждает гипотезу о влиянии инерции транспортного потока на динамические характеристики движения. Рост скорости

при увеличении очереди свидетельствует о эффективном «волновом» распространении стартового импульса вдоль очереди, что сокращает общее время ее разъезда [9; 23; 43].

Время разъезда очереди внегрупповых автотранспортных средств через стоп-линию показано на рисунке 3.13.

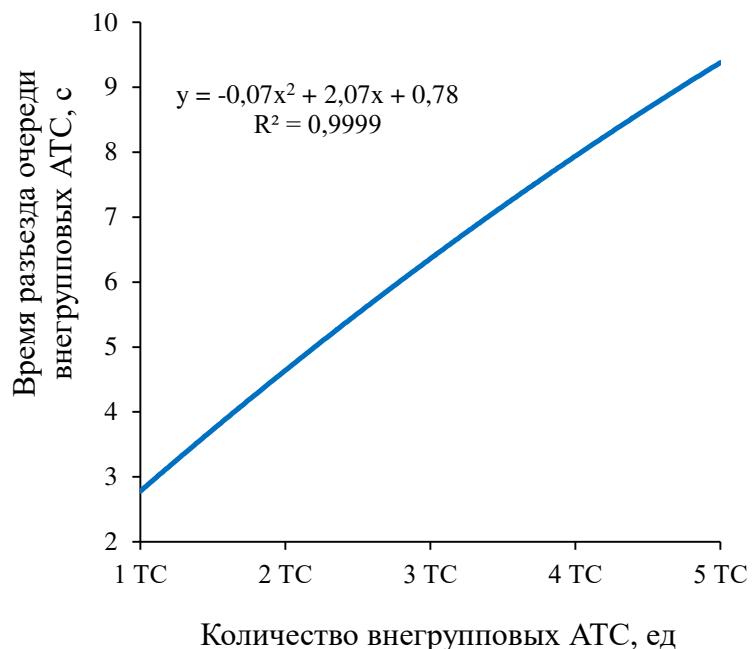


Рисунок 3.13 – Среднее время проезда стоп линии последним внегрупповым АТС в очереди с начала включения разрешающего такта в зависимости от размера очереди

Анализ времени разъезда очереди внегрупповых автотранспортных средств (рисунок 3.13) подтверждают линейную зависимость между количеством внегрупповых автотранспортных средств и временем разъезда очереди. Увеличение длины очереди с 2 до 5 автотранспортных средств приводит к росту времени разъезда более чем в 2 раза, что необходимо учитывать при проектировании длительности разрешающих фаз светофоров. Верификация точности данных проводилась методом сравнения с эталонными замерами и показала отклонение не более 5%.

Анализ интенсивности движения автотранспортных средств за 1 цикл в течение суток представлен на рисунке 3.12 (Приложение 3).

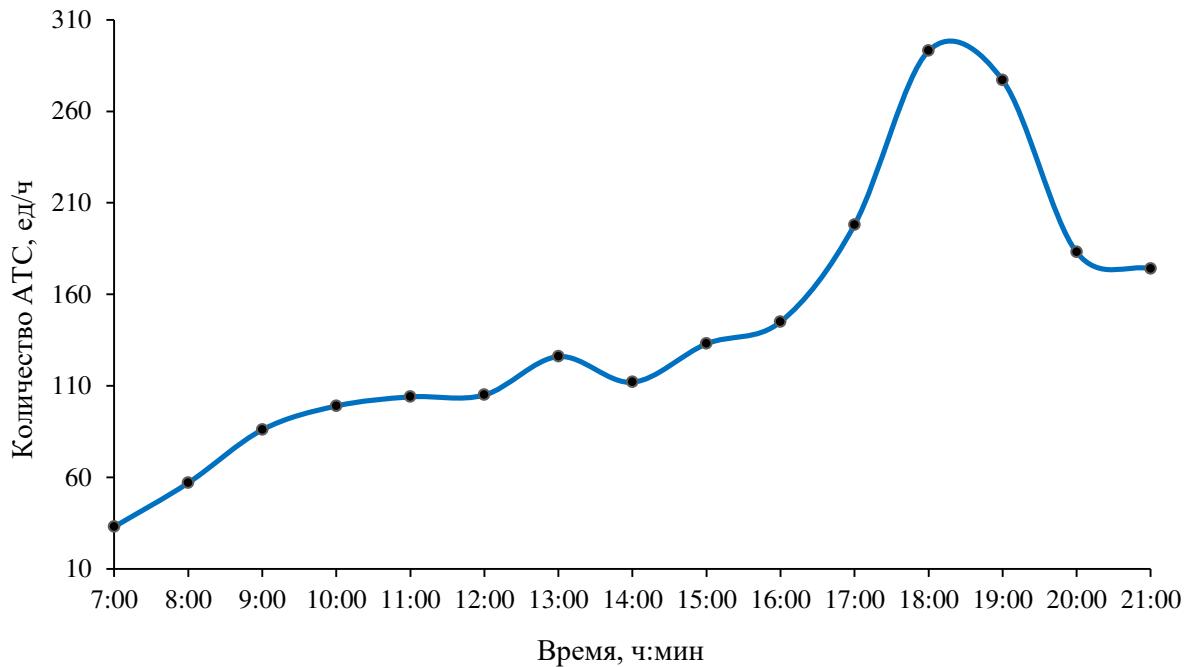


Рисунок 3.12 – Суточное распределение количества АТС на полосе движения за 1 цикл

Анализ рисунка 3.12 показывает, что утренний час пик выражен слабо, тогда как во второй половине дня, начиная с 16:00, интенсивность возрастает и достигает максимума в интервале с 18:00 до 19:00 (до 300 ед/ч).

Для минимизации погрешностей, связанных с задержками видеопотока (1 с) и ошибками детектирования, применялся алгоритм статистической фильтрации данных, основанный на поиске кластеров временных меток внутри допустимого отклонения (± 1 секунда от теоретического времени цикла).

Проведенный анализ подтвердил высокую чувствительность параметров движения (скорость, время проезда) к длине очереди внегрупповых автотранспортных средств. Полученные количественные зависимости могут быть использованы для:

- калибровки моделей транспортных потоков.
- оптимизации длительности светофорных циклов.
- прогнозирования задержек в зависимости от интенсивности движения.

3.5.2 Анализ пропускной способности полосы движения автотранспортных средств

Цель исследования – показать оптимальность пропускной способности пересечения при соблюдении АТС рекомендуемой средней скорости.

Для этого необходимо рассчитать пропускную способность полосы для пересечения, при свободном движении ($V_{cp} = 50$ км/ч, с учетом ускорений и замедлений АТС), рекомендуемой скорости (V_{rek}) в зависимости от количества АТС в очереди перед стоп-линией на пересечении (n).

Параметры эксперимента для выбранного пересечения:

- длительность разрешающей фазы светофора 45 с;
- фазовый сдвиг зелёного сигнала относительно предыдущего пересечения 36 с;
- длина перегона между пересечениями 445 м.

Исходными данными в расчётах выступают замеры времени преодоления очередью автотранспортных средств пересечения, усреднённые значения которых для 6 АТС из очереди, представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Время преодоления пересечения каждым АТС из очереди

ТС в очереди, n	1	2	3	4	5	6
Время преодоления пересечения каждым ТС в очереди (факт), с	2,76	1,92	1,68	1,54	1,50	1,45
Время t_n (тренд 4-го порядка), с	2,76	1,93	1,65	1,56	1,47	1,45
Кумулята времени Ktn (для тренда), с	2,76	4,68	6,36	7,90	9,40	10,85

Сглаживание для фактических данных проведено с помощью полиномиального тренда 4-го порядка (рисунок 3.13), имеющего высокую степень приближения к фактическим данным ($R^2=0,9988$). Исследования показали, что на выбранной для эксперимента полосе максимальная очередь внегрупповых автотранспортных средств составляет 5 АТС (рисунок 3.11).

Далее, для АТС после 5-го в очереди, считаем время проезда пересечения постоянным и равным принятому в теоретических исследованиях при ускорении первого внегруппового ТС – 2,8 м/с² ($T_{УВП}^{a_i} = 1,45$ с/ед) (таблица 2.13, 2.14).

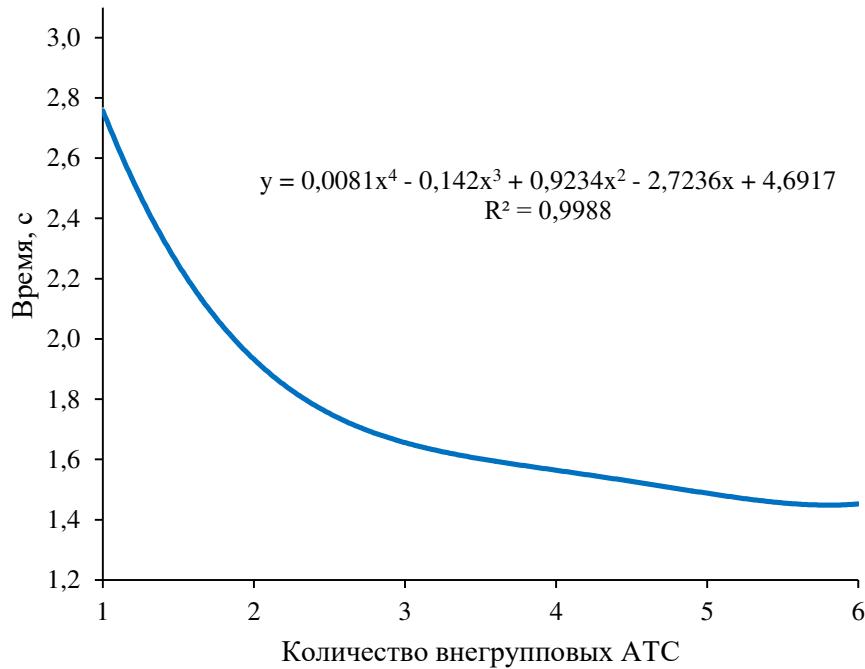


Рисунок 3.13 – Время проезда пересечения каждым внегрупповым АТС из очереди

Математическая модель расчёта рекомендуемой средней скорости на перегоне между двумя пересечениями была рассмотрена ранее, в разделе 2.6.

В рамках поставленной цели исследования – подтверждения максимума пропускной способности полосы при соблюдении АТС на перегоне рекомендуемой скорости, расчёты были проведены по упрощенному алгоритму. Так, расчёт рекомендуемой скорости проведём из предположения неразрывности двух частей транспортного потока: выезда очереди АТС с пересечения и проезда пересечения потоком АТС, подъезжающим к пересечению. При этом подъезжающая группа АТС не снижает своей скорости при проезде пересечения – это условие реализации «зелёной волны» в движении АТС:

$$V_{rek} = \frac{3,6 \cdot L_n}{t_{cd} - t_1 + K_{tn}} \quad (3.1)$$

где V_{rek} – средняя скорость лидирующего АТС на перегоне, км/ч; L_n – длина перегона до следующего пересечения, м; t_{cd} – время сдвига разрешающего сигнала

светофора, с; t_1 – время, затраченное лидирующим АТС, который был первым в очереди, начиная с момента включения разрешающего сигнала светофора на пересечении, предшествующем исследуемому участку УДС, и заканчивая его достижением дальней границы пересекаемой проезжей части, с (2.11); Ktn – время разъезда очереди внегрупповых автотранспортных средств из n АТС, с.

Максимальное значение P_c достигается при $V_{cp} = V_{rek}$ и зависит только от n – количества внегрупповых АТС в очереди перед следующим пересечением:

$$P_c = \max(n) = n + \frac{t_g - K_t \cdot n}{T_{УВП}^{a_i}} = f(n) \quad (3.2)$$

Если средняя скорость группы автотранспортных средств на перегоне больше рекомендуемой ($V_{cp} > V_{rek}$): в этом случае подъезжающая с группой АТС будет притормаживать и встраиваться в очередь ещё не выехавших с пересечения внегрупповых АТС, увеличивая её. Неразрывность ТП соблюдается, но присутствует торможение АТС, подъезжающих с перегона. Наличие «зелёной волны» в движении АТС не сохраняется.

Общая расчётная формула пропускной способности полосы движения при наличии очереди внегрупповых АТС любой размерности перед пересечением, выглядит следующим образом:

$$P_c = 5 + \frac{t_g - K_t 5}{T_{УВП}^{a_i}} = const, \quad \text{если } V_{cp} > V_{rek} \quad (3.3)$$

Для параметров анализируемого пересечения, с учётом данных таблицы 3.4, значение константы равно:

$$P_c = 5 + \frac{t_g - Kt5}{T_{УВП}^{a_i}} = 5 + \frac{45 - 9,40}{1,45} = 29,55 \quad (3.5)$$

Соответствующее графическое представление расчётных данных отражено на рисунке 3.14.

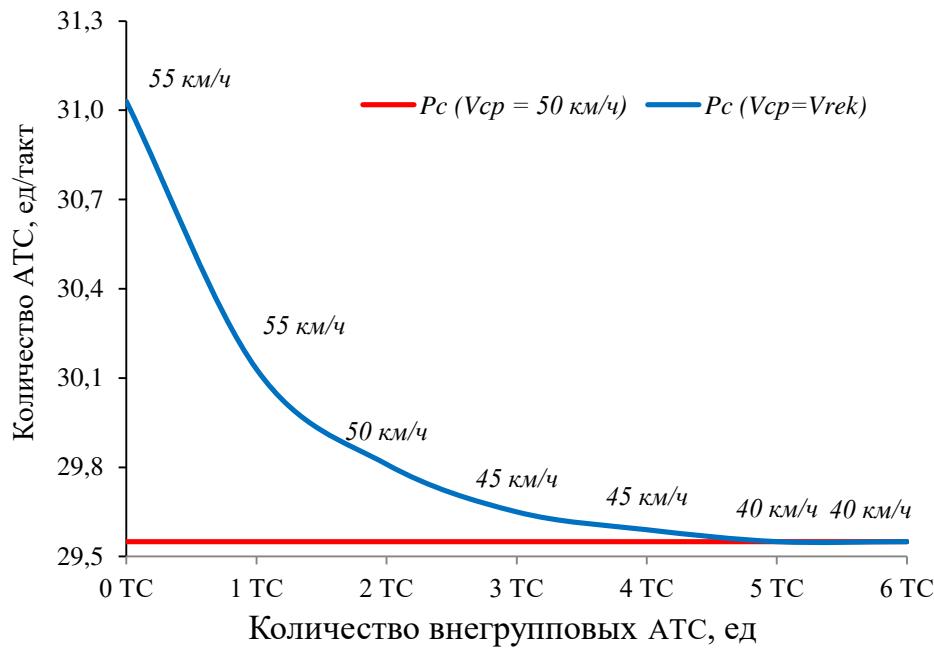


Рисунок 3.14 – Пропускная способность полосы движения при различном размере очереди внегрупповых АТС

Как следует из рисунка 3.14, для анализируемой полосы движения АТС зависимость рекомендуемой скорости для группы АТС на перегоне носит ниспадающий характер. Наибольшее увеличение пропускной способности полосы движения АТС наблюдается при отсутствии очереди внегрупповых АТС перед светофором, а также до 4 внегрупповых АТС и при соблюдении группой АТС на перегоне между пересечениями рекомендуемой скорости движения. В этом случае происходит увеличение пропускной способности до 1–5%. Эта ситуация соответствует идеальному движению АТС – «зелёная волна». Согласно данным рисунка 3.11, на исследуемой полосе движения в течение суток преобладают очереди длиной не более 2 внегрупповых АТС. Данное наблюдение согласуется с результатами расчетов пропускной способности, подтверждая эффективность примененной методики и реализуемость режима «зелёной волны» в реальных условиях.

Таким образом, цель исследования достигнута – расчётным методом по проявленным формулам подтверждена оптимальность пропускной способности полосы движения при соблюдении АТС рекомендуемой средней скорости.

3.5.3 Анализ задержек автотранспортных средств на пересечении ул. Зальцмана – ул. 2-я Эльтонская

Цель исследования – показать снижение времени задержки лидирующего автотранспортного средства в группе при соблюдении рекомендуемой средней скорости (рисунок 3.14).

Необходимо рассчитать время задержки лидирующего автотранспортного средства (t_3), при свободном движении (V_{cp}), рекомендуемой скорости (V_{rek}) и количества внегрупповых АТС (n) в очереди перед стоп-линией на пересечении.

Параметры эксперимента для выбранного пересечения:

- количества внегрупповых АТС (до 5 ед.), так это максимальное количество внегрупповых АТС на исследуемой полосе движения (рисунок 3.11);
- фазовый сдвиг зелёного сигнала относительно предыдущего пересечения 36 с;
- длина перегона между пересечениями 445 м.

Исходными данными в расчётах выступают замеры времени преодоления очередью АТС пересечения, усреднённые значения которых представлены в таблице 3.4. Графическое представление снижения времени задержек лидирующего автотранспортного средства при соблюдении рекомендуемой скорости отражено на рисунке 3.15.

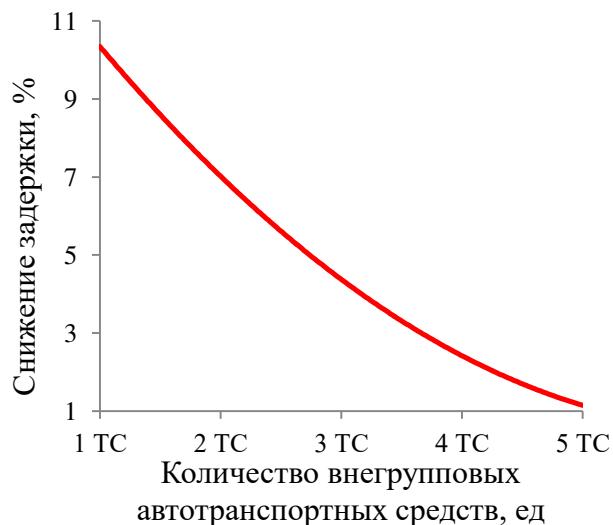


Рисунок 3.15 – Снижение задержки лидирующего АТС, %

Как видно из рисунка 3.15, величина задержки лидирующего АТС находится в прямой зависимости от количества внегрупповых АТС. Движение со свободной скоростью (60 км/ч) увеличивает задержки, величина которых превышает показатели при оптимальном режиме до 10%, что обусловлено преждевременным прибытием группы АТС к пересечению и необходимостью ожидания разрешающего сигнала светофора.

Таким образом, в ходе исследования была достигнута поставленная цель: экспериментально подтверждено снижение времени задержки лидирующего АТС при соблюдении рекомендованного скоростного режима.

3.5.4 Экспериментальная верификация безостановочного проезда пересечения ул. Зальцмана – ул. 2-я Эльтонская

На данном пересечении была осуществлена верификация математической модели с использованием АТС экспериментальной группы, в рамках эксперимента была подтверждена возможность реализации безостановочного проезда АТС при соблюдении рекомендуемой средней скорости, согласованной с параметрами светофорной координации (рисунок 3.16).



Рисунок 3.16 – Верификация модели на пересечении
ул. Зальцмана – ул. 2-я Эльтонская

На рисунке 3.16 АТС экспериментальной группы при 3 внегрупповых АТС, соблюдая рекомендуемую скорость, проезжает пересечение без остановки.

Было проведено 20 регистраций проезда лидирующего АТС при наличии 3-х внегрупповых АТС на полосе перед светофором. В 85% наблюдений лидирующее АТС, попадающее в обзор видеокамеры, встраивалось в непрерывный поток АТС и двигалось со скоростью, близкой к рекомендуемой $V_{rek}=45$ км/ч. Статистические параметры скорости лидирующего автотранспортного средства: средняя скорость 45,8 км/ч при стандартном отклонении в 2,1 км/ч. Эти значения определяют доверительный интервал при уровне надежности в 95% ($V_{min}=44,78$ км/ч; $V_{max}=46,76$ км/ч), в который попадает рекомендуемая скорость. Что говорит о корректном модельном расчёте рекомендуемой скорости для движения групповых АТС.

В 15% наблюдений лидирующее АТС не вписалось в неразрывный поток с тремя внегрупповыми АТС, что было обусловлено их скоростью движения на перегоне, меньшей, чем рекомендуемая. Эти наблюдения были исключены из проведённой статистической обработки, но тем не менее, подтверждают желательность движения со скоростью, не меньшей рекомендуемой.

В ходе исследования было установлено, что соблюдение расчетного скоростного режима, соответствующего времени сдвига фазы светофора, обеспечивает минимизацию задержек и исключает необходимость остановки перед стоп-линией. Полученные данные визуализируют зависимость между соблюдением рекомендуемой скорости и эффективностью проезда пересечения, что подтверждает адекватность разработанной математической модели и корректность расчетных параметров организации движения.

Результаты эксперимента, полученные с участием АТС экспериментальной группы, свидетельствуют о возможности практической реализации принципа «зеленой волны» на городской дорожной сети с учетом индивидуальных характеристик конкретной полосы движения АТС.

3.6 Выводы по разделу 3

1. Подтверждение адекватности математической модели безостановочного проезда пересечения группой АТС.

- экспериментальные исследования, включая моделирование в PTV VISSIM, имитационную модель Extended IDM with Speed Adaptation (EIDM-SA) и натурные испытания, верифицировали разработанную математическую модель безостановочного проезда пересечения группой АТС.
- расхождения между теоретическими расчетами пропускной способности и результатами имитационного моделирования не превысили 5%, что подтверждает точность модели и её применимость для прогнозирования параметров транспортного потока в реальных условиях.

2. Оптимальные параметры организации дорожного движения с учётом задержек групповых АТС:

- наибольшее влияние на задержки оказывает количество внегрупповых АТС: при очереди 5 внегрупповых АТС задержки возрастают до 10%, а пропускная способность стабилизируется на уровне 29,55 ед/такт независимо от скорости группы АТС.

3. Эффективность безостановочного проезда группы АТС.

Апробация математической модели безостановочного проезда на пересечении ул. Зальцмана – ул. 2-я Эльтонская показала, что соблюдение рекомендуемой скорости обеспечивает проезд без остановок с вероятностью 85% в условиях реального трафика.

5. Научно-методическое обеспечение исследований:

- разработан алгоритм автоматического определения начала разрешающей фазы светофора с точностью ± 1 с.
- подтверждена линейная зависимость времени разъезда очереди от количества внегрупповых АТС: увеличение очереди с 2 до 5 ТС удваивает время разъезда (с 4,68 до 9,40 с) и пропорционально увеличивает задержки.

– внедрение нейросетевых методов обработки видео позволило исключить субъективный фактор при анализе очередей внегрупповых АТС и точно оценить временные параметры задержек.

Таким образом, комплексный подход (теоретическое моделирование – микромоделирование – натурные эксперименты) доказал эффективность модели и позволил количественно оценить влияние различных факторов на задержки АТС и пропускную способность пересечения. Полученные результаты позволяют перейти к разработке методики организации безостановочного проезда группы АТС с минимальными задержками.

ГЛАВА 4. МЕТОДИКА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТНЫМИ РЕЖИМАМИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

Данный раздел посвящен разработке методике внедрения системы управления скоростными режимами транспортных потоков, основанных на результатах теоретического моделирования и экспериментальной верификации. В рамках главы формулируются конкретные предложения по организации дорожного движения с использованием динамических знаков рекомендуемой скорости и мобильного приложения, обеспечивающих синхронизацию транспортных потоков с режимом работы светофоров без изменения светофорных циклов. Кроме того, проводится оценка экологической и экономической эффективности предлагаемых решений, включая расчет снижения выбросов вредных веществ и сокращения расхода топлива за счет минимизации задержек группы АТС.

4.1 Методика по внедрению системы управления скоростными режимами транспортных потоков

Цель рекомендаций – обеспечение внедрения системы управления скоростными режимами транспортных потоков в условиях реальной городской дорожной сети с использованием современных технических средств без вмешательства в работу светофорных объектов.

Система основана на синхронизации скорости АТС с временными параметрами светофорного регулирования через динамические дорожные знаки и мобильное приложение. Это позволяет минимизировать задержки, сократить расход топлива и снизить негативное воздействие на окружающую среду без изменения существующих режимов работы светофоров.

Методика включает:

- 1) методы расчета и отображения рекомендуемой скорости;

- 2) требования к техническим средствам и программному обеспечению;
- 3) ограничения применения системы и условия ее эффективности.

Реализация предложенных мер направлена на повышение эффективности ОДД и комфорта участников дорожного движения.

Основные этапы по внедрению безостановочного проезда группы АТС:

1. Сбор и анализ исходных данных. Сбор исходных данных выполняется по следующим направлениям:

1.1 Режимы работы светофоров:

- длительность цикла регулирования;
- длительность основных тактов фаз;
- временные сдвиги светофорной сигнализации смежных светофоров.

1.2 Геометрические параметры участка улично-дорожной сети:

- длина перегонов между пересечениями;
- ширина пересекаемого пресечения, с которого стартует группа АТС.

1.3 Состояние дорожного покрытия. Оценка качества дорожного покрытия на пересечениях.

2. Организация системы мониторинга транспортных потоков в реальном времени. Для получения актуальных данных о параметрах движения ТП осуществляется подключение к системам видеонаблюдения, установленным на пересечениях. На основе получаемого видеопотока в режиме реального времени работает алгоритм компьютерного зрения (обученная нейронная сеть), предназначенный для решения следующих задач:

- детекция и классификация АТС;
- трекинг (отслеживание траекторий движения) АТС;
- расчет параметров транспортного потока: количество внегрупповых АТС, состав потока (по типам АТС).

3. Установка динамических знаков рекомендуемой скорости «6.2».

3.1 Размещение дорожных знаков. Установить на подходах к пересечению динамические дорожные знаки «6.2», отображающие рекомендуемую скорость движения, рассчитанную по математической модели (2.31) (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Динамический дорожный знак 6.2

Расстояние видимости знака должно быть не менее 100 м в соответствии с ГОСТ Р 52289-2019 «Технические средства организации дорожного движения» [76].

3.2 Адаптация скорости к условиям движения. Корректировка рекомендуемой скорости группы АТС в реальном времени возможна в зависимости от:

- количества внегрупповых АТС в очереди (на основе данных видеокамер);
- погодных условий и качества дорожного покрытия (коэффициент динамики разъезда очереди, учитывающий состояние дорожного покрытия (k_{dr}) (табл. 2.9));
- наличии в очереди АТС категорий II и III (коэффициент учитывающий категорию наиболее инерционного в очереди ТС ($k_{kts} = 1,64$)).

4. Разработка и внедрение мобильного приложения

4.1 Функционал приложения:

- отображение рекомендуемой скорости для безостановочного проезда конкретного пересечения;

- уведомления о приближении к пересечению и текущем режиме работы светофора;

- интеграция с навигационными системами (например, Яндекс.Карты, Google Maps).

4.2 Расчет данных для приложения. Использовать алгоритм расчета рекомендуемой скорости на основе:

- длины перегона;
- времени сдвига фаз;
- данных о очереди внегрупповых АТС в реальном времени (обученная нейронная сеть).

4.1.1 Практическая реализация результатов исследования

Для реализации результатов исследования было разработано мобильное приложение для расчёта скорости безостановочного проезда регулируемых перекрёстков «Зелёная волна 2.0» (Приложение 4) [88].

Современное программное обеспечение, использующее интеграцию геолокационных данных, режимов работы светофоров и информации о транспортных потоках, предназначено для вычисления оптимальной скорости движения АТС при приближении к регулируемым пересечениям с целью обеспечения их безостановочного проезда. Мобильное приложение в режиме реального времени анализирует текущие координаты автотранспортного средства, режимы светофорного сигнала и количество ожидающих АТС в очереди, предоставляя водителю рекомендации по корректировке скорости движения. Система способствует снижению времени простоя и повышению пропускной способности дорожной сети. Использование программного комплекса обеспечивает оптимальное и точное управление скоростным режимом в зависимости от динамики дорожной ситуации и режимов работы светофоров, повышая безопасность и эффективность транспортного потока.

Мобильное приложение было разработано для ОС Android (рисунок 4.2).

Оно состоит из одного экрана с отображением следующей информации:

- задержка в обработке данных;
- время последнего обновления данных;
- режим работы светофора;
- расстояние до пересечения на основе текущего местоположения смартфона;
- видеотрансляция;
- оптимальная скорость движения для безстановочного проезда пересечения.

а)



б)



Рисунок 4.2 – Мобильное приложение «Зеленая волна 2.0»

На рисунке 4.2 представлены скриншоты интерфейса мобильного приложения, демонстрирующие его функциональность в различных дорожных ситуациях.

На рисунке 4.2 (а) отображена ситуация, в которой зафиксированы внегрупповые АТС, ожидающие включения разрешающего сигнала светофора. Для данных условий система рассчитала и отобразила рекомендуемую скорость движения для группы автотранспортных средств, которая составляет 50 км/ч. На рисунке 4.2 (б) показана успешная реализация безостановочного проезда пересечения группой АТС. Кроме того, на изображении зафиксировано АТС экспериментальной группы, участие которого в натурных исследованиях подтверждает работоспособность предложенного алгоритма в реальных условиях.

Потенциальными потребителями мобильного приложения могут быть: водители АТС, а также организации, ответственные за управление дорожным движением и транспортной инфраструктурой (например, дорожные службы, органы управления трафиком).

4.1.2 Ограничения использования системы управления скоростными режимами транспортных потоков

На основе теоретических и экспериментальных исследований выявлены следующие ограничения и условия, при которых система управления скоростными режимами транспортных потоков может быть неэффективна или требовать корректировки:

1. *Ограничения, связанные с геометрией перегонов и улично-дорожной сети:*

1) Длина перегона. Система эффективна только при длине перегона более 300 м. На более коротких перегонах невозможно обеспечить безостановочный проезд из-за недостаточного расстояния для адаптации скорости. Эффективность системы безостановочного проезда снижается на перегонах длиной более 800

метров вследствие нарушения целостности группы АТС, что приводит к нарушению синхронизации с рекомендуемым скоростным режимом [4].

2) Только прямолинейное движение. Система применяется исключительно для полос с движением прямо. Для поворачивающих потоков требуются отдельные расчеты из-за изменения траектории и скорости.

2. Ограничения, связанные с режимом работы светофоров.

1) Время сдвига светофорной сигнализации близкое к координированному управлению ТП.

2) Система эффективна только при стабильном времени циклов светофора. Если светофоры работают в адаптивном режиме (например, изменяют длительность фаз в реальном времени), расчет рекомендуемой скорости становится некорректным.

3 Ограничения, связанные с ТП:

1) Высокая интенсивность движения АТС. В условиях часа пик, характеризующегося образованием заторов и значительным увеличением плотности ТП, система безостановочного проезда теряет свою эффективность вследствие формирования протяженных очередей АТС и физической невозможности обеспечения безостановочного проезда для всех автотранспортных средств.

2) Большое количество внегрупповых АТС. Если очередь внегрупповых автотранспортных средств превышает 8 единиц, рекомендуемая скорость снижается ниже 40 км/ч, что не рассматривается в методике безостановочного проезда.

4 Технические ограничения:

1) Точность оборудования. Погрешность динамических знаков и мобильного приложения не должна превышать ± 5 км/ч.

2) Задержки передачи данных. Задержки в обновлении информации о очереди внегрупповых ТС свыше 5–10 с делают систему неэффективной.

4.2 Экологическая эффективность системы

В рамках дальнейшего исследования планируется оценить экологическую эффективность предложенной модели безостановочного проезда пересечения группой АТС на экспериментальном пересечении (ул. Зальцмана – ул. 2-я Эльтонская) путём расчёта выбросов вредных веществ. Анализ будет сосредоточен на двух ключевых загрязнителях: оксиде углерода (CO) и взвешенных частицах (PM2.5), оказывающих наиболее значительное негативное воздействие на здоровье человека.

Сравнительный анализ расчётных значений выбросов CO и PM2.5 для текущего режима движения и режима, оптимизированного по рекомендуемой скорости (обеспечивающего безостановочный проезд), позволит количественно оценить экологический эффект от внедрения предложенной системы. Ожидается, что минимизация задержек и устранение режимов частых разгонов и торможений приведут к значительному снижению объёма вредных выбросов в атмосферу на рассматриваемом пересечении.

Исходные данные для расчёта, полученные в ходе экспериментальных исследований (раздел 3), включают:

- режим работы светофора экспериментального пересечения: длительность циклов (84 с), разрешающих (45с) и запрещающих тактов (36 с), времени сдвига светофорной сигнализации (36 с);
- скоростные характеристики ТП: среднюю скорость группы АТС (40-60 км/ч), время разъезда очереди внегрупповых АТС (таблица 3.4);
- продолжительность остановок на запрещающий сигнал светофора и времени ожидания разъезда очереди внегрупповых АТС (таблица 3.4);
- количество внегрупповых: 2 ед. Анализ данных, полученных в ходе суточного мониторинга ТП, показал, что средняя длина очереди на полосе движения составляет 2 внегрупповых АТС (рисунок 3.11).
- длину перегона (445 м).

Методология расчёта выбросов загрязняющих веществ будет основываться на положениях ГОСТ Р 56162-2019 «Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу» [80]. Расчёт суммарных разовых выбросов i -го вещества (CO или PM2.5) для полосы движения на экспериментальном пересечении будет производиться по формуле:

$$M_{\Pi_i}^C = \frac{1}{1200} (M_{\Pi_i}^3 + M_{L_i}^P) \quad (4.1)$$

где $M_{\Pi_i}^3$ - выброс i -го загрязняющего вещества АТС конкретного направления движения в районе пересечения при запрещающих движение сигналов светофора за 20-минутный период дополнительного обследования г; $M_{L_i}^P$ - выброс i -го загрязняющего вещества АТС конкретного направления движения в районе пересечения при разрешающих движение сигналов светофора за 20-минутный период.

Выбросы в режиме остановки ($M_{\Pi_i}^3$) будут рассчитываться будут рассчитываться с учётом средней очереди 2 ед. (рисунок 3.11):

$$M_{\Pi_i}^3 = \frac{P_{\Pi}}{60} \sum_1^{N_{\Pi}} \sum_k^k (M_{\Pi_{i,k}} \cdot G_{k,\Pi}) \quad (4.2)$$

где P_{Π} - продолжительность действия запрещающего движение сигнала светофора (включая желтый цвет) в течение 20 мин. с; N_{Π} - количество циклов действия запрещающего движение сигнала светофора за 20-минутный период времени; $M'_{\Pi_{i,k}}$ - удельный выброс i -го загрязняющего вещества АТС, k -й группы, находящихся в очереди у запрещающего движение сигнала светофора, г/мин; $G_{k,\Pi}$ - количество АТС i -й группы, находящихся в очереди в районе пересечения в конце каждого цикла действия запрещающего движение сигнала светофора.

Выбросы в режиме движения ($M_{L_i}^P$) будут определяться с учётом пройденного расстояния, количества АТС и поправочного коэффициента на скорость:

$$M_{L_i}^P = L^{\Pi} \sum_1^{N_{\Pi}} \sum_k^k (M_{k,i}^L \cdot G_{k,p} \cdot r_{V_{k,i}}) \quad (4.3)$$

где L^{Π} - расстояние, проходимое АТС в одном направлении при разрешающих движение сигналах светофора в течение 20 мин, включающее в себя длину очереди АТС, образуемой при запрещающем движение сигнале светофора, и длину соответствующей зоны пересечения, км; $N'_ц$ - количество циклов работы разрешающего движение сигнала светофора в течение 20 мин; k – число групп АТС; $M_{k,i}^L$ - удельный пробеговый выброс i -го загрязняющего вещества АТС k -й группы, г/км; $G_{k,p}$ - количество АТС каждой k -й группы, проходящих через зону пересечения в одном направлении при разрешающем движение сигнале светофора; $r_{V_{k,i}}$ - поправочный коэффициент, учитывающий среднюю скорость движения потока автотранспортных средств $V_{k,i}$ км/ч, на конкретной автомобильной дороге (или ее участке).

Результаты расчетов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сравнение выбросов загрязняющих веществ от группы АТС при разных скоростных режимах за рабочий день

$V_{cp} = 60$, км/ч			$V_{cp} = V_{rek}$			ΔM_{CO+PM}
CO	PM2.5	M_{CO+PM}	CO	PM2.5	M_{CO+PM}	
0,425	0,0082	0,4332	0,412	0,0025	0,4145	0,02 (4%)

где M_{CO+PM} – сумма выбросов CO и PM2.5, кг/сутки; ΔM_{CO+PM} – разность выбросов CO и PM2.5 между двумя режимами, кг/сутки.

Проведенный расчет показывает значительное снижение суммарных выбросов загрязняющих веществ (CO и PM2.5) при соблюдении групповыми АТС рекомендуемой скорости движения. Как видно из данных таблицы 4.1, разница в выбросах составляет 0,02 кг за сутки (4%).

Таким образом, проведенный расчет экологической эффективности наглядно демонстрирует, что оптимизация транспортных потоков обеспечивает комплексный положительный эффект, выражющийся не только в повышении пропускной способности пересечений и сокращении временных задержек АТС, но и в существенном улучшении экологической ситуации в городской среде за счет снижения вредных выбросов.

4.3 Экономическая эффективность системы

Оценка экономической эффективности является неотъемлемой частью комплексного анализа предлагаемой системы организации безостановочного проезда пересечений. Основное внимание уделяется анализу снижения расхода топлива, являющегося прямым следствием минимизации времени задержек АТС и устранения режимов частых разгонов и торможений в транспортном потоке. Проведенные расчеты базируются на экспериментальных данных, полученных в ходе натурных исследований и имитационного моделирования, что обеспечивает достоверность и практическую значимость результатов.

4.3.1 Методика расчета расхода топлива автотранспортных средств

Цель методики – сравнение расхода топлива легкового АТС на пересечении ул. Зальцмана – ул. 2-я Эльтонская в двух сценариях:

- безостановочный проезд (равномерное движение без торможения перед пересечением).
- проезд с остановкой (торможение, ожидание зеленого сигнала светофора и последующий разгон).

Для расчета расхода топлива АТС при движении без остановки и с остановками был использован следующий алгоритм:

1. Исходные данные. Для оценки использованы усредненные параметры:
 - легковой АТС (бензин, 1,6 л). По данным аналитического агентства Автостат самое распространённое легковое автотранспортное средство в России с двигателем 1,6 л [89];
 - городской цикл: 9 л/100 км. Для расчета принят средний расход топлива при движении в городских условиях, согласно методике Распоряжения Минтранса России от 14.03.2008 № АМ-23-р [90];
 - холостой ход: 0,8 л/час [90];

– дополнительный расход при разгоне: 15-20% к движению [90].

2. Расход топлива АТС при безостановочном проезде пересечения лидирующим АТС. При безостановочном проезде пересечения группой АТС расход топлива определяется для режима равномерного движения без дополнительных затрат на разгоны и торможения.

Расход топлива для одного автотранспортного средства при безостановочном проезде рассчитывается по формуле:

$$Q_{безост} = \frac{q_{баз}}{100} \cdot L_{п} \quad (4.4)$$

где $q_{баз}$ – норма расхода топлива при движении в городских условиях, л/100 км; $L_{п}$ – длина перегона между пересечениями, км.

Таким образом, средний расход топлива АТС при безостановочном проезде пересечения за один цикл составляет 0,12 л. Данный показатель является базовым для сравнения с режимом движения с остановками и последующими разгонами.

3. Расход топлива АТС при проезде пересечения с остановкой и последующим разгоном. Для АТС, осуществляющего проезд регулируемого пересечения с остановкой перед стоп-линией и последующим разгоном, расход топлива формируется из трех компонентов: движения до точки остановки, работы двигателя на холостом ходу в режиме ожидания и энергозатрат на разгон после возобновления движения:

1) Движение до точки остановки. Расход топлива на движение до точки остановки рассчитывается по формуле:

$$Q_{движ} = \frac{q_{баз}}{100} \cdot L_i \quad (4.5)$$

где L_i – длина участка до остановки ТС лидирующей группы, км.

2) Работа на холостом ходу. Расход топлива на холостой ход рассчитывается по формуле:

$$Q_{хх} = q_{хх} \cdot t_{хх} \quad (4.6)$$

где $q_{хх}$ – норма расхода топлива на холостом ходу, л/ч; $t_{хх}$ – время работы двигателя на холостом ходу, ч.

3) Дополнительный расход при разгоне АТС. Учитывается повышенное потребление топлива в режиме разгона, составляющее 20% от расхода на движение до остановки:

$$Q_{раз} = Q_{ост} \cdot 0,2 \quad (4.7)$$

Суммарный расход топлива для режима с остановкой:

$$Q_{ост} = Q_{ост} + Q_{хх} + Q_{раз} \quad (4.8)$$

Таким образом, средний расход топлива автотранспортных средств при проезде пересечения с остановкой и последующим разгоном по полосе за один цикл составляет 0,05–0,16 л, что на 22% превышает показатель безостановочного проезда (0,04–0,12 л). За сутки это приводит к перерасходу 6,86–27,44 л топлива групповых автотранспортных средств на полосу движения.

4.3.2 Экономический эффект от снижения расхода топлива автотранспортных средств

Экономический эффект от внедрения системы безостановочного проезда пересечений рассчитывается на основе снижения расхода топлива автотранспортных средств. В качестве расчетной стоимости топлива принимается средняя цена автомобильного бензина АИ-95, составляющая 61,34 руб./л (по состоянию на сентябрь 2025 года) [84].

На полосе движения пересечения ул. Зальцмана – ул. 2-я Эльтонская внедрение системы безостановочного проезда позволяет достичь экономии для групповых АТС:

- 420,79 – 1 683,50 руб. за сутки;
- 104 – 415 тыс. руб. в год.

Данные показатели демонстрируют значительный экономический эффект от внедрения системы безостановочного проезда на исследуемом пересечении.

4.4 Выводы по разделу 4

Проведенные исследования в рамках данного раздела позволили разработать методику управления скоростными режимами транспортных потоков и дать количественную оценку ее экологической и экономической эффективности. На основе результатов теоретического моделирования и экспериментальных данных были сформулированы конкретные предложения по организации дорожного движения, включая использование динамических дорожных знаков и мобильного приложения для синхронизации транспортных потоков с работой светофоров.

Разработано и апробировано в ходе натурных экспериментов мобильное приложение «Зеленая волна 2.0», доказавшее возможность реализации системы информирования водителей о рекомендуемой скорости для безостановочного проезда группы АТС. Для широкого внедрения системы также предложена концепция использования динамических дорожных знаков 6.2, позволяющая реализовать систему без изменения существующих светофорных циклов.

Экологическая оценка выявила снижение выбросов СО и РМ2.5 на 4% за сутки благодаря организации безостановочного проезда группы автотранспортных средств.

Экономический эффект от внедрения системы на полосе движения экспериментального пересечения составляет до 1 683,50 руб. в сутки за счёт сокращения расхода топлива групповых АТС.

Результаты исследований демонстрируют, что предложенная система организации безостановочного проезда пересечения группой АТС представляет собой эффективное решение для повышения пропускной способности улично-дорожной сети, улучшения экологической ситуации и получения значительного экономического эффекта за счет снижения эксплуатационных расходов АТС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлены и количественно оценены закономерности влияния временных параметров разъезда очереди внегрупповых автотранспортных средств на пропускную способность регулируемых пересечений. Установлена зависимость времени разъезда от ускорения первого АТС в очереди, определяемого состоянием и качеством дорожного покрытия. Введены корректирующие коэффициенты: динамики разъезда очереди и учета категории автотранспортного средства. Практическая апробация показала, что увеличение ускорения первого внегруппового автотранспортного средства приводит к снижению удельного времени проезда на 31%.

2. Разработана математическая модель для определения средней скорости группы автотранспортных средств, обеспечивающей безостановочный проезд регулируемого пересечения. Модель интегрирует ключевые параметры: длину перегона, время сдвига светофорной сигнализации, количество и категорийный состав и динамические показатели внегрупповых автотранспортных средств. Для комплексной оценки совместного воздействия факторов использован метод нечёткой логики, позволяющий учесть вероятностный характер изменения входных параметров в условиях неопределённости. Верификация модели подтвердила ее адекватность с отклонением прогнозируемых показателей от экспериментальных данных не более чем на 5%.

3. На основе комплексного факторного анализа с применением методов моделирования (PTV VISSIM), имитационного моделирования (Extended IDM with Speed Adaptation) и теоретических исследований выявлены оптимальные скоростные режимы движения групповых автотранспортных средств. Установлено, что максимальная эффективность системы достигается на перегонах в диапазоне от 300 до 400 метров при скорости движения автотранспортных средств 50 км/ч, что позволяет снизить задержки до 9%.

4. Установлено, что реализация безостановочного проезда групповых автотранспортных средств в условиях светофорного регулирования приводит к снижению времени задержки по сравнению со свободным движением до 12–23%.

5. Разработаны и предложены к внедрению практические решения: мобильное приложение «Зеленая волна 2.0» и алгоритм работы динамических дорожных знаков, позволяющие реализовать безостановочный проезд. Практическая значимость работы подтверждается расчетами, указывающими на снижение расхода топлива до 22% и сокращение выбросов загрязняющих веществ до 4%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортные системы крупных городов. Анализ режимов работы на примере города Перми : учебное пособие / М. Р. Якимов. – Пермь : ПНИПУ, 2008. – 184 с.
2. Транспортные системы городов и регионов : учебное пособие / Э. А. Сафонов. – Омск: СибАДИ, 2019. – 381 с.
3. Врубель Ю.А. Организация дорожного движения. – Минск: Фонд БДД, 1996. – 634с.
4. Технические средства организации дорожного движения: учебник для вузов / Ю. А. Кременец, М.П. Печерский, М.Б. Афанасьев. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 279 с.
5. Проектирование регулируемых пересечений: учебное пособие / А.Г. Левашев, А.Ю. Михайлов, И.М. Головных. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 208 с.
6. Афанасьев, М.Б. Условия введения различных режимов регулирования дорожного движения / М.Б. Афанасьев и др. - М.: Изд-во ВНИИ БД МВД СССР, 1976. - 319 с.
7. Врубель, Ю. А. О потоке насыщения / Ю. А. Врубель. Белорус. политех. ин-т. – Минск, 1988.
8. Капитанов В.Т. Шауро С.В. К вопросу о транспортных задержках на изолированном перекрестке. Труды ВНИИ БД МВД СССР, 1978, вып.3., с. 65 - 74.
9. Клинковштейн, Г. И. Организация дорожного движения / Г. И. Клинковштейн, М. Б. Афанасьев. – М.: Транспорт, 1997. – 231 с.
10. Организация и безопасность дорожного движения: учебник / В.И. Коноплянко, О.П. Гудоян, В.В. Зырянов, А.В.Косолапов. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 1998. – 236с.
11. Организация и безопасность дорожного движения: учебное пособие для студ.высш. учеб. заведений / И.Н. Пугачёв, А.Э. Горев, Е.М. Олещенко. – М.: Издательскийцентр «Академия», 2009. – 272 с.

12. Технические средства организации дорожного движения: учебное пособие / В. Л. Жданов. – Кемерово: КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2017. – 267 с.
13. Основы транспортного моделирования: практическое пособие / А.Э. Горев, К. Бёттгер, А.В. Прохоров, Р.Р. Гизатуллин. – СПб.: ООО «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2015. – 168 с.
14. Володина, Ю. И. Исследование возможности моделирования светофорного регулирования сложного перекрестка в среде AnyLogic / Ю. И. Володина, Н. О. Сергеев, А. В. Затонский // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2025. – Т. 25, № 2. – С. 19-32. – DOI 10.14529/ctcr250202. – EDN LZRDZ.
15. Евтюков, С. А. Исследование подсистемы выявления инцидентов интеллектуальной транспортной системы / С. А. Евтюков, Б. В. Лукашов // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – № 1(90). – С. 136-142. – DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-1-136-142. – EDN SZFXXI.
16. Анализ параметров оценки улично-дорожной сети / К. А. Паршакова, В. Н. Карамышев, Н. Н. Якунин, Н. В. Якунина // Прогрессивные технологии в транспортных системах : Материалы XVIII международной научно-практической конференции, Оренбург, 15–17 ноября 2023 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2023. – С. 344-350. – EDN MNWBYA.
17. Развитие архитектуры интеллектуальных транспортных систем / Е. О. Андреев, С. В. Жанказиев, В. В. Зырянов, А. С. Павлов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2024. – Т. 18, № 1. – С. 38-43. – DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-1-38-43. – EDN HNTJMK.
18. Хань, М. Исследование алгоритма распределения дорожного движения в крупномасштабной дорожной сети на основе оптимизации распределения транспортных потоков / М. Хань, В. В. Зырянов, И. В. Топилин // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-1(88). – С. 3-12. – DOI 10.33979/2073-7432-2025-1-1(88)-3-12. – EDN KNJLWV.

19. Жанказиев, С. В. Концепция комплексных схем организации дорожного движения нового поколения / С. В. Жанказиев, М. В. Гаврилюк, Ж. Б. у. Агзамов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2025. – № 2(81). – С. 51-61. – EDN UNYSL.
20. Хейт, Ф. Математическая теория транспортных потоков / Ф. Хейт. – М.: Мир, 1966. – 286 с.
21. Иносэ, Х. Управление дорожным движением / Х. Иносэ, Т. Хамада; под ред. М.Я. Блинкина; пер. с англ. -М.: Транспорт, 1983. – 248 с.
22. ОДМ 218.2.020-2012. Методические рекомендации, по оценке пропускной способности автомобильных дорог. – М.: ФГУП «ИНФОРМАВТОДОР», 2012. 148с.
23. Дрю, Д. Р. Теория транспортных потоков и управление ими / Д. Р. Дрю; пер. с англ. Е. Г. Коваленко и Г. Д. Шермана; Под ред. чл.- кор. АН СССР Н. П. Бусленко. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.
24. Сильянов, В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В. В. Сильянов. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
25. Wardrop, J.G. Some theoretical aspects of road traffic research / J.G. Wardrop // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. – 1952. – Vol. 1, no. 5. – P. 767–768.
26. Webster F. V. Traffic Signals / F. V. Webster, B. M. Cobbe. – London: Road Research Technical Paper N56, HMSQ, 1966. – 111 p.
27. Андронов, Р. В. Моделирование транспортных пересечений городских улиц с адаптивным регулированием дорожного движения / Р. В. Андронов, Е. Э. Леверенц, Т. В. Мальцева // Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика – Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2022. – Т. 8, № 1(29). – С. 144-160.
28. Морозов, Г. Н. Влияние остаточной автотранспортной очереди на процесс движения автомобилей на городских регулируемых пересечениях / Г. Н. Морозов,

- Б. В. Морозов, А. А. Фадюшин, Ш. М. Мерданов // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 1 (107). – С. 89–97.
29. Shepelev, V. The Use of Multi-Sensor Video Surveillance System to Assess the Capacity of the Road Network / V. Shepelev, S. Aliukov, K. Nikolskaya, A. Das, I. Slobodin // Transport and Telecommunication. – 2020. – Vol. 21, No. 1. – P. 15–31.
30. Шепелев, В. Д. Прогнозирование и управление пропускной способностью полосы на регулируемом перекрестке / В. Д. Шепелев, В. А. Городокин, И. С. Слободин, К. В. Хазюков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. – 2021. – Т. 15, № 2. – С. 182–189.
31. Branston, D. Some factors affecting the capacity of signalized intersection / D. Branston // Traffic Engineering and Control. – 1979. – Vol. 20, No. 8-9. – P. 390–396.
32. Branston, D. The estimation of saturation flow, effective green time and passenger car equivalents at traffic signals by multiple liner regression / D. Branston, H. J. Van Zulien // Transportation Research. – 1987. – Vol. 12. – P. 47–53.
33. Stokes, R. W. Comparison of saturation flow rates at signalized intersections / R. W. Stokes // Institute of Transportation Engineers. – 1988. – Vol. 15, No. 11. – P. 15–20.
34. Viti, F. Probabilistic models for queues at fixed control signals / F. Viti, H. J. Van Zuylen // Transportation Research Part B. – 2010. – Vol. 44, No. 1. –P. 120–135.
35. Newell, G. F. Queues for a fixed-cycle traffic light / G. F. Newell // The Annals of Mathematical Statistics. – 1960. – Vol. 31. – P. 589–597.
36. Darroch, J. N. Queues for a vehicle-actuated traffic light / J. N. Darroch, G. F. Newell, R. W. J. Morris // Operations Research. – 1964. – Vol. 12. – P. 882–894.
37. Comert, G. Queue length estimation from probe vehicle location and the impacts of sample size / G. Comert, M. Cetin // European Journal of Operational Research. – 2009. – Vol. 197, No. 1. – P. 196–202.
38. Tan, C. Cycle-Based Queue Length Estimation for Signalized Intersections Using Sparse Vehicle Trajectory Data / C. Tan, J. Yao, K. Tang, J. Sun // IEEE

Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2021. – Vol. 22, No. 1. Art. no. 8924907. – P. 91–106.

39. Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Организация дорожного движения на регулируемых пересечениях. – М.: Росавтодор, 2017.
40. Highway Capacity Manual. Washington, DC: TRB, 2000. – 1134 p.
41. Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen. – Köln: FGSV-Verl, 2009.
42. Teply, S. Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections / S. Teply, D. I. Allingham, D. B. Richardson, B. W. Stephenson, J. W. Gough. – Toronto: Canadian Institute of Transportation Engineers, 2008.
43. Семенов, В. В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса / В. В. Семенов. – М.: Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2004. – 38 с.
44. AIMS eco – Realtime monitoring [Электронный ресурс]. URL: <https://aims.susu.ru/demo/dashboard/chelyabinsk/node/17/view> (дата обращения: 25.06.2025).
45. Fadina, O. Optimizing the speed of traffic flows taking into account the operating modes of traffic lights and environmental aspects / O. Fadina, V. Shepelev, A. Vorobyev // 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, Russian Federation: IEEE. – 2023. – P. 294–298.
46. Fadina, O. Creating Sustainable Urban Transportation Systems Through Innovative Traffic Management Strategies / O. Fadina, Z. Almetova, O. Ivanova, A. Vorobyev, G. Assanova // Advances in Ecology and Environmental Engineering. – 2024. – P. 75–85.
47. Швецов, В. И. Математическое моделирование загрузки транспортных сетей / В. И. Швецов, А. С. Алиев. – М.: Едиториал УРСС, 2003.
48. Моделирование дорожного движения: учебное пособие / А. В. Косолапов. – Кемерово: КузГТУ, 2012.

49. Akçelik, R. A queue model for HCM 2000 / R. Akçelik. – Vermont South, Australia: Technical Note ARRB Transport Research Ltd, 1998.
50. Erera, A. L. Simple, generalized method for analysis of traffic queue upstream of a bottleneck / A. L. Erera, T. W. Lawson, C. F. Daganzo // Transportation Research Record. – 1998. – Vol. 1646, No. 1. – P. 132–140.
51. Michalopoulos, P. G. An application of shock wave theory to traffic signal control / P. G. Michalopoulos, G. Stephanopoulos, G. Stephanopoulos // Transportation Research Part B. – 1981. – Vol. 15, No. 1. – P. 31–51.
52. Skabardonis, A. Real-time monitoring and control on signalized arterials / A. Skabardonis, N. Geroliminis // Journal of Intelligent Transportation Systems. – 2008. – Vol. 12, No. 2. – P. 64–74.
53. Ban, X. Real time queue length estimation for signalized intersections using travel times from mobile sensors / X. Ban, P. Hao, Z. Sun // Transportation Research Part C. – 2011. – Vol. 19, No. 6. – P. 1133–1156.
54. Wu, X. A shockwave profile model for traffic flow on congested urban arterials / X. Wu, H. X. Liu // Transportation Research Part B. – 2011. – Vol. 45, No. 10. – P. 1768–1786.
55. Newell, G. F. Queues for a fixed-cycle traffic light // The Annals of Mathematical Statistics. – 1960. – Vol. 31. – P. 589–597.
56. Darroch, J. N. Queues for a vehicle-actuated traffic light / J. N. Darroch, G. F. Newell, R. W. J. Morris // Operations Research. – 1964. – Vol. 12. – P. 882–894.
57. McNeill, D. R. A solution to the fixed cycle traffic light problem with compound Poisson arrivals // Journal of Applied Probability. – 1968. – Vol. 5, No. 3. – P. 624–635.
58. Schmotz, M. Das neue HBS 2015 / M. Schmotz // VSVI-Seminar. Technische Universität Dresden. – 2016.
59. Власов, А. А. Теория транспортных потоков: монография / А. А. Власов. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 124 с.

60. Comert, G. Queue length estimation from probe vehicle location and the impacts of sample size / G. Comert, M. Cetin // European Journal of Operational Research. – 2009. – Vol. 197, No. 1. – P. 196–202.
61. Zhao, S.-Z., Liang, S.-D., Ma, M.-H., Liu, H.-S., Zhu, Y.-G. Real-time queue length estimation at signalized intersection / S.-Z. Zhao, S.-D. Liang, M.-H. Ma, H.-S. Liu, Y.-G. Zhu // Jilin Daxue Xuebao (Gongxueban)/Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition). – 2016. – Vol. 46, No. 1. – P. 85 – 91.
62. Li, F. Real-time queue length estimation for signalized intersections using vehicle trajectory data / F. Li, K. Tang, J. Yao, K. Li // Transportation Research Record. – 2017. – Vol. 2623, No. 1. – P. 49–59.
63. Ramezani, M. Queue profile estimation in congested urban networks with probe data / M. Ramezani, N. Geroliminis // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. – 2015. – Vol. 30, No. 6. – P. 414–432.
64. Cheng, Y. An exploratory shockwave approach to estimating queue length using probe trajectories / Y. Cheng, X. Qin, J. Jin, B. Ran // Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations. – 2012. – Vol. 16, No. 1. – P. 12–23.
65. Comert, G. Simple analytical models for estimating the queue lengths from probe vehicles at traffic signals // Transportation Research Part B: Methodological. – 2013. – Vol. 55. – P. 59–74.
66. Алексиков, С. В. Повышение скорости автотранспорта на основе регулирования движения по "зеленой волне" / С. В. Алексиков, Г. И. Беликов, В. А. Пшеничкина, С. В. Волченко // Интернет-вестник ВолгГАСУ. – 2013. – № 2(27). – С. 27.
67. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах: учебное пособие / В. В. Петров. – Омск: СибАДИ, 2007. – 104 с.
68. Wu, W. Modelling and Simulation of Vehicle Speed Guidance in Connected Vehicle Environment / W. Wu, P. K. Li, Y. Zhang // International Journal of Simulation Modelling. – 2015. – P. 145–157.

69. Liu, Y. An arterial signal optimization model for intersections experiencing queue spillback and lane blockage / Y. Liu, G.-L. Chang // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2011. – Vol. 19, No. 1. – P. 130–144.
70. Little, J. D. MAXBAND: a versatile program for setting signals on arteries and triangular networks/ J. D. Little, M. D. Kelson, N. H. Gartner. – Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1981.
71. Wong, C. K. A lane-based optimization method for minimizing delay at isolated signal-controlled junctions / C. K. Wong, S. C. Wong // Journal of Mathematical Modelling and Algorithms. – 2003. – Vol. 2, No. 4. – P. 379–406.
72. Gartner, N. H. Implementation of the OPAC adaptive control strategy in a traffic signal network / N. H. Gartner, F. J. Pooran, C. M. Andrews // ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings. – 2001. – P. 195–200.
73. Robertson, D. I. Transyt: A Traffic network study tool / D. I. Robertson. – Crowthorne: Road Research Laboratory, 1969.
74. Head, K. L. The Rhodes Prototype: A description and some results / K. L. Head, P. B. Mirchandanai, S. Shelby. – Washington: Transportation Research Board, 1998.
75. Yu, X.H. Stochastic adaptive control model for traffic signal systems / X.-H. Yu, W. W. Recker // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2006. – Vol. 14, No. 4. – P. 263–282.
76. ГОСТ Р 52289-2004. Технические средства организации дорожного движения. Правила применения дорожных знаков, разметки, светофоров, дорожных ограждений и направляющих устройств. – М.: Стандартинформ, 2004.
77. Правила дорожного движения Российской Федерации. – М.: Эксмо, 2021. – 96 с.
78. Фадина, О. С. Повышение пропускной способности регулируемых перекрестков на основе синергии компьютерного зрения и адаптивного регулирования скорости / О. С. Фадина, В. Д. Шепелев, З. В. Альметова, Н. К. Горяев // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 1. – С. 28–39.

79. Viaene, S. A synthesis of fuzzy rule-based system verification / S. Viaene, G. Wets, J. Vanthienen // Fuzzy Sets and Systems. – 2000. – Vol. 113. – P. 253–265.
80. ГОСТ Р 56162-2019. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Метод расчета количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу потоками автотранспортных средств на автомобильных дорогах разной категории. – М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.
81. Khazukov, K. Real-time monitoring of traffic parameters / K. Khazukov, V. Shepelev, T. Karpeta, S. Shabiev, I. Slobodin, I. Charbadze, I. Alferova // Journal of Big Data. – 2020. – Vol. 7, No. 1.
82. Shepelev, V. Identification of distinguishing characteristics of intersections based on statistical analysis and data from video cameras / V. Shepelev, S. Aliukov, A. Glushkov, S. Shabiev // Journal of Big Data. – 2020. – Vol. 7, No. 1.
83. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616978 Российской Федерации. Интеллектуальная система мониторинга количества выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта в режиме реального времени (AIMS-Eco): № 2021616158: заявл. 27.04.2021: опубл. 04.05.2021 / В. Д. Шепелев, И. С. Слободин, К. В. Хазюков, И. Г. Чарбадзе; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет».
84. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665361 Российской Федерации. Интеллектуальная система мониторинга концентрации загрязняющих веществ от автотранспорта в режиме реального времени (AIMS Eco+): № 2023663998: заявл. 06.07.2023: опубл. 14.07.2023 / В. Д. Шепелев, И. С. Слободин; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет».
85. Malinauskas, R. The intelligent driver model: analysis and application to adaptive cruise control / R. Malinauskas // All Theses. – 2014.
86. Kesting, A. Enhanced Intelligent Driver Model to Access the Impact of Driving Strategies on Traffic Capacity / A. Kesting, M. Treiber, D. Helbing //

Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences.
– 2010. – Vol. 368. – P. 4585–4605.

87. Derbel, O. Modified Intelligent Driver Model / O. Derbel, P. Tamas, Z. Hossni, M. Benjamin, B. Michel // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. – 2012. – Vol. 40. – P. 53–60.

88. Фадина О. С. Мобильное приложение для расчёта скорости безостановочного проезда регулируемых перекрёстков (Зелёная волна 2.0): св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025666724 Рос. Федерация / В. Д. Шепелев, И. С. Слободин, О. С. Фадина; правообладатель ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)». – № 2025665317; заявл. 05.06.2025; зарегистрир. 27.06.2025.

89. Автостат: аналитическое агентство [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.autostat.ru/> (дата обращения: 13.09.2025).

90. Распоряжение Минтранса России от 14.03.2008 № АМ-23-р (ред. от 30.09.2021) «О введении в действие методических рекомендаций "Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте"» // КонсультантПлюс: справ.-правовая система. – Режим доступа: по подписке.

91. RussiaBase: цены на топливо в России [Электронный ресурс]. – URL: <https://russiabase.ru/> (дата обращения: 13.09.2025).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024689728

Интеллектуальная система мониторинга выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта в режиме реального времени (AIMS-Eco City)

Правообладатель: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (RU)**

Авторы: **Шепелёв Владимир Дмитриевич (RU), Слободин Иван Сергеевич (RU), Фадина Ольга Сергеевна (RU)**

Заявка № 2024688489

Дата поступления **26 ноября 2024 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **10 декабря 2024 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

должностная подпись и электронной подписью
Фамилия: Зубов Юрий Сергеевич
Имя: Юрий Сергеевич
Отчество: Юрий Сергеевич
должность: Руководитель

Ю.С. Зубов

Приложение Б

Продолж. такта, сек	Начало такта, сек	номер TC в очереди	тип TC	нагрузка			Время пересечения стоп-линии (задним бампером), мин/сек	Время задержки начала старта движения от начала такта, сек	Время от старта до пересечения стоп-линии, сек	Интервал до впереди стоящего TC, м	Di, м	ускорение в, м/сек2	время разъезда очереди t ₁ , сек	
				Длинна TC, м	расстояние до стоп- линии, м	Начало движения TC, мин/сек								
60	0:00:15	1	1	4,1	2,5	00:15,2	00:18	0,2	2,8	3	0	4,1	0,64	2,17
60	0:00:15	2	1	4,4	8	00:17,87	00:21,93	2,87	4,06	6,93	1	5,4	0,97	3,77
60	0:00:15	3	1	4,4	14	00:18,7	00:23,67	3,7	4,97	8,67	1,5	5,9	1,15	4,84
60	0:00:15	4	1	4,4	21,5	00:19,66	00:25,5	4,66	5,84	10,5	2,5	6,9	1,26	5,93
60	0:00:15	5	1	4,1	28	00:19,77	00:26,8	4,77	7,03	11,8	2	6,1	1,15	6,76
60	0:00:15	6	1	4,4	35	00:20,1	00:28,7	5,1	8,6	13,7	2	6,4	0,95	8,41
60	0:00:15	7	1	4,4	42	00:20,63	00:29,97	5,63	9,34	14,97	2,5	6,9	0,96	9,44
60	0:00:15	8	1	4,4	50	00:23,3	00:32,17	8,3	8,87	17,17	4	8,4	1,27	9,74
60	0:01:55	1	1	4,4	2	01:55,26	01:57,1	0,26	1,84	2,1	0	4,4	1,18	1,59
60	0:01:55	2	1	4,4	8	01:55,3	01:59,23	0,3	3,93	4,23	2,5	6,9	1,04	4,03
60	0:01:55	3	1	4,4	17	01:57,1	02:01,6	2,1	4,5	6,6	2	6,4	1,68	4,13
60	0:01:55	4	1	4,4	24	01:58,23	02:03,63	3,23	5,4	8,63	2,5	6,9	1,65	5,19
60	0:01:55	5	1	4,4	31	01:59,87	02:06,27	4,87	6,4	11,27	2	6,4	1,51	5,98
60	0:01:55	6	1	4,4	38	02:00,83	02:08	5,83	7,17	13	2	6,4	1,48	6,73
60	0:01:55	7	1	4,4	44	02:02,66	02:09,43	7,66	6,77	14,43	2	6,4	1,92	6,45
60	0:01:55	8	1	4,4	51	02:03,66	02:11,27	8,66	7,61	16,27	2,5	6,9	1,76	7,52
60	0:01:55	9	1	4,4	58	02:04	02:12,83	9	8,83	17,83	2,5	6,9	1,49	8,73
60	0:01:55	10	1	4,9	65	02:04,93	02:14,97	9,93	10,04	19,97	3	7,9	1,29	10,61
60	0:01:55	11	1	4,4	73	02:05,9	02:16,2	10,9	10,3	21,2	2	6,4	1,38	9,76
60	0:01:55	12	1	4,4	82	02:06,77	02:18,77	11,77	12	23,77	4	8,4	1,14	12,84
60	0:01:55	13	1	4,4	91	02:10,37	02:20,4	15,37	10,03	25,4	4	8,4	1,81	10,63
60	0:03:34	1	1	4,1	3	02:38,37	02:40,7	4,37	2,33	6,7	0	4,1	1,11	1,65
60	0:03:34	2	1	4,4	8	02:38,26	02:42,5	4,26	4,24	8,5	3	7,4	0,89	4,47
60	0:03:34	3	1	4,1	19	02:38,77	02:44,7	4,77	5,93	10,7	4	8,1	1,08	5,72
60	0:03:34	4	1	4,4	24	02:39,7	02:45,77	5,7	6,07	11,77	1	5,4	1,30	5,21
60	0:03:34	5	1	4,4	30	02:40,6	02:47,13	6,6	6,53	13,13	2	6,4	1,41	6,21
60	0:03:34	6	1	4,4	36	02:40,87	02:48,57	6,87	7,7	14,57	1,5	5,9	1,24	7,15

Рисунок Б1 – Измерение динамики разъезда очереди внегрупповых АТС

500 м		60 км/ч		45 с		tcd=36 с		500 м		30 с		tcd=36 с		500 м			
0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС	60 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС	60 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС	
2,8	29,95	29,85	29,85	29,85	2,8	19,6	19,5	19,5	19,5	19,5	2,8	40,29	40,19	40,19	40,19	40,19	
1,8	24,62	24,39	24,36	24,36	1,8	15,79	15,56	15,54	15,54	15,54	1,8	33,44	33,21	33,18	33,18	33,18	
0,8	19,19	18,91	18,84	18,84	0,8	12,08	11,77	11,7	11,7	11,7	0,8	26,33	26,06	25,99	25,99	25,99	
500 м/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	50 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС	50 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС	
2,8	31,03	29,88	29,85	29,85	2,8	20,69	19,53	19,5	19,5	19,5	2,8	41,38	40,22	40,19	40,19	40,19	
1,8	26,47	24,39	24,36	24,36	1,8	17,65	15,56	15,54	15,54	15,54	1,8	35,29	33,21	33,18	33,18	33,18	
0,8	21,43	18,87	18,84	18,84	0,8	14,29	11,72	11,7	11,7	11,7	0,8	28,57	26,01	25,99	25,99	25,99	
40 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	40 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС	40 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС	
2,8	24,83	23,18	25,18	26,34	2,8	14,48	16,48	18,48	19,5	19,5	2,8	35,17	37,17	39,17	40,19	40,19	
1,8	21,18	23,18	24,47	24,36	1,8	12,35	14,35	15,79	15,54	15,54	1,8	30	32	33,44	33,18	33,18	
0,8	17,14	19,14	18,91	18,84	0,8	10	12	11,77	11,7	11,7	0,8	24,29	26,29	26,06	25,99	25,99	
600 м					45 с		tcd=43 с		600 м		30 с		tcd=43 с		600 м		
60 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС	60 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС	60 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС
2,8	29,95	29,85	29,85	29,85	2,8	19,53	19,5	19,5	19,5	19,5	2,8	38,17	40,19	40,19	40,19	40,19	
1,8	24,47	24,36	24,36	24,36	1,8	15,65	15,54	15,54	15,54	15,54	1,8	33,44	33,18	33,18	33,18	33,18	
0,8	19,01	18,87	18,84	18,84	0,8	11,87	11,72	11,7	11,7	11,7	0,8	26,15	26,01	25,99	25,99	25,99	
50 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС	50 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС	50 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС
2,8	31,03	29,88	29,85	29,85	2,8	20,68	19,53	19,5	19,5	19,5	2,8	41,38	40,22	40,19	40,19	40,19	
1,8	26,47	24,39	24,36	24,36	1,8	17,65	15,65	15,54	15,54	15,54	1,8	35,29	33,21	33,18	33,18	33,18	
0,8	21,43	18,87	18,84	18,84	0,8	14,29	11,72	11,7	11,7	11,7	0,8	28,57	26,01	25,99	25,99	25,99	
40 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС	40 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС	40 км/4	0 ТС	2 ТС	4 ТС	6 ТС	8 ТС
2,8	23,45	22	24	26	26	2,8	13,1	15,1	17,1	19,1	19,5	2,8	33,79	35,79	37,79	39,79	39,79
1,8	20	22	24	24,36	24,36	1,8	11,18	13,18	15,18	15,56	15,54	1,8	28,82	30,82	32,82	33,18	33,18
0,8	16,19	18,19	19	18,84	18,84	0,8	9,5	11,5	12,05	11,7	11,7	0,8	23,33	25,33	26,15	25,99	25,99
700 м					45 с		tcd=50 с		700 м		30 с		tcd=50 с		700 м		
																60 с	
																tcd=50 с	

Рисунок Б2 – Расчет пропускной способности полосы движения АТС

Задержка первого ТС лидирующей группы, с																
tcd = 35 с (50 км/ч) 0,8 м/с ²		Lп=500 м					Lп=300 м					Lп=700 м				
Внегрупповые ТС		0	2	4	6	8	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
Скорость при координированном движении	50 км/ч	36	46,40	51,58	56,08	60,33	22	32,40	37,58	42,08	46,33	50	60,40	65,58	70,08	74,33
	Задержка	0	10,40	15,58	20,08	24,33	0	10,40	15,58	20,08	24,33	0	10,40	15,58	20,08	24,33
Рекомендуемая скорость		36	43,40	49,10	53,88	58,23	22	29,40	35,10	39,88	44,23	50	57,40	63,10	67,88	72,23
	Задержка	0	7,40	13,10	17,88	22,23	0	7,40	13,10	17,88	22,23	0	7,40	13,10	17,88	22,23
2,8 м/с ²		50 км/ч	41 км/ч	37 км/ч	33 км/ч	31 км/ч	50 км/ч	37 км/ч	31 км/ч	27 км/ч	24 км/ч	50 км/ч	44 км/ч	40 км/ч	37 км/ч	35 км/ч
Внегрупповые ТС		0	2	4	6	8	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
Скорость при координированном движении	50 км/ч	36	41,76	44,93	47,87	50,77	22	27,76	30,93	33,87	36,77	50	55,76	58,93	61,87	64,77
	Задержка	0	5,76	8,93	11,87	14,77	0	5,76	8,93	11,87	14,77	0	5,76	8,93	11,87	14,77
Рекомендуемая скорость		36	40,07	43,38	46,42	49,32	22	26,07	29,38	32,42	35,32	50	54,07	57,38	60,42	63,32
	Задержка	0	4,07	7,38	10,42	13,32	0	4,07	7,38	10,42	13,32	0	4,07	7,38	10,42	13,32
1,8 м/с ²		50 км/ч	45 км/ч	41 км/ч	39 км/ч	36 км/ч	50 км/ч	41 км/ч	37 км/ч	33 км/ч	31 км/ч	50 км/ч	47 км/ч	44 км/ч	42 км/ч	40 км/ч
Внегрупповые ТС		0	2	4	6	8	0	2	4	6	8	0	2	4	6	8
Скорость при координированном движении	50 км/ч	36	43,87	47,90	51,49	54,89	22	29,87	33,90	37,49	40,89	50	57,87	61,90	65,49	68,89
	Задержка	0	7,87	11,90	15,49	18,89	0	7,87	11,90	15,49	18,89	0	7,87	11,90	15,49	18,89
Рекомендуемая скорость		36	41,57	45,95	49,74	53,19	22	27,57	31,95	35,74	39,19	50	55,57	59,95	63,74	67,19
	Задержка	0	5,57	9,95	13,74	17,19	0	5,57	9,95	13,74	17,19	0	5,57	9,95	13,74	17,19
50 км/ч		43 км/ч	39 км/ч	36 км/ч	34 км/ч	50 км/ч	39 км/ч	34 км/ч	30 км/ч	28 км/ч	50 км/ч	45 км/ч	42 км/ч	40 км/ч	38 км/ч	

Рисунок Б3 – Расчет задержек лидирующего группового АТС

Приложение В

Скорость	1 моделирование		2 моделирование		3 моделирование		4 моделирование		5 моделирование	
	Задержка, с	Проехало								
30	0	11	0	11	0	11	0	11	0	11
40	0	13	0	13	0	13	0	12	0	12,75
50	0	14	0	14	0	14	0	14	0	14
60	0	14	0	14	0	14	0	14	0	14
30	0	11	0	11	0	11	0	11	0	11
40	0	12	0	12	0	12	0	12	0	12
50	0	11	0	11	0	11	0	11	0	11
60	2	11	2,1	11	1,9	11	1,8	11	1,95	11
30	0	9	0	10	0	10	0	9	0	9,5
40	0	9	0	9	0	9	0	9	0	9
50	2,9	9	2,7	9	2,8	9	2,9	9	2,825	9
60	5,9	9	5,5	9	5,7	9	5,8	9	5,725	9
30	0	7	0	7	0	7	0	7	0	7
40	2,3	7	2,6	7	2,3	7	2,4	7	2,4	7
50	6,4	7	6,3	7	6,8	7	6,6	7	6,525	7
60	9,1	7	9	7	9,3	7	8,8	7	9,05	7
30	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5
40	6,2	5	6,9	5	6,8	5	6,4	5	6,575	5
50	10	5	9,8	5	10,5	5	10,5	5	10,2	5
60	12,6	5	12,9	5	13	5	12,8	5	12,825	5
30	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15
40	0	17	0	17	0	17	0	17	0	17
50	0	18	0	18	0	18	0	18	0	18
60	0	18	0	18	0	18	0	18	0	18
30	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15
40	0	16	0	16	0	16	0	16	0	16
50	0	16	0	15	0	16	0	15	0	15,5

Рисунок В1 – Экспорт данных из имитационного моделирования Extended IDM with Speed Adaptation (EIDM-SA)

Код Им	ИнтВр	Корреспонденция (откуда куда)	ДлЗат	ДлЗатМакс	ТС(все)	ТС(10)	Люди(все)	Люди(10)	УрОбсл(все)	УрОбсл(10)	ЗначУрОбсл(все)	ЗначУрОбсл(10)	ТСЗадерж(все)	ТСЗадерж(10)	ВрЗадерж(все)	ВрЗадерж(10)	ВрПроПр
1 0-130	1: 0 в очереди - 1: 0 в очереди@5	0,878001	20,008643	30	30	30	30	LOS_A	LOS_A	1	1	0,317976	0,317976	0,317976	0,317976	0,317976	
1 0-130	1: 0 в очереди	0,878001	20,008643	30	30	30	30	LOS_A	LOS_A	1	1	0,317976	0,317976	0,317976	0,317976	0,317976	
1 0-130	2: 2 в очереди - 2: 2 в очереди@5	2,934385	20,570993	31	31	31	31	LOS_A	LOS_A	1	1	2,21757	2,21757	2,21757	2,21757	2,21757	
1 0-130	2: 2 в очереди	2,934385	20,570993	31	31	31	31	LOS_A	LOS_A	1	1	2,21757	2,21757	2,21757	2,21757	2,21820	
1 0-130	3: 4 в очереди - 3: 4 в очереди@5	5,837183	25,87552	32	32	32	32	LOS_A	LOS_A	1	1	4,117493	4,117493	4,117493	4,117493	4,54975	
1 0-130	3: 4 в очереди	5,837183	25,87552	32	32	32	32	LOS_A	LOS_A	1	1	4,117493	4,117493	4,117493	4,117493	4,54975	
1 0-130	4: 6 в очереди - 4: 6 в очереди@5	50,10911	137,76162	32	32	32	32	LOS_A	LOS_A	1	1	9,00099	9,00099	9,00099	9,00099	3,94798	
1 0-130	4: 6 в очередь	50,10911	137,76162	32	32	32	32	LOS_A	LOS_A	1	1	9,00099	9,00099	9,00099	9,00099	3,94798	
1 0-130	5: 8 в очереди - 5: 8 в очереди@5	89,3288	264,343901	32	32	32	32	LOS_B	LOS_B	2	2	10,532173	10,532173	10,532173	10,532173	5,53481	
1 0-130	5: 8 в очереди	89,3288	264,343901	32	32	32	32	LOS_B	LOS_B	2	2	10,532173	10,532173	10,532173	10,532173	5,53481	
1 0-130	1: 0 в очереди - 1: 0 в очереди@5	2,408467	90,985522	25	25	25	25	LOS_A	LOS_A	1	1	0,044729	0,044729	0,044729	0,044729	0,044729	
1 0-130	1: 0 в очередь	2,408467	90,985522	25	25	25	25	LOS_A	LOS_A	1	1	0,044729	0,044729	0,044729	0,044729	0,044729	
1 0-130	2: 2 в очереди - 2: 2 в очереди@5	3,108222	38,654532	26	26	26	26	LOS_A	LOS_A	1	1	2,269605	2,269605	2,269605	2,269605	1,57170	
1 0-130	2: 2 в очереди	3,108222	38,654532	26	26	26	26	LOS_A	LOS_A	1	1	2,269605	2,269605	2,269605	2,269605	1,57170	
1 0-130	3: 4 в очереди - 3: 4 в очереди@5	6,02949	36,871303	28	28	28	28	LOS_A	LOS_A	1	1	4,294993	4,294993	4,294993	4,294993	2,91400	
1 0-130	3: 4 в очередь	6,02949	36,871303	28	28	28	28	LOS_A	LOS_A	1	1	4,294993	4,294993	4,294993	4,294993	2,91400	
1 0-130	4: 6 в очереди - 4: 6 в очереди@5	9,297857	38,880271	30	30	30	30	LOS_A	LOS_A	1	1	6,220991	6,220991	6,220991	6,220991	4,20117	
1 0-130	4: 6 в очередь	9,297857	38,880271	30	30	30	30	LOS_A	LOS_A	1	1	6,220991	6,220991	6,220991	6,220991	4,20117	
1 0-130	5: 8 в очереди - 5: 8 в очереди@5	54,32188	84,153115	32	32	32	32	LOS_A	LOS_A	1	1	8,342457	8,342457	8,342457	8,342457	5,2679	
1 0-130	5: 8 в очередь	54,32188	84,153115	32	32	32	32	LOS_A	LOS_A	1	1	8,342457	8,342457	8,342457	8,342457	5,2679	

Рисунок В2 – Экспорт данных из PTV VISSIM

Узел	Зальцмана - 2-я Эльтонская			
Дата и время выгрузки	18:29:57 14.09.2025			
Время начала	Время конца	Зона въезда	Зона выезда	Количество
	0:00 2025-09-11 01:00:00	SW	NE	20
	1:00 2025-09-11 02:00:00	SW	NE	12
	2:00 2025-09-11 03:00:00	SW	NE	7
	3:00 2025-09-11 04:00:00	SW	NE	3
	4:00 2025-09-11 05:00:00	SW	NE	3
	5:00 2025-09-11 06:00:00	SW	NE	6
	6:00 2025-09-11 07:00:00	SW	NE	33
	7:00 2025-09-11 08:00:00	SW	NE	57
	8:00 2025-09-11 09:00:00	SW	NE	86
	9:00 2025-09-11 10:00:00	SW	NE	99
	10:00 2025-09-11 11:00:00	SW	NE	104
	11:00 2025-09-11 12:00:00	SW	NE	105
	12:00 2025-09-11 13:00:00	SW	NE	126
	13:00 2025-09-11 14:00:00	SW	NE	112
	14:00 2025-09-11 15:00:00	SW	NE	133
	15:00 2025-09-11 16:00:00	SW	NE	145
	16:00 2025-09-11 17:00:00	SW	NE	198
	17:00 2025-09-11 18:00:00	SW	NE	293
	18:00 2025-09-11 19:00:00	SW	NE	277
	19:00 2025-09-11 20:00:00	SW	NE	183
	20:00 2025-09-11 21:00:00	SW	NE	174
	21:00 2025-09-11 22:00:00	SW	NE	76
	22:00 2025-09-11 23:00:00	SW	NE	50
	23:00 2025-09-12 00:00:00	SW	NE	47

Рисунок В3 – Почасовая интенсивность движения АТС по полосе на пересечении ул. Зальцмана – ул. 2-ая Эльтонская (экспорт данных из AIMS eco)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025666724

Мобильное приложение для расчёта скорости безостановочного проезда регулируемых перекрёстков (Зелёная волна 2.0)

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (РУ)*

Авторы: Шепелёв Владимир Дмитриевич (RU), Слободин Иван Сергеевич (RU), Фадина Ольга Сергеевна (RU)

Заявка № 2025665317

Дата поступления 05 июня 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 27 июня 2025 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

до змін відповідно до змін відповідно

Digitized by srujanika@gmail.com

Городской суд г. Одессы

www.sciencedirect.com

Ю.С. Зубов

Приложение Д

ООО НТК «МИР»
454078, г. Челябинск
ул. Витебская, д. 2, кв. 332
ИНН / КПП: 7449134299 / 744901001
ОГРН: 1177456064523



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор
ООО НТК «МИР»
А.А. Самойленко
«16» октября 2025 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Фадиной Ольги Сергеевны

Комиссия в составе:

Директор Самойленко Александр Андреевич

Составила акт о том, что результаты диссертационной работы на тему «Повышение эффективности функционирования регулируемых пересечений улично-дорожной сети на основе организации безостановочного проезда лидирующей группы транспортных средств», были внедрены в эксплуатационную деятельность ООО НТК «МИР». Разработанная методика организации безостановочного проезда реализована в виде мобильного приложения, используемого водителями компании при движении через регулируемые пересечения. Приложение в реальном времени рассчитывает и рекомендует оптимальную скорость движения, обеспечивающую проезд пересечений без остановки на запрещающий сигнал светофора. Экономический эффект достигается за счет минимизации количества остановок и последующих разгонов транспортных средств, что приводит к снижению потребления топлива на 22-25%.

Внедрение результатов диссертационного исследования позволяет повысить экономическую эффективность эксплуатации автомобильного транспорта за счет оптимизации режимов движения транспортных средств через регулируемые пересечения.

Директор

Самойленко А.А.

