

На правах рукописи



КУПАВЦЕВ ВЛАДИМИР АНАТОЛЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ
ДВИЖЕНИЯ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ МОБИЛЬНОСТИ В
ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ**

Специальность 2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2025

Работа выполнена в ОАО «Научно-исследовательский институт автомобильного транспорта» (ОАО «НИИАТ»).

Научный
руководитель:

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Донченко Вадим Валерианович
ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»,
заместитель директора Центра развития транспорта
общего пользования Передовой инженерной школы
«Академия ВСМ»

Официальные
оппоненты:

Шевцова Анастасия Геннадьевна
доктор технических наук, доцент,
директор института дополнительного образования и
профессионального обучения «Высшая технологическая
школа БГТУ им. В. Г. Шухова»
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технологический университет им. В. Г. Шухова»

Шелмаков Сергей Вячеславович
кандидат технических наук,
доцент кафедры инженерно-экологические инновации и
комплексная безопасность
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ)»

Ведущая организация: Федеральное казенное учреждение «Научный центр
безопасности дорожного движения Министерства
внутренних дел Российской Федерации»

Защита состоится «11» марта 2026 г. в 11 часов на заседании
объединенного диссертационного совета 99.2.114.02 на базе ФГБОУ ВО
«Московский автомобильно-дорожный государственный технический
университет (МАДИ)» и ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) по адресу:
125319, г. Москва, Ленинградский пр., 64, ауд. 42.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)», в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический университет гражданской авиации»
(МГТУ ГА) и на официальном сайте: (<https://madi.ru>), (<https://www.mstuca.ru/>)

Автореферат разослан «__» _____ 202__ г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
организации, направлять в диссертационный совет по адресу: 125319, г. Москва,
Ленинградский пр., 64, ауд. 42.

Тел.: 8(499)346-01-68 доб. 1324

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Мельникова Татьяна Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные городские транспортные системы представляют собой сложные многоуровневые структуры, включающие различные взаимодействующие виды транспорта, их инфраструктуру, различных пользователей транспорта, системы управления перевозками и движением. В качестве неотъемлемой части городских транспортных систем в последние годы как в сфере пассажирских, так и в сфере грузовых перевозок все в большей мере рассматривается «транспорт последнего/первого километра» (ТПК) – различные транспортные средства (ТС), предназначенные для бесперебойной доставки пользователей транспорта и товаров на последних/первых этапах транспортных цепочек – между транспортной инфраструктурой традиционных видов городского транспорта и конечными пунктами назначения поездки/перевозки. Эти ТС активно используются также и для прямых поездок/перевозок в городских условиях на относительно короткие расстояния (не более 5–7 км).

В транспортном планировании и управлении цепочками поставок под последним километром (милей) понимается последний этап пути, включающий перемещение пассажиров и товаров от транспортного узла до конечного пункта назначения. Сегодня ТПК необходимо рассматривать в качестве одного из важных элементов транспортной системы городов, требующего комплексного подхода к организации и управлению движением соответствующих ТС в традиционной городской среде. ТПК уже в значительной мере интегрирован в транспортные системы российских городов и проблемы, связанные с его использованием (в первую очередь, проблема обеспечения безопасности дорожного движения (БДД) соответствующих ТС), подлежат постоянному мониторингу, контролю и поиску решений. Это соответствует задачам выполнения национальных целей развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года, утв. Указом Президента РФ от 07.05 2024 г. №309, и, в частности, таким целям, как «а) сохранение населения, укрепление здоровья и повышение благополучия людей, поддержка семьи» и «в) комфортная и безопасная среда для жизни». Для обеспечения эффективного и безопасного функционирования ТПК необходима разработка специализированных правил дорожного движения (ПДД), создание безопасной инфраструктуры для их передвижения, а также внедрение соответствующих систем контроля, что позволит упорядочить их использование в качестве полноценной подсистемы городских транспортных систем (ГТС). В свою очередь эти задачи требуют соответствующего научного обоснования, профессионального управления и технического обеспечения.

Хотя первоначально ТПК получил развитие в сфере перевозок грузов и товаров как завершающий этап логистических цепочек, на которых груз или товар доставляется от ближайшего склада, торговой организации или распределительного центра до двери покупателя, в настоящее время наибольшая динамика использования ТПК наблюдается в сфере перевозок населения. Во всем мире и в Российской Федерации растет спрос жителей городов на использование различных средств индивидуальной мобильности (СИМ), как важного элемента ТПК. Особое распространение использование СИМ получило именно в городах в

условиях недавней пандемии COVID-19, что было обусловлено возможностью социального дистанцирования пользователей и снижением социальной напряженности при пользовании различными видами пассажирского транспорта общего пользования (ПТОП). К преимуществам использования многих СИМ следует отнести удобство и простоту их эксплуатации, а также возможность компактной и бесплатной парковки в условиях городской застройки. Важным фактором является и то, что использование СИМ (и велотранспорта) в определенной мере снижает загруженность улично-дорожной сети (УДС) и ПТОП за счет перераспределения на них части транспортного спроса. Использование ТПК в целом (пассажирского и грузового) способствует формированию многообразной и гибкой городской транспортной системы, отвечающей современным требованиям доступности и эффективности. Несмотря на явные преимущества использования ТПК (и, в частности, СИМ) в городской среде, его активная эксплуатация вызывает рост аварийности. Так, в результате движения СИМ на дорогах возникают различные типы ДТП: наезды ТС на СИМ, наезды СИМ на пешеходов, падения и наезды на препятствия с участием самих пользователей СИМ. Таким образом, интеграция СИМ в ГТС требует комплексного подхода к оценке и управлению рисками, связанными с их эксплуатацией. В связи с этим необходимо соответствующее научное обоснование требований к условиям обеспечения надежной и безопасной эксплуатации СИМ в ГТС, включая разработку требований к активной и пассивной безопасности этих ТС и требований к используемой ими дорожной инфраструктуре, что, в совокупности, и определяет актуальность темы исследования.

Цель работы - повышение эффективности и безопасности движения средств индивидуальной мобильности как компонента городской транспортной системы.

Для достижения цели были поставлены следующие взаимосвязанные **задачи**:

1. Обосновать место и роль средств индивидуальной мобильности как транспорта последнего километра в городской транспортной системе;
2. Выполнить анализ методов и средств решения проблем повышения безопасности дорожного движения средств индивидуальной мобильности в городской транспортной системе;
3. Разработать теоретические модели оценки рисков дорожно-транспортных происшествий с участием средств индивидуальной мобильности;
4. Выполнить экспериментальные исследования характеристик движения средств индивидуальной мобильности по пешеходной инфраструктуре и тяжести совершаемых наездов на пешеходов;
5. Обосновать эффективность мероприятий по внедрению средств индивидуальной мобильности как транспорта последнего километра в городской транспортной системе.

Объект исследования – средства индивидуальной мобильности как компонент городской транспортной системы.

Предмет исследования – движение средств индивидуальной мобильности в городской транспортной системе.

Диссертационное исследование направлено на решение **научной задачи**, заключающейся в повышении безопасности использования средств индивидуальной мобильности в городской транспортной системе.

Рабочая гипотеза, состоит в том, что скорость движения является определяющим фактором обеспечения безопасности использования средств индивидуальной мобильности в городской транспортной системе.

Научная новизна заключается в:

1. Обосновании роли и места транспорта последнего километра как подсистемы городского транспорта.

2. Разработке новой классификации средств индивидуальной мобильности по полной массе транспортного средства (транспортного средства и оператора) и мощности привода.

3. Разработке теоретической модели оценки риска наезда средства индивидуальной мобильности на пешехода с учетом плотности движения пешеходного потока.

4. Разработке теоретической модели нормирования безопасной скорости движения средства индивидуальной мобильности.

5. Получении результатов экспериментов, характеризующих:

- профиль пользователя и характеристики использования средства индивидуальной мобильности как транспорта последнего километра;

- зависимость средней скорости движения средства индивидуальной мобильности от плотности пешеходного движения на пешеходной инфраструктуре;

- тяжесть последствий наезда средства индивидуальной мобильности на пешеходов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Средства индивидуальной мобильности (СИМ) являются самостоятельной подсистемой городской транспортной системы в составе транспорта последнего километра, выполняющей ключевые функции в мультимодальных пассажирских и грузовых цепочках, что требует разработки специализированных подходов к их интеграции, регулированию и обеспечению безопасности.

2. Разработанная классификация СИМ по полной массе (включая оператора) и мощности привода позволяет систематизировать разнообразные типы устройств, обоснованно дифференцировать требования к их активной и пассивной безопасности, а также формировать нормативно-техническую базу для регулирования их использования в городской среде.

3. Теоретическая модель оценки риска наезда СИМ на пешехода, учитывающая плотность пешеходного потока и скоростные характеристики движения, позволяет количественно прогнозировать частоту и тяжесть ДТП при совмещённом использовании пешеходной инфраструктуры и обосновывать безопасные режимы движения СИМ.

4. Модель нормирования безопасной скорости движения СИМ, основанная на анализе взаимодействия с элементами городской инфраструктуры (бордюры, неровности и др.), показывает, что ограничение скорости до 13 км/ч на пешеходных зонах и до 20 км/ч на проезжей части минимизирует риск

опрокидывания и травмирования как пользователей СИМ, так и пешеходов, особенно детей.

5. Комплекс мероприятий по повышению безопасности СИМ, включающий создание выделенной инфраструктуры, ограничение скорости и применение цифровых средств контроля, является технико-экономически эффективным: срок окупаемости инвестиций в организацию выделенных полос составляет менее 1,5 лет за счёт снижения социально-экономического ущерба от ДТП.

Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций и мероприятий по повышению безопасности городской транспортной системы с учетом движения средства индивидуальной мобильности на улично-дорожной сети.

Разработанная модель, описывающая риск гибели пешехода в результате наезда средства индивидуальной мобильности с учетом плотности движения пешеходов, может быть использована при дальнейших исследованиях в области организации дорожного движения и обеспечения безопасности дорожного движения в городской транспортной системе.

Результаты исследования с использованием разработанных подходов к оценке безопасности движения средства индивидуальной мобильности в городской транспортной системе найдут практическое применение:

- в проектных организациях - при разработке проектов реконструкции улиц и дорог, а также организации дорожного движения;

- в региональных и муниципальных органах власти и подведомственных им организациях, ответственных за управление транспортом, при проведении анализа безопасности дорожного движения и планировании городской инфраструктуры;

- образовательных учреждениях.

Степень разработанности темы исследования. Наибольший вклад в исследование проблем безопасности и организации дорожного движения внесли следующие отечественные и зарубежные ученые:

- в области планирования и моделирования движения транспортных потоков и перевозок – В.М. Власов, В.Д. Герами, А.Э. Горев, В.А. Гудков, Д. Дрю, В.В. Зырянов, Г.И. Клинковштейн, В.А. Корчагин, В.Г. Кочерга, А.Н. Красников, Е.М. Лобанов, Л.Б. Миротин, Н.А. Наумова, Ю.А. Попов, Ю.Н. Ризаева, В.Г. Санков, В.В. Сильянов, А.И. Солодкий, В.В. Столяров, И.В. Спирин, Ю.В. Трофименко, А.В. Шабанов, М.Р. Якимов, В. Kerner, R. Herman, F. Height;

- в области организации и безопасности дорожного движения – М. Б. Афанасьев, Д. Дрю, Г.И. Клинковштейн, В. А. Корчагин, Ю.А. Кременец, Е. М. Лобанов, А. Ю. Михайлов, В.В. Сильянов, А. Г. Шевцова, A.J. Miller, R.W. Stokes.

Анализ российских и зарубежных работ по проблематике диссертации выявил недостаточную степень разработанности темы исследования вследствие ее относительной новизны.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности. Выполненные исследования отвечают формуле паспорта научной специальности 2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте, пунктам 5 «Принципиально новые виды городского транспорта, технологии

обеспечения городской мобильности» и пункту 11 «Надежность и безопасность функционирования транспортных систем, управление рисками».

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на форумах и конференциях: Международной научно-технической конференции «Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте» (Вологда, 2020, 2021, 2022), 79-ой Научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ (Москва, 2021), XIV Национальная научно-практическая конференция «Организация и безопасность движения» (Тюмень, 2021), Международная научно-техническая конференция «Транспортные и транспортно-технологические системы» (Тюмень, 2022), VII Международная научно-практическая конференция «Транспорт и логистика: Развитие в условиях глобальных изменений потоков» (Ростов-на-Дону, 2023), 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (Липецк, 2022), 100+ TechnoBuild (Международная строительная неделя в Екатеринбурге) сессия III форума «Комфортная городская среда»: Город для пешехода (Екатеринбург, 2024).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 14 статьях, в том числе 4 в ведущих изданиях из перечня рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, 2 в изданиях, включенных в зарубежную аналитическую базу данных SCOPUS и WoS.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «**Место и роль средств индивидуальной мобильности как транспорта последнего километра в городской транспортной системе**» показано, что развитие экономики и рост урбанизации общества способствует росту спроса на передвижения и перевозки на небольшие расстояния, что определяет условия для формирования новой подсистемы городского транспорта – ТПК (рис. 1), принимающей на себя ряд важных функций в единой системе мультимодальной городской логистики (рис. 2).



Рисунок 1 – Место подсистемы ТПК в общей структуре системы городского транспорта

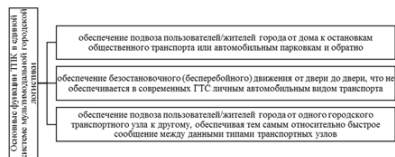


Рисунок 2 – Основные функции ТПК в единой системе мультимодальной городской логистики

ТПК имеет все признаки новой полноценной подсистемы ГТС: он имеет ту же цель, что и ГТС в целом – обеспечение транспортного обслуживания населения

и экономики города (услуги по доставке товаров), обеспечение связанности городских территорий, снижение негативных воздействий на состояние окружающей среды и здоровье населения; у него тот же объект воздействия - передвижения людей и грузов/товаров в городской среде; он располагает множеством элементов (ТС), инфраструктурой для движения (совместно используемой с другими участниками движения), системой управления (для прокатных/шеринговых ТС); для него разработаны (или разрабатываются) отдельные механизмы законодательного и нормативно-правового регулирования их использования; ТС ТПК принципиально отличаются от ТС других подсистем ГТС (ТС, предназначенные для личного использования, 2–3 колеса, малая масса, относительно невысокая скорость передвижения, электропривод или мускульный привод и др.); он активно взаимодействует с другими подсистемами ГТС в рамках организации мультимодальных поездок/перевозок.

Установлено, что ТС ТПК могут успешно использоваться не только в составе пассажирских и грузовых транспортных цепочек (как их начальные, конечные и промежуточные звенья), но и в качестве самостоятельного вида транспорта для индивидуальных поездок с небольшими скоростями (до 25–30 км/ч) на относительно небольшие расстояния – до 3–5 км (например, поездки за покупками, в социальные учреждения и др.). Развитие новых видов мобильности, обеспечивающих доставку в пределах последнего/первого километра (т. е. «от двери до двери»), определяется совокупностью факторов, представленных на рис. 3, и их взаимодействиями.



Рисунок 3 – Факторы, оказывающие влияние на пользование ТПК

Сегодня СИМ предлагают решение городских транспортных проблем благодаря своей компактности и возможности маневрировать в плотной городской застройке. Эти новые виды транспорта могут свободно двигаться по загруженным улицам, использовать тротуары и велодорожки, а также быстро находить места для парковки.

Активное использование СИМ в ГТС привело к возникновению соответствующей новой отрасли экономики, связанной с производством, эксплуатацией (в том числе – прокатом), ремонтом и содержанием этого вида транспорта.

Согласно данным, представленным на едином транспорте портале Москвы, среднее число поездок с использованием СИМ (электросамокаты) для г. Москвы в 2021 году составляла в среднем 35 тыс. в день, но уже в 2023 году данный показатель составил уже 220 тыс. в день (табл. 1).

Таблица 1 – Развитие сервисов аренды электросамокатов (кикшеринга) по г. Москве за период 2018–2023 гг.

Год	Наименование показателя
-----	-------------------------

	Поездки за сезон, млн.	Поездки в сутки, тыс. (ср. знач.)	Количество поездов на 1 самокат в сутки	Размер парка
2018	0,1	0,4	2,0	3 150
2019	0,4	3,0	1,5	3 250
2020	2,0	10,0	2,0	5 000
2021	8,6	35,9	3,2	25 000
2022	26,3	104,2	3,4	40 000
2023	64,0	220,0	5,3	60 000

Популярность использования электросамокатов увеличивается, о чем свидетельствует среднее значение количества поездок в сутки, а также увеличение размера парка с 3 000 прокатных электросамокатов до 60 000 (табл. 1). В целом, за период с 2018 по 2023 год прокат электросамокатов по г. Москве увеличился в 8 раз, что подтверждает рост спроса. Таким образом, СИМ, как ТПК, становится полноценным элементом ГТС, предлагая в рассматриваемом секторе поездок/перевозок привлекательную альтернативу использованию традиционных видов транспорта для все более широкого круга пользователей.

Расширение использования СИМ и других видов ТПК помимо целого ряда положительных эффектов сопряжено и с рядом серьезных проблем. К ним, в первую очередь, необходимо отнести: проблему роста числа и тяжести происшествий, связанных с использованием СИМ; проблему беспорядочной свободной парковки СИМ в пределах городских территорий; проблему конкуренции СИМ с другими пользователями за общую транспортную инфраструктуру и др. Из перечисленных наиболее серьезной и требующей кардинальных решений является проблема обеспечения БДД СИМ. Это подчеркивается в различных зарубежных источниках и подтверждается широким обсуждением проблем использования СИМ в отечественных масс-медиа.

Во второй главе **«Анализ методов и средств решения проблем повышения БДД средств индивидуальной мобильности в городской транспортной системе»** выполнен аналитический обзор существующих исследований в области повышения БДД СИМ и технологий управления городской мобильностью, который показал: недостаточную проработанность вопросов организации безопасного передвижения СИМ в городской среде; недостаточное рассмотрение особенностей взаимодействия СИМ с другими участниками дорожного движения; недостаточный учет специфики использования СИМ в различных городских условиях при разработке требований к дорожной инфраструктуре. Результаты анализа показывают необходимость дальнейшего детального исследования этих аспектов для определения безопасных условий использования СИМ в существующей городской среде.

Безопасность использования СИМ в ГТС следует обеспечивать на основе комплекса мер, построенных по аналогии с используемыми в системах обеспечения БДД применительно к автомобильному транспорту, т. е. на основе внедрения систем обеспечения активной и пассивной безопасности.

Меры по повышению активной безопасности использования СИМ являются основным инструментом предотвращения аварий с их участием и обеспечения их безопасного взаимодействия с другими участниками дорожного движения. например: совершенствование конструктивных особенностей СИМ, снижающих риск возникновения происшествий (например, внедрение ограничителей скорости, систем освещения и сигнализации); нормирование и контроль

скоростных режимов; совершенствование инфраструктуры для движения СИМ (например, организация выделенных полос движения); улучшение видимости СИМ в городской среде; внедрение цифровых технологий контроля и управления движением СИМ и др. Внедрение этих мер позволяет: снизить количество ДТП и тяжесть их последствий; повысить уровень доверия к использованию СИМ в городской среде; интегрировать СИМ в ГТС как безопасный и устойчивый вид ТПК. Следует подчеркнуть, что, как и в случае с автотранспортными средствами, ключевым фактором обеспечения безопасности использования СИМ в городской среде является нормирование скорости их движения.

В свою очередь, к мерам обеспечения пассивной безопасности СИМ следует отнести: использование пользователями СИМ защитных средств (шлемов и другого индивидуального оборудования); повышение безопасности конструкции дорожной/пешеходной инфраструктуры с учётом специфики движения СИМ; повышение пассивной безопасности конструкции СИМ (например, мягкое покрытие руля и др.).

Интеграция СИМ в ГТС требует внедрения мер обеспечения как их активной, так и пассивной безопасности.

В третьей главе «Разработка теоретических моделей оценки рисков ДТП с участием средств индивидуальной мобильности» в целях более объективного выделения существенных характеристик СИМ была разработана новая классификация СИМ по полной массе ТС и мощности привода (табл. 2).

Таблица 2 – Предлагаемая система классификации СИМ

Класс	Обозначение	Категории	Виды СИМ
Макс. масса			
А	Средства, предназначенные для движения с помощью движимой мускульной силы. В движение, которое приводится путём отталкивания ногами от земли в положении стоя. Классифицируются посредством максимального веса, которого данное устройство может выдержать.	АI (до 70 кг)	Роликовые коньки
		АП (до 100 кг)	Скейтборд
		АПI (до 150 кг)	Самокат
Мощность привода			
В	Средства, имеющие электрическую составляющую (наличие аккумулятора, электродвигателя, контроллера). Имеют такие характеристики, как мощность двигателя и ёмкость батареи необходима подзарядка электроэнергии 220 ВТ. Классификация данных средств индивидуальной мобильности происходит путём сравнения общей мощности агрегата.	ВI (до 350 Вт)	Электрический самокат
		ВII (до 900 Вт)	Электрический скейтборд Сегвей
		ВIII (до 1200 Вт)	Моноколесо Гироскутер

Для оценки частоты наездов СИМ на пешеходов и риска их гибели при таких наездах на него электросамокатов на пешеходной инфраструктуре, были приняты следующие допущения (рис. 4).



Рисунок 4 – Основные допущения, принятые при разработке модели риска гибели пешехода в результате наезда СИМ

В качестве обоснования правомочности принятых допущений, следует отметить, что ситуация наезда СИМ на пешехода при их попутном движении на пешеходной инфраструктуре является наиболее травмоопасной, что подтверждается статистическим анализом научного центра БДД (НЦ БДД), а также тем, что в данной ситуации пешеход не видит движущееся СИМ и не может принять каких-то оперативных контрмер – отойти в сторону, изменить траекторию движения и др. Принятие допущения об однотипности используемых электросамокатов обосновывается их близкими характеристиками в различных компаниях кикшеринга, являющихся наиболее массовыми эксплуатантами СИМ.

Риск гибели пешехода при наезде на него электросамоката на пешеходной инфраструктуре может быть оценен как частость совместного появления двух зависимых событий – события А - «наезда электросамоката на пешехода» и события В - «гибели пешехода данной категории в результате наезда электросамоката». Для каждой из j-ых категорий пешеходов риск их гибели при наезде электросамоката равен произведению частоты наступления события А на вероятность возникновения события В при условии независимости их совершения друг от друга, что может быть представлено выражением:

$$P_j(AB) = P_j(A) \cdot P_j\left(\frac{B}{A}\right) \quad (1)$$

где $P_j(AB)$ – риск гибели пешехода j-той категории при наезде на него электросамоката; $P_j(A)$ – частость события «наезд самоката на пешехода j-той категории»; $P_j\left(\frac{B}{A}\right)$ – условная частость гибели пешехода j-той категории в результате наезда на него электросамоката (т.е. при условии, что событие А произошло).

Проводя аналогию между оценкой риска ДТП с участием автотранспортных средств и ДТП с участием СИМ, в частности, для случая рассмотрения наезда электросамокатов на пешеходов, частоту таких происшествий – наездов самокатов (P_{nc}) на пешеходов любых категорий - можно записать как:

$$P_{nc} = \frac{k_{nc}}{N_c \cdot L \cdot T} \quad (2)$$

где P_{nc} – риск наезда электросамокатов на пешеходов (число наездов, отнесенное к числу самоката-км за рассматриваемое время T); k_{nc} – зафиксированное количество несчастных случаев (наездов электросамокатов на пешеходов всех категорий) за время T на рассматриваемом участке пешеходной инфраструктуры длиной L , ед.; N_c – суммарное количество проехавших электросамокатов за рассматриваемое время T , сам/Т; L – длина рассматриваемого участка, км.

При использовании формулы (2) возникают две проблемы, связанных с отсутствием достаточной информации по суммарному пробегу электросамокатов, а также числа зафиксированных наездов на пешеходов. Для решения этих проблем предложено использовать следующий подход - на рассматриваемой инфраструктуре за период наблюдения оценивается общее количество конфликтных ситуаций между владельцами электросамокатов и пешеходами (N_k) в попутном направлении движения, исходя из принятого допущения о том, что, наиболее опасной будет являться ситуация именно наезда в попутном направлении. В качестве конфликтной ситуации на первом этапе рассматривается любая ситуация обгона пешехода пользователем электросамоката.

Среднее количество ожидаемых обгонов пешеходов за проезд одного самоката (в одном направлении) на рассматриваемом i -том участке L_i с однородной линейной плотностью пешеходного движения (N_i), выраженное в числе обгонов, можно оценить по формуле:

$$N_i = D_i \cdot (v_c - v_n) * L_i / v_c \quad (3)$$

где D_i – линейная плотность движения пешеходов всех рассматриваемых категорий на рассматриваемом i -том участке, пеш. /м; v_c, v_n – средние скорости движения электросамокатов и пешеходов на данном участке, м/с.

С учетом того, что электросамокат достаточно манёвренное ТС и может активно использовать при обгоне режимы притормаживания, экстренного торможения и изменения траектории движения, далеко не все совершаемые обгоны могут привести к наезду на пешехода, т. е. к реальной конфликтной ситуации (N_k). Опасность каждого конфликта зависит от скорости, на которой владелец электросамоката подъезжает к пешеходу. В принципе, можно в качестве еще одной гипотезы предположить, что опасность конфликта будет пропорциональна тормозному пути электросамоката $S_{тс}$ при скорости приближения к пешеходу. Эта величина может быть записана как:

$$S_{тс} = \frac{\vartheta_0^2}{2g\varphi} \quad (4)$$

где ϑ_0 – начальная скорость торможения при приближении к пешеходу, км/ч; g – ускорение свободного падения, м/с²; φ – коэффициент сцепления (в среднем для взаимодействия резинового колеса с сухим асфальтобетонным покрытием может быть принят равным 0,75).

Для выполнения дальнейших исследований введен показатель опасности движения СИМ K_c , характеризующий долю условий движения, в которых скорость движения электросамоката (до момента возможного начала торможения) будет превышать «условно безопасную скорость» по условиям торможения. Экспериментально принято, что такой скоростью ϑ_{yb} может являться скорость, при которой тормозной путь электросамоката в соответствии с формулой (4) будет составлять менее 2 м. По формуле (4) определено, что значение ϑ_0 составит в этом случае 19,5 км/ч. Учитывая, что рассматривается случай попутного движения электросамоката и пешехода и пешеход при этом движется со средней скоростью 5 км/ч, получаем, что «условно безопасная» по условиям торможения скорость электросамоката ϑ_{yb} составит менее 25 км/ч.

Учитывая это, показатель опасности движения СИМ на рассматриваемом участке инфраструктуры за рассматриваемый период времени K_c возможно определить с использованием формулы (5):

$$K_c = \frac{\int_{\vartheta_{yb}}^{\vartheta_{max}} f(\vartheta) d\vartheta}{\int_{\vartheta_{min}}^{\vartheta_{max}} f(\vartheta) d\vartheta} \quad (5)$$

где $f(\vartheta)$ – функция плотности распределения частоты появления мгновенных скоростей движения электросамокатов в сечении рассматриваемой пешеходной инфраструктуры; $\vartheta_{min}, \vartheta_{max}, \vartheta_{yb}$ – минимальное, максимальное и «условно безопасное» значения мгновенных скоростей движения электросамокатов в рассматриваемом сечении, км/ч. При этом также предполагается, что распределение скоростей движения самокатов в сечении пешеходной

инфраструктуры соответствует распределению скоростей по длине ее рассматриваемого участка.

Для определения значения K_c были выполнены экспериментальные исследования скоростных режимов движения СИМ на однородных по условиям движения мерных участках пешеходной инфраструктуры. Измерения проводились в утренние часы пик в летний период, в сухую погоду. Для таких условий можно однозначно принять что распределение мгновенных скоростей движения СИМ в сечении пешеходной инфраструктуры будет соответствовать пространственно-временному распределению скоростей СИМ на исследуемом однородном участке. Установлено, что распределение скоростей описывается нормальным законом распределения. По полученным данным натурных наблюдений и определенной функция плотности распределения $f(v)$, была выполнена оценка вероятности движения СИМ с превышением допустимой скорости, что может быть принято эквивалентным доле автомобилей, превышающих эту скорость и создающих конфликтную ситуацию, оцениваемую коэффициентом K_c , вида:

$$P(v > v_{\text{без}}) = \int_{v_{\text{без}}}^{\infty} f(v) dv \quad (6)$$

В численном выражении по итогам проведенных наблюдений значение K_c для рассматриваемых условий составило 0,053.

Возвращаясь к формуле (2), можно, учитывая вышеизложенное, записать частоту наездов на пешеходов категории j , связанных с наездом электросамоката на пешеходной инфраструктуре как:

$$P_{\text{ис}j} = \frac{\beta_j K_c * \gamma \cdot N_{\Sigma i}}{N_c \cdot L} \quad (7)$$

Данное выражение, позволяет в определенном приближении оценить частоту события А в формуле (1).

Безопасность использования СИМ имеет два ключевых аспекта: защита пешеходов от наездов на них СИМ и предотвращение травм самих пользователей СИМ при их падении, что подтверждается данными НЦ БДД о структуре ДТП с участием СИМ, где зафиксировано значительное количество как наездов на пешеходов, так и случаев травматизма самих пользователей при потере ими управления и падении с ТС. Анализ показал, что вероятность опрокидывания СИМ существенно возрастает при наезде на различные препятствия, такие как бордюры, колodцы и выбоины. Это становится дополнительным обоснованием для ограничения скорости движения СИМ по условиям ровности покрытия как на тротуарах, так и на крайней полосе проезжей части городских дорог.

В рамках исследования был проведен детальный анализ конструктивных элементов проезжей части (табл. 3), которые могут представлять существенную опасность для движения СИМ. К таким элементам относятся различные препятствия, способные спровоцировать потерю устойчивости СИМ и падение его пользователя.

Для определения безопасных скоростных режимов движения СИМ был проведен математический расчет. В ходе исследования анализировалось взаимодействие СИМ с различными элементами городской инфраструктуры

(табл. 3). При выполнении расчетов использовались технические характеристики наиболее распространенного типа СИМ, определенного в ходе исследования как «типовое устройство». Это позволило получить репрезентативные данные для установления оптимальных скоростных параметров движения СИМ в городской среде по условиям устойчивости к опрокидыванию при наезде на препятствие.

Таблица 3 - Высота основных элементов городских дорог и городских улиц, представляющих определенную опасность для движения СИМ

№ п/п	Наименование элемента	Допустимая максимальная возвышенность элемента над уровнем проезжей части или тротуара, h_{max} , м
1	Бордюр для отделения пешеходных дорожек, расположенных вдоль проезжей части	0,2 м
2	Искусственная неровность	0,07 м
3	Возвышенный бордюр для отделения проезжей части	0,32 м
4	Колея проезжей части	0,05 м
5	Бордюр для отделения проезжей части при обустройстве не обозначенных переходов	0,04 м

Принятое допущение о расчете наезда колеса самоката без учета центра тяжести оператора обосновано следующими факторами:

1. Временной фактор: при наезде на препятствие время контакта крайне мало, что не позволяет центру тяжести оператора существенно сместиться.

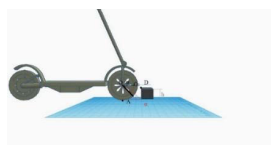
2. Энергетический фактор: доминирующую роль играет кинетическая энергия системы, а влияние положения центра тяжести компенсируется другими факторами.

3. Математические расчеты показывают, что учет центра тяжести оператора вносит поправку порядка нескольких единиц, что при существующих погрешностях измерений является статистически незначимым фактором и не требует дополнительного рассмотрения в рамках данной методики.

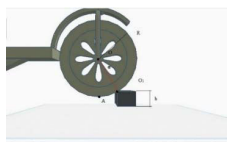
4. Практическая применимость: модель дает удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными и позволяет получить более устойчивые решения.

Данные допущения позволяют в первом приближении оценить базовые закономерности процесса наезда на препятствие без излишнего усложнения математической модели. При этом модель может быть использована как базовый вариант для дальнейших уточнений и служит основой для создания программного обеспечения (ПО).

Для обозначения основных параметров наезда колеса электросамоката на препятствие была использована программная среда TinkerCAD, которая позволяет графически визуализировать рассматриваемый процесс (рис. 5).



а) общий вид



б) вид наезда колеса

Рисунок 5 – Визуализация процесса наезда колеса самоката на препятствие в программной среде TinkerCAD

Движение самоката осуществляется равномерно с постоянной скоростью v , радиус колеса самоката – R , с учетом высоты препятствия определена величина ε , которую возможно вычислить с использованием формулы:

$$\varepsilon = h/R. \quad (8)$$

В результате анализа процесса наезда колеса на препятствие было установлено, что в момент столкновения колесо самоката опирается на дорогу в т. А и в дальнейшем будет соприкасаться с вершиной препятствия в т. D, высота препятствия h , тогда $\sin \alpha$ и \cos возможно вычислить с использованием формул:

$$\sin \alpha = 1 - \varepsilon, \quad (9)$$

$$\cos \alpha = \sqrt{\varepsilon(2 - \varepsilon)}. \quad (10)$$

При взаимодействии с препятствием (ударе) колесо самоката получает обратный горизонтальный импульс, который определяется модулем отраженной скорости $|v|$, зависящим от коэффициента упругости k , определяемого по формуле:

$$|v| = kv, \quad (11)$$

где k находится в пределе от 0 до 1.

В результате соударения угловую скорость вращения колеса возможно определить с использованием формулы:

$$\omega = [v + |v| \sin \alpha] / R. \quad (12)$$

Выполненный расчет угловой скорости позволяет определить период вращения колеса, который в данном случае будет определен с использованием формулы:

$$T = 2\pi / \omega. \quad (13)$$

Для того чтобы колесо самоката преодолело препятствие, не отрываясь от него, ему надо повернуться вокруг т. D на угол φ , который находится по формуле:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arcsin \alpha. \quad (14)$$

Это произойдет в течение времени t_0 , которое возможно рассчитать с использованием формулы:

$$t_0 = \frac{\varphi T}{2\pi} = \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \alpha\right) R^2}{[v + |v| \sin \alpha]}. \quad (15)$$

Также необходимо учесть, что ось колеса получает дополнительные перемещения по вертикали вверх и по горизонтали назад, тогда относительно т. О – точки центра оси колеса - скорость, направленная вертикально вверх, будет определена с использованием формулы:

$$w_0 = |v| \sin \alpha \cos \alpha. \quad (16)$$

Горизонтальная, встречная скорость движения самоката, будет рассчитана с использованием формулы:

$$u_0 = |v| \cos^2 \alpha. \quad (17)$$

Тогда за промежуток времени t_1 , где $t_1 = \frac{w_0}{g}$, ось колеса поднимется на высоту h_{\max} , определяемую с использованием формулы:

$$h_{\max} = \left[|v| / 2g \right] \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha, \quad (18)$$

где g – ускорение свободного падения = $9,8 \text{ м/с}^2$.

Тогда ось колеса сместится в т. O_1 – точку смещения центра оси колеса - и окажется на высоте h_1 , которую можно определить с использованием формулы

$$h_1 = h + R + h_{\max}. \quad (19)$$

Таким образом, расстояние до т. O_1 по горизонтали – x_1 будет определено с использованием формулы:

$$x_1 = R\sqrt{\varepsilon(2 - \varepsilon)} + [v - |v|\cos^2\alpha]t_1. \quad (20)$$

В случае если $x_1 > R$ – колесо достигнет вертикали O_1D и не упадет на препятствие, в противном случае ($x_1 < R$) колесо не достигнет вертикали O_1D и упадет на препятствие, что наглядно отражено на рис. 5 б.

С учетом рассмотренных видов препятствий в результате расчетов было определено, что опрокидывание СИМ может произойти в случае, если радиус колеса будет равен или меньше высоты самого препятствия. Было определено условие, при котором может произойти опрокидывание $x_1 = R\sqrt{\varepsilon(2 - \varepsilon)} + [v - |v|\cos^2\alpha]t_1$ в случае если $x_1 > R$ – колесо достигнет вертикали O_1D и не упадет на препятствие, в противном случае ($x_1 < R$) колесо не достигнет вертикали O_1D и упадет на препятствие.

В четвертой главе «**Экспериментальные исследования характеристик движения СИМ по пешеходной инфраструктуре и тяжести совершаемых наездов на пешеходов**» рассмотрены результаты экспериментальных исследований, направленные на оценку влияния СИМ на параметры ГТС, включая безопасность, скорость передвижения и эффективность функционирования ГТС.

В рамках данной главы во взаимодействии с Департаментом транспорта г. Москвы были проведены социологические исследования по определению профиля пользователя СИМ. Установлено, что в большинстве случаев пользователем СИМ в системе кикшеринга является мужчина в возрасте около 30 лет, рост которого, согласно справочной документации, составляет около 170 см, среднего телосложения, масса тела которого составляет 77 кг. Полученные результаты позволили определить параметры «типового» пользователя СИМ, что является необходимым мероприятием для дальнейшего выполнения модельного эксперимента для определения условно безопасной скорости движения при использовании пешеходной инфраструктуры.

В результате выполненных натурных исследований установлено, что интенсивность пешеходных потоков значительно увеличивается в выходные дни, аналогичным образом увеличивается и количество движущихся по пешеходной инфраструктуре СИМ. Результаты наблюдений позволили установить определённую зависимость между скоростью движения СИМ и плотностью движения пешеходного потока (рис. 6). В результате аппроксимации полученных данных наблюдений была получена линейная статистическая зависимость:

$$\vartheta_c = 24,85 - 4,78 \cdot D_n. \quad (21)$$

где ϑ_c – средняя скорость движения СИМ, км/ч; D_n – плотность пешеходного потока, пеш/м².

Таким образом с использованием формулы (7) был выполнен расчет ожидаемой частоты наезда СИМ на пешехода $P(A)$, который напрямую связан с плотностью пешеходного потока (рис. 7).

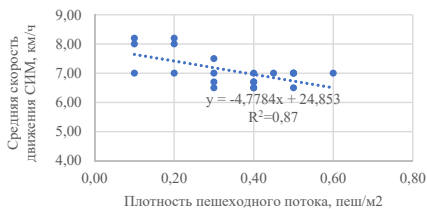


Рисунок 6 – График зависимости средней скорости движения СИМ от плотности пешеходного потока

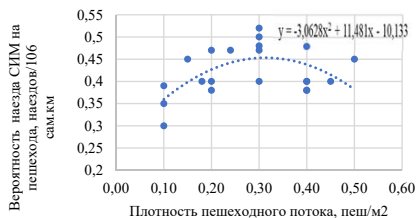


Рисунок 7 – График зависимости вероятности наезда СИМ на пешехода от плотности пешеходного движения

Анализ полученных данных выявил закономерность, связанную с взаимодействием пешеходов и пользователей СИМ. При средней плотности пешеходного потока ожидаемая частота наезда на пешехода оказывается достаточно высокой, что обусловлено возможностью движения СИМ с относительно высокой скоростью. Однако при увеличении плотности пешеходного потока наблюдается противоположная тенденция - ожидаемая частота наезда снижается. Это объясняется тем, что пользователи СИМ подсознательно снижают скорость своего движения в плотном потоке пешеходов, что приводит к уменьшению средней скорости передвижения СИМ и, как следствие, к снижению риска возникновения наезда. Данный вывод подчеркивает важность учета плотности пешеходного потока при планировании организации движения СИМ. При аппроксимации расчетных данных определено, что зависимость ожидаемой частоты наезда на пешехода имеет вид:

$$P(A) = -3,0628 \cdot D_n^2 + 11,481 \cdot D_n - 10,133 \quad (22)$$

где $P(A)$ – частота наезда СИМ на пешехода; D_n – плотность пешеходного потока, пеш/м².

Таким образом на данном этапе исследования была разработана модель оценки риска наезда СИМ на пешехода при совмещенном движении по пешеходной инфраструктуре.

Для дальнейшей оценки последствий наезда СИМ на пешехода совместно с Государственным научным центром Российской Федерации ФГУП «НАМИ» был выполнен ряд модельных компьютерных экспериментов с использованием специализированных программных продуктов, позволяющих определить вероятность гибели пешехода при наезде на него СИМ по критерию травмирования головы (НГС):

$$HIC = \max \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1), \quad (23)$$

где a - результирующее ускорение, измеренное в единицах мм/с² (перевод единиц измерения в g не требуется); « t_1 » и « t_2 » - два момента времени (выраженные в секундах) в ходе удара, определяющие интервал между началом и концом периода регистрации данных, в течение которого НГС достигает максимального значения ($t_2 - t_1 \leq 15$ мс).

В экспертной практике значение НИС 1000 и выше является критическим, означающим достаточно высокую вероятность гибели человека. Для ребенка, критическим является значение НИС 700 и выше.

В модельных экспериментах было использовано следующее лицензионное ПО: для разработки конечно-элементной модели – ПО ANSA BETA CAE; для обработки результатов – ПО META BETA CAE; для проведения расчетов – ПО LS-DYNA.

Для моделирования процесса наезда СИМ на пешехода с использованием указанного выше специализированного программного обеспечения было использовано три модели манекенов – 2 модели водителя СИМ и 1 модель пострадавшего (ребенка), как наиболее уязвимого участника пешеходного движения (рис. 8 а, б, в).



Рисунок 8 – Основные модели манекенов, используемые для выполнения процедуры моделирования

Статистический анализ данных, проведенный совместно с НЦ БДД, выявил важную тенденцию: наиболее серьезные последствия наблюдаются при прямом наезде СИМ на самую уязвимую категорию участников движения – детей. Этот вывод подчеркивает необходимость принятия дополнительных мер безопасности для защиты детей от потенциальных рисков при взаимодействии с СИМ в городской среде. В связи с этим для моделирования было выбрано два вида наездов:

1. Наезд крупного человека на самокате на ребёнка. Модель имитирует движение на самокате манекена, имитирующего крупного человека (Hybrid III – 95%), и его столкновение со стоящим неподвижно манекеном, имитирующим ребёнка 6 лет (6YO) (рис. 9, а). В данном случае цель расчёта – определить ту скорость движения наезда, начиная с которой ребенок получает критические травмы ($НИС \geq 700$).

В ходе компьютерного моделирования было выполнено 12 расчётов с 3 вариантами начальных скоростей самоката – 30 км/ч, 15 км/ч, 5 км/ч и 4 различными вариантами положения ребенка - лицом вперед; поворот вправо на 45°; лицом назад; поворот влево на 45 °.

По результату моделирования и расчета оценивалось значение критерия НИС и вид полученной травмы.

2. Наезд человека среднего телосложения на ребёнка. Модель имитирует движение на самокате манекена, имитирующего человека среднего телосложения (Hybrid III – 50%), который движется на самокате и врывается в стоящий неподвижно манекен, имитирующий ребёнка 6 лет (6YO) (рис. 9, б). По результатам моделирования и расчетов оценивалось значение критерия НИС, вид и тяжесть полученной травмы.



а) Столкновение человека крупного телосложения с ребёнком



б) Столкновение человека среднего телосложения с ребёнком

Рисунок 9 – Визуализация процесса столкновения используемого типа манекена на самокате с ребёнком

Результаты моделирования по обоим видам наезда представлены в табл. 4 и табл. 5.

Таблица 4 – Результаты моделирования столкновения самоката под управлением водителя крупного телосложения с манекеном ребенка

Скорость движения электросамоката	Положение манекена ребенка	Значение НИС	Вид травмы
30км/ч	Лицом вперед		Сильно запрокидывается голова. Расчет до конца не проведен
	Поворот вправо на 45 °	1619	Приземляется на голову
	Лицом назад		Сильно запрокидывается голова. Расчет до конца не проведен
	Поворот влево на 45 °	736	Приземляется на голову. Проваливаются руки
15км/ч	Лицом вперед		Сильно запрокидывается голова. Расчет до конца не проведен
	Поворот вправо на 45 °	1397	Приземляется на голову
	Лицом назад	1970	Приземляется на голову
	Поворот влево на 45 °	789	Приземляется на голову
5км/ч	Лицом вперед	73	Приземляется на голову
	Поворот вправо на 45 °	267	Приземляется на голову
	Лицом назад	247	Сначала падает на спину
	Поворот влево на 45 °	288	Упал на руку, далее на спину и голова

Таблица 5 – Результаты моделирования столкновения самоката, под управлением водителя среднего телосложения с манекеном ребенка

Скорость движения электросамоката	Положение манекена ребенка	Значение НИС	Вид травмы
30 км/ч	Лицом вперед	2501	Шея не естественно закручивается
	Поворот вправо на 45 °	3932	Упал на руку, далее на голову
	Лицом назад		Сильно запрокидывается голова. Расчет до конца не проведен
	Поворот влево на 45 °	252	Сильно наклоняет голову при ударе об поверхность, начинает прокатываться
15 км/ч	Лицом вперед		Расчет до конца не проведен
	Поворот вправо на 45 °	940	Приземляется на голову. Проваливается рука
	Лицом назад	1018	Падает на голову
	Поворот влево на 45 °	1592	Падает на голову
5 км/ч	Лицом вперед		Локтем цепляется к ручке. Расчет до конца не проведен
	Поворот вправо на 45 °	327	Падает на голову
	Лицом назад	398	Падает на голову
	Поворот влево на 45 °	82	Падает на спину, далее на голову. Рука цепляется за колено

Полученные данные позволили оценить риски травмирования ребенка при столкновении с СИМ в зависимости от скорости наезда и ориентации ребенка относительно направления движения.

Результаты модельных экспериментов представлены на рис. 10. По аналогии с результатами, опубликованными ранее экспертами Центра БДД Университета Monash (Австралия) и использованными для определения значений безопасных скоростей движения автотранспортных средств в зависимости от условий движения на улично-дорожной сети, полученные нами данные могут быть описаны логистической кривой:

$$P = \frac{1,027}{1 + 37e^{-0,01702}} \cdot (-0,027) \quad (24)$$

Разработанная модель позволяет прогнозировать вероятность летального исхода при наезде СИМ в зависимости от скорости движения. Вертикальная ось на графике рис.10 отражает вероятность гибели ребенка-пешехода при

столкновении. Для калибровки модели были использованы общепринятые критерии тяжести травм, где значение НИС 700 соответствует 100% вероятности летального исхода для ребенка. Это позволяет количественно оценить риски и определить критические пороги скорости, при которых вероятность смертельного исхода становится недопустимо высокой. Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований, включая оценку рисков для взрослых пешеходов.

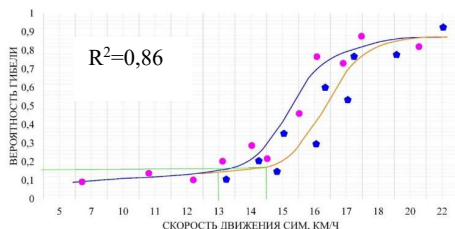


Рисунок 10 – Зависимость риска гибели пешехода-ребенка от скорости наезда электросамоката водителями разного телосложения

Представленные на рис.10 данные позволяют судить о вероятности получения жертвой наезда (ребенком в возрасте 6-ти лет) критических травм головы в случае наезда на него мужчины среднего телосложения и мужчины крупного телосложения.

По аналогии с трактовкой результатов исследований, выполненных ранее Центром БДД Университета Monash (Австралия) для обоснования безопасных скоростей при совмещенном автомобильно-пешеходном движении, по результатам выполненного нами исследования было принято, что предельно допустимый уровень риска гибели ребенка при наезде СИМ на пешеходной инфраструктуре может быть принят на уровне не более 15%. Данный критерий служит важным ориентиром при определении безопасной скорости движения СИМ в городской среде (рис.10).

Следует отметить, что в исследование ребёнок рассматривается в качестве наиболее незащищенного участника подобных происшествий, полученное граничное значение «безопасной» скорости движения получилось ниже разрешенного в настоящее время ПДД (13 км/ч против 25 км/ч).

В результате выполненного модельного эксперимента в программной среде MADYMO (рис. 11) было определено, что максимально разрешенной по условиям ровности дорожного покрытия скоростью при движении СИМ по тротуару, пешеходной дорожке, велопешеходной и велосипедной дорожке, с учетом возможного пересечения проезжей части, не обозначенной специализированным пешеходным переходом и обозначенными техническими средствами организации дорожного движения – разметкой 1.14.1 и дорожными знаками 5.19.1 и 5.19.2 - и наличия неровностей, допустимых согласно нормативным документам, является скорость движения ниже 20 км/ч.

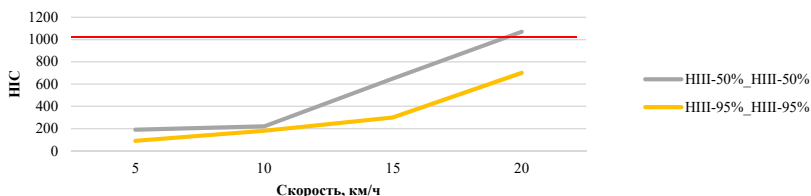


Рисунок 11 – Результаты расчета критерия травмирования головы для различных манекенов при наезде на бордюр высотой 4 см.

Результаты проведенного исследования имеют прикладное значение для формирования нормативной базы и практических рекомендаций по безопасному использованию СИМ. На их основе необходимо разработать комплекс мер, направленных на предотвращение аварийных ситуаций, связанных как с наездами на пешеходов, так и с опрокидыванием этих устройств по причине неровности проезжей части. Это включает в себя разработку мер и механизмов контроля скоростных режимов СИМ, разработку требований к дорожной инфраструктуре и создание методических рекомендаций для пользователей СИМ. Реализация данных мер позволит существенно повысить безопасность эксплуатации СИМ в городской среде.

В пятой главе «Обоснование эффективности мероприятий по внедрению СИМ как транспорта последнего километра в городской транспортной системе» была выполнена оценка спроса на использование СИМ и предложен ряд мероприятий по повышению активной и пассивной безопасности их движения.

В качестве примера практической апробации результатов исследования рассмотрено моделирование спроса на трудовые поездки с использованием электросамокатов системы кикшеринга в режиме ТПК в утренние «часы пик» на примере одного из микрорайонов московской городской агломерации – микрорайона Павшинская Пойма (рис. 12).

Спрос на поездки с использованием СИМ оценивался в соответствии с формулой:

$$N_{nc} = \beta (\sum_i^4 \alpha_{if} N_{if} + \sum_i^4 \alpha_{im} N_{im}) \quad (25)$$

где N_{if} , N_{im} – соответственно количество женщин и мужчин работоспособного возраста, совершающих трудовые поездки в утренний час пик на метро; α_{if} , α_{im} – соответственно коэффициенты готовности использовать электросамокаты в качестве ТПК для женщин и мужчин определенного возрастного диапазона; β – поправочный коэффициент β для оценки общего транспортного спроса населения микрорайона в утренние «часы пик»; i – число рассматриваемых возрастных групп.

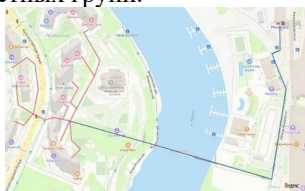


Рисунок 12 – ГИС-слой микрорайона Павшинская Пойма

Анализ данных натурных наблюдений, выполненных в рассматриваемом микрорайоне, подтверждает, что пешеходный поток демонстрирует четко выраженные суточные колебания, характерные для урбанистической среды (рис. 13). Пешеходная активность начинается с 6.00 утра и достигает своего пика в утренние (7.30-9.30) и вечерние (18.00-19.00) часы, что также подтверждается спросом на поездки (рис. 13). Вечерний пик в данное время объясняется маршрутом «работа-дом», а также досуговым использованием рассматриваемых устройств.

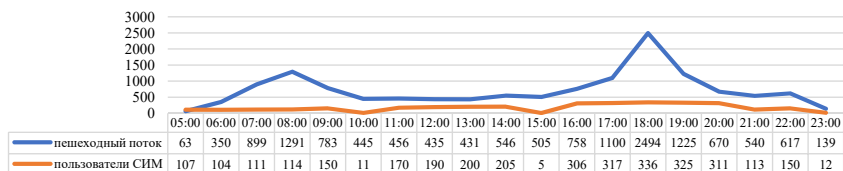


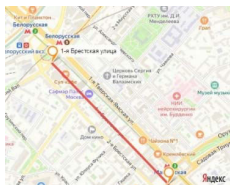
Рисунок 13 – Анализ гексагональной сетки по показателям пешеходного движения и движения СИМ

Таким образом с учетом плотности пешеходного потока 0,7-0,8 (чел/м²) в часы пик и спросом на СИМ – более 300 ед/ч – ранее полученные данные (рис. 13) подтверждают зависимость плотности пешеходного потока и спроса на СИМ со средней скоростью движения СИМ, которая согласно выполненным расчетам по условиям БДД не должна превышать значения 13 км/ч.

Полученные результаты моделирования и их сопоставления с натурными наблюдениями показывают корреляцию интенсивности пешеходного потока и его плотности, особенно в пиковые периоды, со спросом на поездки с использованием СИМ в качестве ТПК. Потенциально это влечет увеличение вероятности транспортных конфликтов между пешеходами и пользователями СИМ на пешеходной инфраструктуре. Даже с учетом снижения расчетной скорости СИМ (рис. 6), прогнозируемая ситуация требует изменения методов ОДД и, в частности, организации выделенной инфраструктуры для движения СИМ и велосипедов.

На основе полученных результатов, был разработан проект и проведена оценка эффективности внедрения отдельно выделенной инфраструктуры для движения СИМ, как одного из наиболее эффективных мероприятий для снижения аварийности с участием СИМ. Выполнена оценка затрат на реализацию подобного проекта на примере одной из улиц г. Москвы с интенсивным пешеходным движением (1-я Брестская улица (рис. 14)) и оценка экономического эффекта, полученного от сокращения ожидаемой аварийности, связанной со снижением риска наездов на пешеходов.

Для определения актуальной сметной стоимости все расчеты были приведены к уровню цен 2023 года с учетом действующих коэффициентов пересчета. Это позволило получить реалистичную оценку необходимых финансовых затрат на реализацию проекта.



а) Спутниковый снимок исследуемой улицы

а) существующая геометрическая схема исследуемой улицы (А-А)



б) существующая геометрическая схема исследуемой улицы (Б-Б)



в) существующая геометрическая схема исследуемой улицы (В-В)

Рисунок 14 – Существующая геометрическая схема объекта исследования – 1-я Брестская улица (г. Москва)

Результаты проведенных сметных расчетов обобщены в табл. 6, где представлена детальная разбивка затрат по каждому виду работ. Это дает полное представление о структуре расходов и позволяет оценить экономическую целесообразность предлагаемого проекта организации дорожного движения с выделенной полосой для СИМ.

Таблица 6 – Расчет стоимости обустройства выделенной полосы для движения СИМ на объекте исследования

№ п/п	Наименование сметного раздела	Стоимость работ с учетом коэффициентов индексации, руб.
1	Демаркировка дорожной разметки	198 249,93
2	Нанесение разметки	325 627,25
3	Нанесение разметки (отделение полосы для движения СИМ)	349 516,56
4	Дорожные знаки (I этап)	143 370,15+18 539,19
5	Дорожные знаки (II этап)	18 539,19
	Всего	1 035 303,08

Для оценки эффективности предлагаемого мероприятия, в рамках данной главы выполнен расчет величины ожидаемых потерь в результате ДТП с участием СИМ (табл. 7). Предполагается, что создание выделенной полосы движения для СИМ позволит полностью сократить происшествия, связанные с их наездом на пешеходов, и соответствующий социально-экономический ущерб.

В общем виде расчет ущерба от таких в ДТП определяется по формуле:

$$C_{\text{ДТП}}^{\text{сущ}} = \sum (n_i \cdot \Pi_i) + \sum (a \cdot M) \quad (26)$$

где n_i - количество пострадавших людей по i -ому виду тяжести травмы (гибель, ранение); Π_i - потери от одного ДТП с i -ым типом травмы одного участника, тыс. руб.; a - общее количество ДТП; M - средний материальный ущерб от 1 ДТП, тыс. руб.

Таблица 7 – Исходные данные для проведения технико-экономического анализа организации движения СИМ по выделенной инфраструктуре

Показатель	Значение
Количество прокатных самокатов в Москве (2022)	45 000 шт.
Средний пробег одного самоката в год	100 км
Общий годовой пробег самокатов по Москве	4 500 000 самоката/км
Годовой пробег самокатов на исследуемом участке	15 420 самоката/км
Общее количество погибших в ДТП с СИМ	12
Интенсивность движения самокатов на участке, сам./ч	10
Длина участка, км;	1
Средняя плотность пешеходного движения в рассматриваемые часы, чел./пог.м	2

Разность средних скоростей самоката и пешехода, км/ч	8
Показатель опасности движения СИМ на участке Кс	0,08

Проведенные исследования показывают, что в условиях сложившейся ситуации с аварийностью СИМ в Москве создание специализированной транспортной инфраструктуры является одним из самых действенных решений в данной сфере (табл. 8). Формирование выделенной инфраструктуры для движения СИМ позволит существенно снизить количество ДТП с участием средств индивидуальной мобильности, особенно на пешеходной инфраструктуре, в местах пересечения с проезжей частью УДС и на пешеходных переходах, где происходит наибольшее число происшествий. Таким образом, реализация данного мероприятия является оптимальным решением для повышения безопасности дорожного движения и интеграции СИМ в существующую транспортную систему города.

Таблица 8 – Результаты проведенного технико-экономического анализа для движения СИМ

Ожидаемый риск гибели пешехода на участке	0,01 в год
Ожидаемый риск ранения пешехода на участке	0,05 в год
Средняя стоимость сокращенного ущерба	115 200 руб.

Разработанная методика технико-экономического обоснования показывает в частности, что создание выделенной инфраструктуры для СИМ протяженностью 1 км требует капитальных вложений в размере 1 млн рублей, при этом ожидаемый годовой ущерб от ДТП составляет 920 тыс. рублей, что обеспечивает срок окупаемости проекта 1,1 года, делая его экономически эффективным решением для развития ГТС.

Выполненное исследование позволило определить комплекс мероприятий для снижения аварийности с участием СИМ, включающий: ограничение скорости движения СИМ до 20 км/ч на проезжей части городских дорог с учетом особенностей городской инфраструктуры; снижение скорости до 13 км/ч в пешеходных зонах и создание отдельно выделенной инфраструктуры для СИМ, что в совокупности значительно минимизирует возможные риски возникновения происшествий данного рода.

Предложенные решения направлены на минимизацию рисков при совмещенном движении СИМ с другими участниками дорожного движения и учитывают критические параметры скорости и допустимого уровня риска для обеспечения безопасной эксплуатации СИМ в городской инфраструктуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных исследований была решена научная задача, заключающаяся в повышении эффективности и безопасности движения средств индивидуальной мобильности как компонента городской транспортной системы, что подтверждено следующими результатами:

1. Обосновано место и роль средств индивидуальной мобильности как транспорта последнего километра в городской транспортной системе.

2. Определены основные факторы, обуславливающие активную и пассивную безопасность средств индивидуальной мобильности в городских транспортных системах.

3. В результате расчетно-экспериментальных исследований была разработана математическая модель оценки риска наезда на СИМ на пешехода,

напрямую связанная с вероятностью $P(A) = -3,0628 \cdot D_{\text{п}}^2 + 11,481 \cdot D_{\text{п}} - 10,133$, установлена зависимость между средней скоростью движения СИМ ($\bar{v}_{\text{СИМ}}$, км/ч) и плотностью пешеходного потока ($q_{\text{пеш}}$), пеш/м², что позволило получить расчетную зависимость ожидаемой частоты наезда СИМ на пешехода от средней плотности пешеходного движения.

4. В результате выполненных модельных экспериментов установлено, что значение критерия травмирования головы (НГС) является ключевым показателем оценки тяжести последствий ДТП с участием СИМ. Обоснован выбор условно безопасной скорости движения СИМ при движении в пешеходной инфраструктуре. Установлено что для обеспечения безопасности всех участников движения, особенно детей, скорость СИМ на пешеходной инфраструктуре должна быть ограничена значением не более 13 км/ч. Такое ограничение обусловлено результатами моделирования, которое оценивало вероятность летального исхода при столкновении с пешеходом/ребенком в условиях смешанного движения, учитывая, как скорость наезда, так и полную массу электросамоката (с учетом пользователя).

Установлено, что при движении СИМ по тротуару и пересечении проезжей части с возможным наездом на выступающий элемент инфраструктуры – бордюр, высотой 4 см, установлено, что в более чем 70% случаев происходит падение взрослого человека среднего телосложения при скоростях движения более 20 км/ч.

5. Обоснована эффективность мероприятий по внедрению средств индивидуальной мобильности как транспорта последнего километра в городской транспортной системе.

Выполненная работа является первой системной проработкой вопроса, связанного с определением безопасных условий использования СИМ в городской среде, и определением места СИМ в транспортной системе городов.

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертации (ВАК)

1. Донченко, В. В. Анализ основных классификационных систем средств индивидуальной мобильности / В. В. Донченко, В. А. Купавцев // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2021. – Т. 18, № 3(79). – С. 252-263. – DOI 10.26518/2071-7296-2021-18-3-525-263.

2. Донченко, В. В. Исследование элементов городской инфраструктуры для безопасного передвижения средств индивидуальной мобильности / В. В. Донченко, В. А. Купавцев // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2023. – Т. 20, № 3(91). – С. 338-349. – DOI 10.26518/2071-7296-2023-20-3-338-349.

3. Купавцев, В. А. Оценка безопасной скорости движения СИМ с учетом изменения радиуса колеса / В. А. Купавцев, В. В. Донченко // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2024. – № 1(76). – С. 84-90.

4. Купавцев, В. А. Разработка модели оценки риска наезда средства индивидуальной мобильности на пешехода / В. А. Купавцев, В. В. Донченко // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2024. – № 4(79). – С. 48-54.

5. Vladimir Kupavtsev, Vadim Donchenko; Foreign approaches to the systematization of means of individual mobility. AIP Conf. Proc. 14 June 2023; 2507 (1): 050011. <https://doi.org/10.1063/5.0109545>

6. V. Donchenko and V. Kupavtsev, "Mathematical Modeling of the Movement of Means of Individual Mobility in the Urban Transport System," 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russian Federation, 2022, pp. 671-674, doi: 10.1109/SUMMA57301.2022.9974042.

Публикации в прочих изданиях, индексируемых в РИНЦ

7. Купавцев, В. А. Оценка основных рисков при реализации мероприятий по организации дорожного движения / В. А. Купавцев, В. В. Донченко // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте : материалы XV Международной научно-технической конференции, Вологда, 08 декабря 2020 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2021. – С. 266-269.

8. Купавцев, В. А. Оценка рисков возникновения аварий с участием средств индивидуальной мобильности в зарубежных странах и Российской Федерации / В. А. Купавцев, В. В. Донченко // Организация и безопасность дорожного движения : материалы XIV Национальной научно-практической конференции с международным участием, Тюмень, 13 мая 2021 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. – С. 32-35.

9. Купавцев, В. А. Основные проблемы, возникающие при движении средств индивидуальной мобильности, и пути их решения / В. А. Купавцев, В. В. Донченко // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте : материалы XVI Международной научно-технической конференции, Вологда, 08 декабря 2021 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2022. – С. 327-331.

10. Купавцев, В. А. Исследование конфликтных ситуаций с участием средств индивидуальной мобильности / В. А. Купавцев, В. В. Донченко // Транспортные и транспортно-технологические системы : материалы Международной научно-технической конференции: в 2 томах, Тюмень, 21 апреля 2022 года. Том II. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2022. – С. 91-95.

11. Купавцев, В. А. Определение основных препятствий городских дорог и городских улиц при движении средств индивидуальной мобильности / В. А. Купавцев, В. В. Донченко // Транспорт и логистика: Развитие в условиях глобальных изменений потоков : Сборник научных трудов VII международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 01–02 февраля 2023 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 184-187.

12. Ляхов, П. В. Исследование дорожно-транспортных происшествий с участием средств индивидуальной мобильности / П. В. Ляхов, В. А. Купавцев // Современная наука. – 2023. – № 4. – С. 37-42.

13. Донченко, В. В. Математическая модель прогнозирования количества ДТП с участием средств индивидуальной мобильности на примере мегаполиса / В. В. Донченко, В. А. Купавцев // Научный вестник автомобильного транспорта. – 2023. – № 4. – С. 3-9.

14. Купавцев, В. А. О системности рассматривания городского транспорта и городской мобильности / В. А. Купавцев, В. В. Донченко // Управление деятельностью по обеспечению безопасности дорожного движения: состояние, проблемы, пути совершенствования : Материалы XIX Международной научно-практической конференции, Орёл, 24 апреля 2025 года. – Орёл: Орловский юридический институт МВД РФ им. В.В. Лукьянова, 2025. – С. 194-200.