

На правах рукописи



**Талавирия Александр Юрьевич**

**Методы имитационного моделирования и математические  
модели в управлении и оценке транспортных потоков платных  
автомобильных дорог**

08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

**Научный руководитель:**

– **Ласкин Михаил Борисович**, кандидат физико-математических наук, доцент.

**Официальные оппоненты:**

– **Луценко Михаил Михайлович**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра высшей математики, кафедра информатики и информационной безопасности, профессор.

– **Хачатрян Нерсес Карленович**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Центральный экономико-математический институт Российской академии наук, заместитель директора института по научной работе.

**Ведущая организация:**

– Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «25» мая 2022 года в 14:00 на заседании диссертационного совета У.08.00.13 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, III учебный корпус, ауд. 506).

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке СПбПУ и на сайте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»: [https://www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defences-calendar/the-degree-of-candidate-of-sciences/talavirya\\_aleksandr\\_yurevich/](https://www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defences-calendar/the-degree-of-candidate-of-sciences/talavirya_aleksandr_yurevich/)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат экономических наук



Дубгорн А.С.

## **I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Диссертационное исследование является актуальным по следующему ряду транспортных, экономических и социальных причин:

Рост количества инфраструктурных проектов. Последние 12 лет к реализации проектов автомобильных дорог, эксплуатируемых на платной основе, проявляется повышенный интерес со стороны государственных и частных инвесторов. Количество анонсированных федеральных и региональных проектов говорит о непрерывном росте данного сегмента транспортной отрасли на ближайшие десятилетия. Кроме того, включение в национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги» показателей, направленных на приведение участков сети автомобильных дорог федерального, регионального или межмуниципального, местного значения в нормативное состояние, оснащение автомобильных дорог интеллектуальными транспортными системами (далее – ИТС), внедрение новых технологий систем взимания платы (далее – СВП), дополнительно способствуют развитию платных дорог;

Повышенные требования к экономической эффективности проектов. Ввиду привлечения инвестиционного капитала для реализации проектов платных дорог задолго до этапа эксплуатации предъявляются требования к финансовым показателям эффективности проекта;

Повышенные требования к социальной, общественной и деловой значимости проектов. Платные дороги подключаются к наиболее загруженным участкам дорожной сети, позволяя обеспечить повышенный спрос на использование услуги проезда как частными, так и коммерческими пользователями;

Высокая достоверность собираемых данных. Наличие современного технологического оснащения платных дорог, по сравнению с дорогами общего пользования, позволяет собирать большое количество измеряемых эксплуатационных показателей, обладающих высокой степенью достоверности. Наличие этих данных позволяет применять высокоэффективные методики анализа и прогнозирования показателей работы платных дорог.

### **Степень разработанности темы исследования**

Научными исследованиями в области развития автомобильных сетей, оптимизации транспортных потоков и увеличения пропускной способности автодорог занимались отечественные и зарубежные ученые. Наибольший вклад в данную область исследований внесли работы Гриндшилса Б.Д., Дубелира Г.Д., Хейта Ф., Лайтхилла М., Уизема Дж. и Ричардса П., Иносэ Х. и Хамады Т., Пригожина И., Уизема Дж., Пейна Х., Мушы Т. и Хигучи Х., Газиса Д., Хермана Р. и Поттса Р., Ньюэлла Ф., Нагелья К. и Шрекенберга М.

Вопросу применения имитационного моделирования в области автомобильного проектирования посвящены работы следующих авторов: Максимеев И.В., Шутова А.И., Дрючина Д.А., Газизуллина Р.И., Девяткова В.В., Дворачека Р., Долгушина Д.Ю., Прилепского Ю.В., Мордухова М.А., Старцевой Ю.Г., Комова А.А., Шамлицкого Я.И., Андриевской А.В., Михеева С.В., Кущенко Л.Е., Морозова В.В., Сумбаема Т.Е., Икидида А., Абабковой А.А., Вельниковского А.А., Загидуллина Р.Р.

Среди исследований, посвященных применению имитационного моделирования на этапе эксплуатации платной автомобильной дороги можно отметить работы авторов Пуниты С., Аксоа Г., Айкина М., Изухары К., Левинсона Д. и Чанга Е., Джехада А.

В рамках диссертационного исследования был произведен анализ библиометрической карты и библиографического сходства научных исследований, посвященных платным дорогам, в результате которого было выявлено 8 основных кластеров, то есть групп документов, рассматривающих феномен платных дорог с экономической, технической, социальной и экологической точек зрения. Была отмечена неравномерность в изучении различных факторов (экономических, транспортно-логистических, технологических, социальных, экологических) влияния платных дорог, что подтверждается разным количеством узлов полученных кластеров. Также было отмечено, что представленные работы не рассматривают вопросы экономической эффективности, достигаемой путем оптимизации функционирования пунктов взимания платы (далее – ПВП) на эксплуатационной стадии.

Результаты данного диссертационного исследования могут внести вклад в данное направление научных исследований. Несмотря на накопленный объем зарубежного научного опыта в области платных автомобильных дорог, развитие отечественных научных исследований, учитывающих специфику проектирования, строительства и эксплуатации инфраструктурных объектов, будет способствовать созданию качественной нормативной базы и закреплению лучших практик, реализованных в рамках текущих и будущих проектов.

### **Научная проблема**

Многополосные ПВП, являющиеся потенциальным источником транспортных заторов на скоростных автомобильных дорогах, не удается описать традиционными моделями теории массового обслуживания ввиду большого количества случайных и преднамеренных ошибок пользователей платных дорог. Возникает необходимость в разработке имитационных моделей объектов инфраструктуры платных дорог и разработки соответствующих математических моделей.

### **Цель и задачи исследования**

**Целью** диссертационной работы является разработка математических и имитационных моделей объектов инфраструктуры платных дорог и транспортных потоков, проходящих через ПВП, позволяющих учитывать случайные ошибки и отклонения пользовательского поведения, оказывающие существенное влияние на пропускную способность объектов инфраструктуры платных дорог, позволяющие оценивать риски возникновения транспортных заторов, длину и время существования очереди на ПВП, время ожидания в очереди, риски экономических потерь оператора платной дороги, связанных с возникновением транспортных заторов.

### **Задачи диссертационного исследования:**

1. Разработать имитационные модели для двух основных типов ПВП, являющихся источником повышенных рисков возникновения транспортных заторов и экономических потерь операторов платных дорог: ПВП на съезде с платной дороги; ПВП на основном ходу платной дороги, позволяющих оценить риски возникновения заторов при разных режимах функционирования ПВП, разных параметров транспортного потока при помощи компьютерного эксперимента;
2. Провести анализ параметров транспортного потока для разработанных имитационных моделей ПВП, который позволяет оценить их предельную пропускную способность;
3. Разработать математическую и алгоритмическую модели анализа параметров транспортного затора, возникающего на ПВП;
4. Провести оценку и оптимизацию микроэкономических процессов оператора в управлении эксплуатационной деятельностью платной дороги, связанных с возможностью возникновения транспортных заторов и изменения параметров транспортного потока, выявленных при помощи разработанных имитационных и математических моделей;
5. Сформулировать практические рекомендации по использованию разработанных в диссертации методов и моделей.

### **Объекты, (предмет) и методы исследования**

**Объектом исследования** являются скоростные и внутригородские платные дороги.

**Предметом исследования** являются методы, модели и практики компьютерного эксперимента в задачах управления и анализа транспортных потоков на ПВП платных дорог, теоретические положения расчета параметров транспортных потоков и транспортных заторов, возникающих на ПВП.

Диссертационное исследование направлено на изучение существующего практического опыта внедрения платных дорог, использованного в реализованных проектах, разработку методов анализа интенсивности транспортного потока, проходящего через ПВП, а также прогнозирования параметров такого транспортного потока.

### **Рабочая гипотеза**

Многополосный ПВП в условиях образовавшегося транспортного затора функционирует как единая система массового обслуживания, обладающая специфическими параметрами.

### **Соответствие темы диссертации требованиям паспорта специальности научных работников (экономические науки).**

Тема диссертационного исследования соответствует паспорту специальности 08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики, в частности:

Математических методов:

1.4. Разработка и исследование моделей и математических методов анализа микроэкономических процессов и систем: отраслей народного хозяйства, фирм и предприятий, домашних хозяйств, рынков, механизмов формирования спроса и потребления, способов количественной оценки предпринимательских рисков и обоснования инвестиционных решений.

Инструментальных методов:

2.1. Развитие теории, методологии и практики компьютерного эксперимента в социально-экономических исследованиях и задачах управления;

2.2. Конструирование имитационных моделей как основы экспериментальной экономики для анализа деятельности сложных социально-экономических систем и определения эффективных направлений развития социально-экономической и финансовой сферы;

2.5. Разработка концептуальных положений использования новых информационных и коммуникационных технологий с целью повышения эффективности управления в экономических системах.

### **Научная новизна**

В диссертационной работе предложены инструментальные методы и математические модели, позволяющие производить оценку пропускной способности ПВП в зависимости от параметров проходящего через него потока транспортных средств (далее – ТС), таких как интенсивность движения, состав трафика и распределение пользователей по типам оплаты, ошибок пользовательского поведения. Разработанные имитационные модели ПВП позволяют оценить пропускную способность ПВП для различных конфигураций СВП (как существующих, так и проектируемых), учитывая специфику параметров транспортного потока, проходящего через ПВП.

Новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. В программной среде AnyLogic разработаны имитационные модели ПВП, соответствующие существующим типам ПВП барьерного типа платных автомобильных дорог РФ, и учитывающие их специфику. Имитационные модели обладают высокой точностью геометрических параметров зон и архитектурных решений ПВП и габаритов ТС, функциональных параметров работы СВП, и параметров транспортного потока, полученных на основании эмпирических данных. При помощи разработанных моделей продемонстрировано функционирование как существующих конфигураций СВП на реальных ПВП, так и нестандартных режимов функционирования СВП при различных параметрах транспортного потока;

2. В результате анализа параметров транспортного потока ТС, проходящего через ПВП, проведенного на основании имитационных экспериментов, были получены параметры распределений времени обслуживания ТС, позволяющие оценить скорость работы СВП при низкой и высокой концентрациях транспортного потока, пороговые значения интенсивностей, при которых происходит возникновение затора, а также зафиксированы изменения характера дорожного движения на ПВП;

3. Доказана теорема о распределении количества ТС, проходящих на ПВП и исходящих с ПВП за случайное время, распределении скорости движения через ПВП. Предложена модель расчета плотности исходящего транспортного потока;

4. Предложена математическая модель суточной интенсивности движения на ПВП, построенная путем приближения эмпирического ряда наблюдений первыми членами тригонометрического ряда, предложена методика оценки его коэффициентов, оценена точность приближения. Модель может быть применена для автоматизации расчетов прогнозируемой интенсивности движения ТС на ПВП;

5. Разработана математическая модель анализа параметров очереди, возникающей на ПВП при его недостаточной пропускной способности. Предложена методика, позволяющая построить функцию распределения количества ТС в очереди и оценить ее параметры. Доказана теорема о распределении времени ожидания ТС в очереди. Предложена методика расчета времени существования очереди;

6. На основании разработанной математической модели и методики оценки параметров очереди, возникающей на ПВП при его недостаточной пропускной способности, произведена оценка рисков экономических потерь оператора платной дороги, связанных с возможностью возникновения транспортных заторов и изменения параметров транспортного потока.

Дальнейшая работа по развитию имитационных моделей позволит создать на её основе цифровой двойник ПВП, который в последующем может быть использован в системах поддержки принятия решений, направленных на повышение эффективности управления платной дорогой.

### **Теоретическая и практическая значимость**

**Теоретической ценностью** исследования является развитие разработок в области имитационного моделирования дорожного движения на платных автомобильных дорогах и математических моделей оценки параметров транспортного потока на ПВП. Разработанные методы и модели могут быть использованы для дальнейших исследований специфики платных дорог, выработки эффективных методик и стандартов, обеспечивающих соответствующее нормативное формирование и совершенствование отечественной автодорожной отрасли.

**Практическая значимость** исследования заключается в разработке имитационных моделей ПВП, основанных на данных реальных объектов и систем платных автомобильных дорог, позволяющих углубленно изучить поведение транспортного потока на ПВП. Использование такого инструмента оценки и прогнозирования транспортного потока позволит своевременно реагировать на любые изменения его параметров, и осуществлять превентивные меры по устранению негативных последствий таких изменений. Эксперименты, проводимые в процессе имитационного моделирования, могут позволить определить требуемые параметры для оптимизации и модернизации СВП на ПВП, обеспечивающие оптимальную пропускную способность на нем, и повышающие эффективность работы ПВП.

Постановка изучаемой проблематики в рамках данного исследования формировалась с учетом дальнейших возможностей прикладного применения результатов научной работы.

Результаты расчетов и моделирования могут быть интересны непосредственным участникам рынка: государственным заказчикам, инвестиционным компаниям, концессионерам, операторам платных дорог, проектным институтам и разработчикам транспортных систем, и могут быть использованы на различных этапах реализации транспортных проектов строительства и реконструкции платных дорог, модернизации существующих ПВП.

### **Методология и методы исследования**

Для решения задач, поставленных в рамках диссертационного исследования, в качестве методической и теоретической основы были использованы методы системного анализа и обработки информации, теории массового обслуживания, имитационного и математического моделирования. При разработке архитектуры интерактивных имитационных моделей применялся объектно-ориентированный подход.

### **Положения, выносимые на защиту**

На основе полученных результатов исследования и разработанных моделей на защиту выносятся следующие положения:

1. Концептуальная дискретно-событийная имитационная модель ПВП, предназначенная для анализа транспортного потока, проходящего через ПВП, позволяющая повысить эффективность функционирования СВП на этапе эксплуатации платной автомобильной дороги;

2. Методика определения предельной пропускной способности ПВП с помощью имитационного моделирования и методика расчета плотности исходящего транспортного потока, позволяющая прогнозировать и своевременно обеспечивать оптимизацию функционирования и модернизацию ПВП;

3. Математическая модель расчета плотности исходящего транспортного потока, проходящего через ПВП в условиях ограниченной скорости движения, которая может быть использована для расчета моделей транспортных потоков в местах присоединения транспортных развязок платных дорог к уличной-дорожной сети (далее – УДС), в том числе к регулируемым перекресткам;

4. Математическая модель учета суточных изменений интенсивности движения на ПВП, позволяющие определить периоды времени, наиболее подверженные риску возникновения транспортных заторов, периоды времени постоянного существования транспортных заторов;

5. Математическая модель и методика оценки длины очереди, образующейся перед ПВП при интенсивности движения, превышающей предельную пропускную способность ПВП, позволяющая оценивать риски экономических потерь оператора платной дороги в случае возникновения транспортного затора;

6. Математическая модель и методика оценки времени ожидания в очереди, образующейся перед ПВП в условиях высокой интенсивности движения, превышающей предельную пропускную способность ПВП, позволяющую оценить время существования очереди, связанные с ним риски экономических потерь оператора платной дороги;

7. Математическая модель учета времени, затрачиваемого ТС на прохождения участка ПВП, количества въезжающих и выезжающих ТС, оценки плотности потока, позволяющие использовать данные платных автомобильных дорог для исследования интенсивностей дорожного движения в «гидродинамических» моделях транспортного потока;

8. Методика оценки и оптимизации микроэкономических процессов оператора в управлении эксплуатационной деятельностью платной дороги, связанных с возможностью возникновения транспортных заторов и изменения параметров транспортного потока, выявленных при помощи разработанных имитационных и математических моделей.

### **Степень достоверности**

Степень достоверности предложенных моделей, основных выводов и результатов диссертационного исследования обеспечиваются согласованностью теоретических положений диссертационной работы и результатов, полученных на основании эмпирических данных с фактическим состоянием изученных фрагментов платной дороги, с данными, доступными в открытых ресурсах, а также апробацией основных теоретических положений диссертационного исследования в печатных трудах и докладах на российских и международных научных конференциях.

### **Апробация работы**

Научные результаты и основные положения диссертационного исследования представлялись на следующих пяти конференциях:

- XVI Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная Информатика (РИ-2018)», г. Санкт-Петербург, 2018;
- XXIV Международная Научно-практическая конференция «Системный анализ в проектировании и управлении» (SAEC-2020), г. Санкт-Петербург, 2020;
- 32-nd European Modeling & Simulation Symposium, Virtual Conference, 2020;
- XVII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная Информатика (РИ-2020)», г. Санкт-Петербург, 2020;

- Вторая международная конференция «Цифровые технологии в логистике и инфраструктуре» (ICDT-2020), г. Санкт-Петербург, 2020.

Также, материалы опубликованных работ по теме диссертационного исследования включены в промежуточный отчет 2020 года по госбюджетной теме ФИЦ РАН (СПИИРАН). Наименование госзадания: «Теоретические и технологические основы, основы создания и совместного использования существующих и перспективных государственных и коммерческих информационно-управляющих и телекоммуникационных систем и сетей на различных этапах их жизненного цикла», шифр темы: 0073–2019–0004.

### **Публикации**

По теме диссертационного исследования автором опубликовано 13 печатных работ, среди них 5 работ в рецензируемых журналах из перечня ВАК и 2 работы, включенные в систему цитирования Scopus.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа объемом в 151 машинописных страницы состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка терминов и условных обозначений, списка литературы из 171 наименования, 53 иллюстраций, 26 таблиц, 2 листингов и предметного указателя.

### **Основное содержание работы**

**В первой главе** приводится анализ библиометрической карты и библиографического сходства научных исследований, посвященных платным дорогам, описываются типовые задачи, решаемые при помощи имитационного моделирования на этапе проектирования автомобильных дорог, приводится классификация методов, применяемая при проектировании ИТС. Описываются задачи, решаемые на этапах как проектирования, так и эксплуатации платных автомобильных дорог, приводится анализ зарубежных трудов, рассматривающих применение моделирования для решения транспортных и экономических задач, возникающих на эксплуатационной стадии. Приводится пример применения имитационного моделирования для решения эксплуатационных задач, направленных на увеличение пропускной способности ПВП платной дороги путем оптимизации или модернизации СВП.

**Во второй главе** приводится описание ПВП как объекта имитационного моделирования, вводятся основные технические термины, используемые в исследовании, приводится описание процесса взимания платы. Рассматриваются основные характеристики СВП, влияющие на процесс взимания платы: типизация барьерной СВП, классификация ТС, режимы функционирования полос оплаты проезда. Приводится общее описание имитационной модели ПВП, а также описание объектов имитационного моделирования на примере функционирующей платной автомобильной дороги. Последовательно описываются: разработанная имитационная модель ПВП на съезде с платной дороги, разработанные имитационные модели ПВП на основном ходу платной дороги. Для каждой имитационной модели подробно описываются транспортные особенности объекта моделирования, параметры и алгоритмы работы.

**В третьей главе** производится анализ имитационной модели ПВП на съезде с платной дороги. Описываются результаты экспериментов, проводимых на имитационной модели. Устанавливается интенсивность движения, при которой на ПВП начинает образовываться затор, рассматриваются случаи распределения времени обслуживания относительно данного значения, с низкой и высокой интенсивностями движения ТС, описываются характеристики транспортных потоков. Формулируется и доказывается теорема об основных характеристиках распределения количества ТС, осуществляющих проезд через ПВП, следствия о характеристиках плотности потока ТС. Формируется математическая модель суточной интенсивности движения на ПВП путем приближения эмпирического ряда наблюдений несколькими первыми членами тригонометрического ряда, определяются его коэффициенты и оценивается точность приближения. Формируются математические модели параметров очереди ТС при возникновении затора на ПВП, определяются основные параметры затора: количество ТС в очереди, длина очереди и время ожидания ТС в очереди. Формулируется и доказывается теорема, определяющая



основные характеристики параметра времени ожидания ТС в очереди. Полученные результаты верифицируются при помощи данных картографического сервиса.

**В четвертой главе** производится анализ имитационной модели ПВП на основном ходу платной дороги. Описываются результаты экспериментов, проводимых на имитационной модели. Определяется интенсивность движения при разных долях пользователей электронных средств регистрации проезда в транспортном потоке, при которой на ПВП начинает образовываться затор, отдельно рассматриваются случаи работы ПВП при низких и высоких интенсивностях. Производится оценка суточной интенсивности движения на ПВП путем приближения эмпирического ряда наблюдений с несколькими первыми членами тригонометрического ряда, определяются коэффициенты и оценивается точность приближения ряда. При помощи имитационной модели производится анализ функционирования ПВП при нестандартных режимах работы. Производится анализ параметров очередей ТС при возникновении затора для нестандартных конфигураций работы ПВП, определяются основные затора параметры: количество ТС в очереди, длина очереди, время ожидания ТС в очереди и время существования очереди.

**В пятой главе** производится оценка и оптимизация микроэкономических процессов оператора в управлении эксплуатационной деятельностью платной дороги, связанных с возможностью возникновения транспортных заторов и изменения параметров транспортного потока, выявленных при помощи разработанных имитационных и математических моделей. Производится анализ исследований в области оценки экономических рисков оператора, выделяются основные группы рисков при высоких интенсивностях трафика. Описываются предпосылки возникновения экономического риска, связанного с несоблюдением оператором норматива по обеспечению пропускной способности дороги. На примере ПВП на основном ходу платной дороги производится оценка конфигураций ПВП, приводящих к существующим и возможным рискам несоблюдения оператором норматива по обеспечению пропускной способности в недельном цикле. В качестве примера повышения качества управленческих решений при эксплуатации ПВП приводится расчет снижения операционных затрат на оплату труда кассиров-операторов при оптимизации конфигураций ПВП. Приводится пример предварительной оценки стоимости инвестиций в комплексную модернизацию ПВП при повышении суточной интенсивности движения. В качестве примера снижения риска несоблюдения пропускной способности производится оценка метода уменьшения транспортного потока на ПВП путем изменения системы тарификации для открытой СВП.

**В заключении** описывается перечень задач, решенных в рамках диссертационного исследования, а также приводятся сведения о практических способах применения полученных результатов.

## **II. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1. Разработаны имитационные модели ПВП, соответствующие существующим типам ПВП барьерного типа платных автомобильных дорог РФ, и учитывающие их специфику.**

ПВП является элементом обустройства платной автомобильной дороги с СВП барьерного типа, через который осуществляется проезд ТС (пользователей). Взимание платы происходит на полосах оплаты проезда ПВП при помощи технологического оборудования системы взимания платы, которое является главным источником операций, трафика, выручки и событий для оператора платной дороги.

Для создания, анализа и оценки имитационных моделей в качестве изучаемого объекта была выбрана платная автомобильная дорога «Западный скоростной диаметр» (далее – ЗСД) в г. Санкт-Петербурге. Данная автомагистраль имеет большое влияние на транспортную связь города, соединяя его Южную, Северную и Центральную части. Данный объект был взят за основу для разработки имитационных моделей ПВП по следующему ряду причин:

1. Транспортный объект является полностью завершенным и прошел стадию полного строительства;

2. С 2016 года объект вошел в эксплуатационную стадию в полном объеме, его транспортная модель может считаться устоявшейся;
3. Объект является значимым для транспортной сети г. Санкт-Петербурга;
4. Объект имеет высокую интенсивность транспортного потока. В связи с постоянным ростом интенсивности транспортного потока, что подтверждается данными Оператора платной дороги оценка транспортного потока является актуальным вопросом для Оператора платной дороги;
5. Результаты диссертационного исследования будут иметь практическую значимость для данного объекта, а также для объектов-аналогов, находящихся в черте города, и подключенных к его УДС.

Для разработки имитационной модели ПВП на съезде с платной дороги был выбран ПВП Северного участка ЗСД, расположенный на съезде в спальный район города. Данный ПВП обеспечивает въезд и выезд из района и расположен в стесненных городских условиях, что позволяет рассматривать данный ПВП как наглядный пример для изучения интенсивности движения и её суточных колебаний, анализа и оценки пропускной способности ПВП, а также риска возникновения затора.

Для разработки имитационной модели ПВП на основном ходу платной дороги был выбран ПВП, расположенный перед транспортной развязкой ЗСД с Кольцевой автомобильной дорогой в Северной части города. На ПВП данного типа приходится основная нагрузка транзитных поездок, осуществляемых по платной дороге. Для пропускных пунктов на основном ходу платной дороги актуальной является задача оценки максимальной пропускной способности и риска возникновения затора.

Концептуальные дискретно-событийные имитационные модели ПВП были разработаны в ПО AnyLogic с помощью библиотек дорожного движения и моделирования процессов. При помощи библиотеки дорожного движения была реализована модель движения транспортного потока через ПВП, произведена графическая визуализация пропускного пункта с необходимым уровнем детализации и точности работы модели на физическом уровне. При помощи библиотеки моделирования процессов в модель были добавлены процессы обслуживания ТС системой взимания платы на полосах, динамика которой была представлена последовательностью операций над агентами (ТС).

Разработанные имитационные модели ПВП предназначены для анализа транспортного потока, проходящего через ПВП и оценки эффективности функционирования СВП на этапе эксплуатации платной автомобильной дороги;

Общий вид объекта – оригинала ПВП на съезде платной дороги и его имитационная модель показана на Рисунке 1.



Рисунок 1. Общий вид объекта – оригинала и имитационная модель ПВП на съезде платной дороги

Общий вид объекта – оригинала ПВП на основном ходу платной дороги и его имитационная модель показана на Рисунке 2.



Рисунок 2. Общий вид объекта – оригинала и имитационная модель ПВП на основном ходу платной дороги

Схема имитационной модели ПВП, реализованной в программной среде AnyLogic, представлена на Рисунке 3.

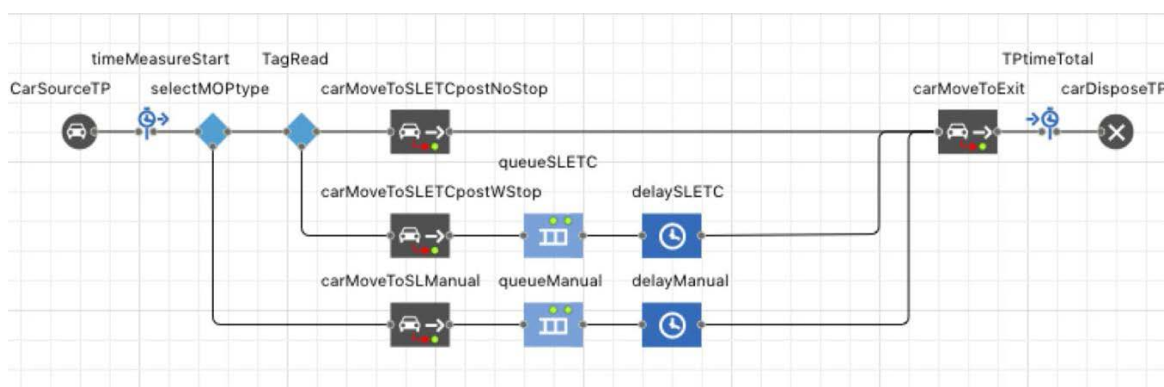


Рисунок 3. Схема имитационной модели ПВП

В разработанных имитационных моделях ПВП учитываются следующие параметры проходящего через него транспортного потока:

1. Интенсивность движения на ПВП;
2. Состав трафика;
3. Распределение ТС по способам оплаты;
4. Время обслуживания ТС на автоматической полосе оплаты проезда;
5. Время обслуживания на ручной полосе оплаты проезда;
6. Дополнительный параметр – пользовательское поведение.

Для каждого ПВП произведено подробное описание разработанных имитационных моделей, программных блоков, функциональных схем и листингов.

**2. Получены параметры распределений времени обслуживания ТС, позволяющих оценить скорость работы СВП при низкой и высокой концентрациях транспортного потока, пороговые значения интенсивностей, при которых происходит возникновение затора.**

На основании разработанной концептуальной дискретно-событийной имитационной модели ПВП была предложена методика определения предельной пропускной способности пропускного пункта. Экспериментальным способом были установлены интенсивности движения, при которой на каждом из исследуемых ПВП начинает образовываться затор при различных параметрах транспортного потока и конфигураций полос оплаты.

В ходе анализа были рассмотрены два случая распределения времени обслуживания – с низкой и высокой интенсивностью движения. Для первого случая, результаты анализа показали разделение общего распределения времени обслуживания на два распределения для автоматического (проезд с оплатой по транспондеру) и ручного (проезд с оплатой наличными

денежными средствами или банковской картой) режимов работы полос. Во втором случае было выявлено влияние пользовательского поведения на характер распределения времени обслуживания. Для каждого случая были определены параметры гамма законов распределения времени обслуживания. Было отмечено, что при недостаточной пропускной способности ПВП перестает работать эффективно, а время обслуживания пользователей увеличивается, независимо от типа оплаты проезда.

**3. Доказана теорема о распределении количества ТС, проходящих на ПВП и исходящих с ПВП за случайное время, распределении скорости движения через ПВП, предложена модель расчета плотности исходящего транспортного потока.**

Поскольку известна длина участка ПВП и скорость движения на данном участке, в условиях существующей очереди и при условии гамма распределенного времени прохождения ТС участка ПВП, на пункте оплаты может быть измерена плотность потока, т.е. количество ТС на фиксированном отрезке дороги длиной  $L$  при заданной скорости движения.

**Теорема.** Пусть время прохода  $t$  транспортного средства участка ПВП случайно и распределено по гамма закону с параметрами  $k, \mu$ , интенсивность входного пуассоновского потока транспортных средств равна  $\lambda$ . Тогда математическое ожидание числа поступивших требований (ТС) за случайное время  $t$  равно  $E(X) = \frac{\lambda k}{\mu}$ , дисперсия и стандартное отклонение равны  $D(X) = \frac{\lambda k}{\mu} (1 + \frac{\lambda}{\mu})$ ,  $\sigma(X) = \frac{\lambda}{\mu} \sqrt{k(1 + \frac{\mu}{\lambda})}$ .

Данная теорема имеет два следствия.

**Следствие 1.** Количество ТС, проехавших участок ПВП (предшествующих транспортному средству, для которого начат отсчет случайного времени прохождения участка ПВП), имеет аналогичный закон распределения с параметром  $\lambda^{exit}$ , его математическое ожидание равно  $E(X) = \frac{\lambda^{exit} k}{\mu}$ , дисперсия и стандартное отклонение равны:

$$D(X) = \frac{\lambda^{exit} k}{\mu} (1 + \frac{\lambda^{exit}}{\mu}), \quad \sigma(X) = \frac{\lambda^{exit}}{\mu} \sqrt{k(1 + \frac{\mu}{\lambda^{exit}})}.$$

**Следствие 2.** Если время прохождения  $t$  транспортного средства участка ПВП случайно и распределено по гамма закону с параметрами  $k, \mu$ , то обратная величина  $v = \frac{1}{t}$  распределена по закону обратной гаммы (в англоязычной литературе «inverse-gamma distribution») с плотностью:

$$g(v) = \frac{\mu^k e^{-\frac{\mu}{v}}}{\Gamma(k)} v^{-k-1}$$

Математическое ожидание  $E(v) = \frac{\mu}{k-1}$ , мода  $Mode(v) = \frac{\mu}{(k+1)}$ , дисперсия  $D(v) = \frac{\mu^2}{(k-1)^2(k-2)}$ , стандартное отклонение  $\sigma(v) = \frac{\mu}{(k-1)\sqrt{k-2}}$  (для  $k > 2$ ). Физический смысл случайной величины  $v = \frac{1}{t}$  – это скорость, с которой ТС проходит «единицу длины», являющейся длиной участка ПВП –  $L$ . Её следует перевести в привычные для скорости единицы измерения в метрах в секунду или километрах в час.

Таким образом, анализ работы имитационной модели ПВП позволяет определить количество ТС, проходящих участок ПВП и определить параметры скорости прохождения участка, то есть оценить плотность потока при известной скорости движения. Параметр плотности потока играет важную роль в моделях транспортных потоков, опирающихся на модели, заимствованные из гидродинамических задач.

**4. Разработана математическая модель суточной интенсивности движения на ПВП, построенная путем приближения эмпирического ряда наблюдений несколькими первыми членами тригонометрического ряда, определены его коэффициенты и оценена точность приближения.**

На Рисунке 4 показаны графики суточной интенсивности ПВП на съезде с платной дороги.

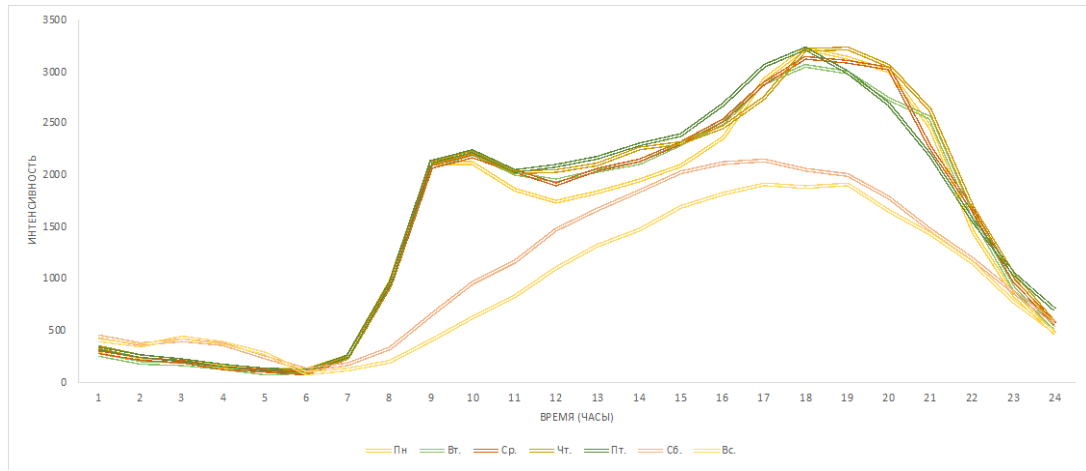


Рисунок 4. Наблюдаемая интенсивность движения на ПВП на съезде с платной дороги по дням недели с 0:00 часов по 24:00 (интенсивность – в ТС/час)

Было сделано предположение, что в отсутствии выходных и праздничных дней, а также городских мероприятий, влияющих на интенсивность движения, интенсивность движения по платной дороге носит периодический характер: графики суточной интенсивности в рабочие дни незначительно отличаются друг от друга. Было отмечено, что любую периодическую функцию можно приблизить тригонометрическим рядом. При этом часто оказывается достаточным приближение несколькими первыми членами такого тригонометрического ряда, в зависимости от требуемой точности решаемой задачи.

Основываясь на данных о суточной интенсивности, была построена функция  $f(t)$  интенсивности движения ТС через пропускной пункт в момент времени  $t$  (для данного исследования – 1 календарные сутки).

Приближение наблюдения суммой  $n$  первых слагаемых тригонометрического ряда функции  $f(t)$  было рассчитано следующим образом:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \times \cos\left(k \frac{2\pi}{\tau} t + \varphi_k\right),$$

где  $a_k$  – амплитуда  $k$ -го гармонического колебания;

$k \frac{2\pi}{\tau}$  – круговая частота  $k$ -го гармонического колебания;

$\varphi_k$  – начальная фаза  $k$ -го гармонического колебания.

Была представлена полученная модель приближения наблюдений суммой  $n$  первых слагаемых тригонометрического ряда функции  $f(t)$  в окончательном виде:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n A_k \times x(t) + \sum_{k=1}^n B_k \times y(t) \quad (1)$$

где  $x(t)$  и  $y(t)$  – вспомогательные переменные:  $x(t) = \cos\left(k \frac{2\pi}{\tau} t\right)$ ,  $y(t) = \sin\left(k \frac{2\pi}{\tau} t\right)$ .

На основании полученной модели была произведена оценка суточной интенсивности движения ПВП на съезде с платной дороги.

Максимальным возможным количеством коэффициентов для применения стандартной библиотечной функции  $lm$  статистического пакета R является 23 ( $1+11 \times 2$ ) коэффициента. Исходя из качества регрессионных моделей для разных значений  $m$  ( $m < 2 \times n + 1$ ), для полученной модели было определено количество слагаемых ( $m$ ).

Количество наблюдений в дневном периоде – 24. На рисунке 5 показаны точки, соответствующие средним наблюдаемым значениям и аппроксимирующая линия вида (1) для модели с 17-ю коэффициентами и  $\text{summary}$  функции  $lm$ , характеризующие качество модели. Значения коэффициентов модели с 17-ю коэффициентами для усредненных значений интенсивностей в рабочие дни показаны на Рисунке 5.



```

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-52.843 -10.656  -0.114  11.227  60.104

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 1542.583    9.094 169.627 6.53e-14 ***
x[1, ]      -649.391   12.861 -50.494 3.13e-10 ***
x[2, ]      -139.636   12.861 -10.857 1.24e-05 ***
x[3, ]      -134.352   12.861 -10.447 1.60e-05 ***
x[4, ]      -144.608   12.861 -11.244 9.83e-06 ***
x[5, ]       103.944   12.861  8.082 8.54e-05 ***
x[6, ]       -37.417   12.861  -2.909 0.022682 *
x[7, ]        5.824    12.861  0.453 0.664358
x[8, ]        46.992   12.861  3.654 0.008136 **
y[1, ]     -1235.532   12.861 -96.069 3.49e-12 ***
y[2, ]     -392.604   12.861 -30.527 1.04e-08 ***
y[3, ]       303.159   12.861  23.572 6.28e-08 ***
y[4, ]       -30.239   12.861  -2.351 0.050996 .
y[5, ]       -37.448   12.861  -2.912 0.022603 *
y[6, ]        83.550   12.861  6.496 0.000335 ***
y[7, ]       -42.704   12.861  -3.320 0.012756 *
y[8, ]       -12.254   12.861  -0.953 0.372409
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 44.55 on 7 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9995, Adjusted R-squared:  0.9983
F-statistic: 861 on 16 and 7 DF, p-value: 5.977e-10

```

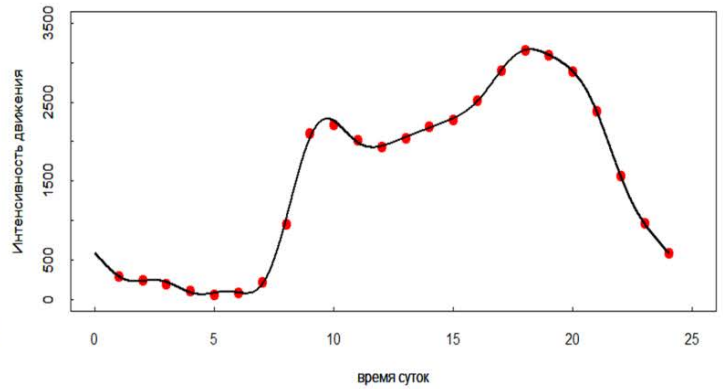


Рисунок 5. Справа: средние наблюдаемых значений (точки) и аппроксимирующая линия вида (1) для модели с 17 коэффициентами. Слева: summary функции lm, характеризующие качество модели

Результаты построения модели с 17-ю коэффициентами показаны на Рисунке 6. Верхними линиями являются значения интенсивностей для рабочих дней (с понедельника по пятницу), а две нижние линии – значения интенсивностей в выходные дни (суббота, воскресенье).

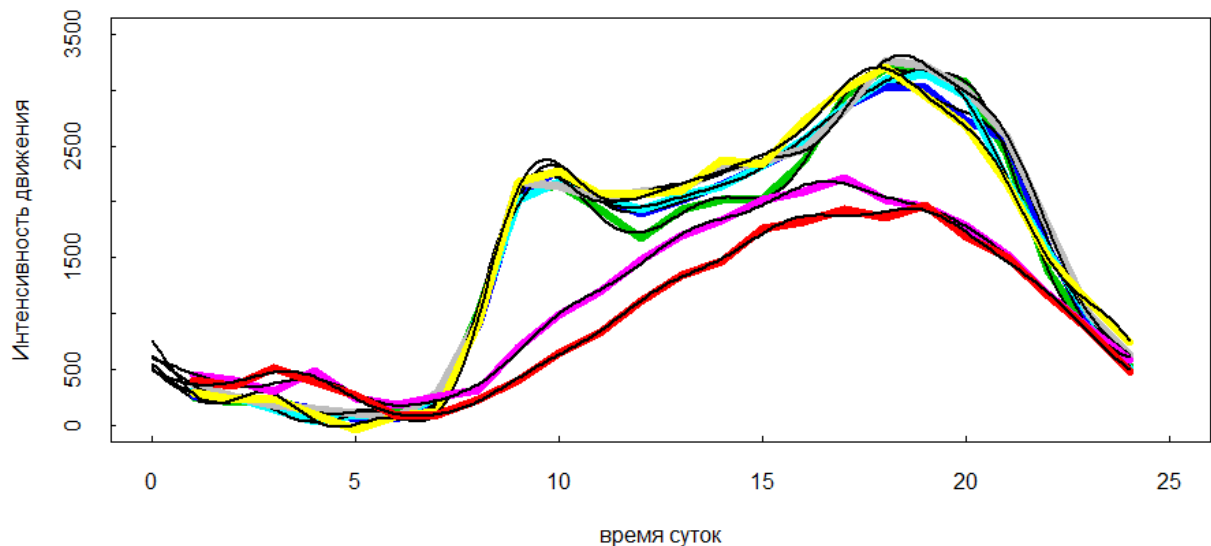


Рисунок 6. Наблюдаемые значения интенсивностей по дням недели и их аппроксимирующие линии, построенные по модели (6) с 17-ю коэффициентами

Для построенной модели суточной интенсивности движения была оценена точность приближения ряда. Относительная точность аппроксимации показана в Таблице 1.

Таблица 1 – Относительная точность аппроксимации в процентах по дням недели и по времени суток

|             | Понедельник | Вторник | Среда | Четверг | Пятница | Суббота | Воскресенье |
|-------------|-------------|---------|-------|---------|---------|---------|-------------|
| 00:00-01:00 | - 3         | 8       | - 8   | 0       | - 3     | - 9     | 2           |
| 01:00-02:00 | 0           | - 15    | 6     | - 7     | - 3     | 12      | - 11        |
| 02:00-03:00 | 4           | 17      | - 1   | 16      | 12      | - 8     | 23          |
| 03:00-04:00 | - 15        | - 13    | - 18  | - 19    | - 50    | 10      | - 15        |
| 04:00-05:00 | 23          | - 5     | 4     | 4       | - 129   | - 10    | 20          |
| 05:00-06:00 | - 17        | 40      | 16    | 49      | - 34    | 17      | - 3         |
| 06:00-07:00 | 2           | - 16    | - 13  | - 26    | - 5     | 1       | - 13        |
| 07:00-08:00 | 2           | 5       | 5     | 10      | 5       | - 6     | 16          |
| 08:00-09:00 | - 2         | - 2     | - 3   | - 4     | - 3     | 5       | - 6         |
| 09:00-10:00 | 3           | 1       | 2     | 3       | 3       | - 3     | 1           |
| 10:00-11:00 | - 3         | - 1     | - 1   | - 1     | - 1     | 2       | 1           |
| 11:00-12:00 | 3           | 1       | 1     | - 1     | - 1     | - 0     | - 2         |
| 12:00-13:00 | - 2         | - 0     | - 0   | 2       | 3       | - 1     | 1           |
| 13:00-14:00 | 1           | - 0     | 0     | - 2     | - 4     | 2       | 1           |
| 14:00-15:00 | 0           | 0       | - 1   | 1       | 4       | - 2     | - 2         |
| 15:00-16:00 | - 0         | 0       | 1     | - 0     | - 2     | 3       | 3           |
| 16:00-17:00 | 0           | - 1     | - 0   | 0       | 1       | - 3     | - 2         |
| 17:00-18:00 | - 0         | 1       | - 1   | - 0     | - 1     | 3       | 2           |
| 18:00-19:00 | - 0         | - 2     | 1     | 1       | 0       | - 2     | - 1         |
| 19:00-20:00 | 0           | 3       | - 2   | - 1     | - 0     | 3       | - 0         |
| 20:00-21:00 | - 0         | - 3     | 2     | 1       | 1       | - 2     | - 0         |
| 21:00-22:00 | 1           | 4       | - 1   | - 1     | - 1     | 3       | 2           |
| 22:00-23:00 | - 1         | - 4     | - 0   | - 0     | - 0     | - 4     | - 3         |
| 23:00-00:00 | 2           | 1       | 4     | 1       | 1       | 7       | 3           |

Было отмечено, что математическая модель, описывающая интенсивность движения через ПВП может быть применена для автоматизации расчетов прогнозируемой интенсивности движения ТС на пункте оплаты и использована в качестве вспомогательного инструмента, используемого оператором при организации и прогнозировании дорожного трафика, проходящего через пропускной пункт платной дороги.

**5. Разработана математическая модель и методики оценки параметров очереди, возникающей на ПВП при его недостаточной пропускной способности, позволяющих определить количество ТС в очереди, длину очереди и время ожидания ТС в очереди, время существования очереди.**

В диссертационной работе было отмечено, что при возникновении транспортного затора, образовавшегося на ПВП, важной задачей является определение его параметров, позволяющих оператору платной дороги своевременно произвести информирование пользователей платной дороги и принять организационные меры для его устранения. В условиях формирования затора на ПВП были рассмотрены следующие параметры затора:

1. Количество ТС в очереди;
2. Длина очереди ТС;
3. Время ожидания ТС в очереди.

Для расчета длины очереди были сделаны следующие допущения:

$X$  является случайной величиной, равной количеству ТС, покидающих участок ПВП, в единицу времени, распределенная по закону Пуассона с параметром  $\lambda^{exit}$  :  $P(X = m) = \frac{\lambda^{exit m}}{m!} e^{-\lambda^{exit}}$ ;

$Y$  является случайной величиной, равной количеству ТС, въезжающих на участок ПВП и прибывающих к началу очереди, в единицу времени, распределенная по закону Пуассона с параметром  $\lambda$  :  $P(Y = n) = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda}$ ;

Тогда  $V = Y - X$  также является дискретной случайной величиной, её закон распределения задан дискретной функцией:

$$f(k, \lambda, \lambda^{exit}) = P(V = k) = e^{-(\lambda + \lambda^{exit})} \left( \frac{\lambda}{\lambda^{exit}} \right)^{\frac{k}{2}} I_{|k|}(2\sqrt{\lambda \times \lambda^{exit}}),$$

где  $I_{|k|}(x)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода, при  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty$ .

Данное распределение является распределением Скеллама (распределение разности двух независимых пуассоновских случайных величин), и выглядит следующим образом:

$$I_{|k|}(2\sqrt{\lambda \times \lambda^{exit}}) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m + |k| + 1)} (\lambda \times \lambda^{exit})^{m + \frac{|k|}{2}}$$

Тогда:

$$f(k, \lambda, \lambda^{exit}) = P(V = k) = e^{-(\lambda + \lambda^{exit})} \times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m + |k| + 1)} \lambda^{m+|k|} \times \lambda^{exit m}$$

Основные характеристики случайной величины  $V$ :

- Математическое ожидание:  $E(V) = \lambda - \lambda^{exit}$ ;
- Дисперсия:  $D(V) = \lambda + \lambda^{exit}$ ;
- Стандартное отклонение:  $\sigma(V) = \sqrt{\lambda + \lambda^{exit}}$ ;
- Коэффициент асимметрии:  $\gamma_1 = \frac{\lambda - \lambda^{exit}}{(\lambda + \lambda^{exit})^{\frac{3}{2}}}$ .

На Рисунке 7 показаны примеры функций вероятностей распределения Скеллама (вероятности определены для целых значений  $k$ ) для разных значений параметров  $\lambda$ ,  $\lambda^{exit}$ .

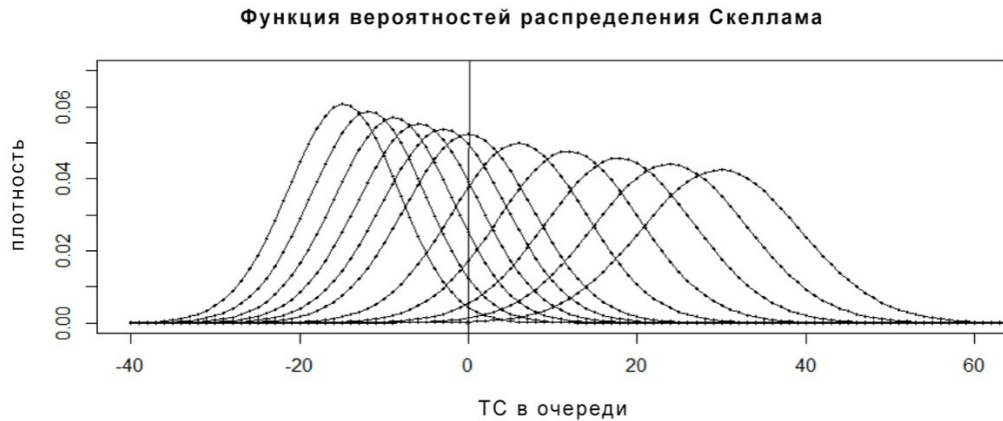


Рисунок 7. Примеры функций вероятностей распределения Скеллама для различных соотношений интенсивностей входного и выходного потока. При  $\lambda \leq \lambda^{exit}$  максимум (мода) меньше нуля, при  $\lambda \geq \lambda^{exit}$  максимумы больше нуля

Из Рисунка 7 был сделан вывод о том, что:

- при  $\lambda = \lambda^{exit}$ , вероятность существования очереди равна 0.5, вероятность её отсутствия также равна 0,5;
- при  $\lambda \leq \lambda^{exit}$  вероятность существования очереди меньше 0.5, она положительна и асимптотически стремится к 0 при  $\lambda \rightarrow 0$ ;
- при  $\lambda \geq \lambda^{exit}$  вероятность существования очереди больше 0.5 и асимптотически стремится к 1 при  $\lambda \rightarrow +\infty$ .

Была построена математическая модель длины очереди  $V^*(t_0, \tau)$ , образовавшейся в течение промежутка времени  $[t_0, t_0 + \tau]$  при переменной интенсивности входного потока  $\lambda(t)$ , как случайной величины, установлен её закон распределения, рассчитано его математическое ожидание:



$$\begin{cases} P(V^* = 0) = e^{-(\Lambda(t_0, \tau) + \lambda^{exit} \tau)} \sum_{k=0}^{-\infty} \left( \frac{\Lambda(t_0, \tau)}{\lambda^{exit} \tau} \right)^{\frac{k}{2}} I_{|k|} \left( 2\sqrt{\Lambda(t_0, \tau) \times \lambda^{exit} \tau} \right), k \leq 0, k \in Z \\ P(V^* = k) = e^{-(\Lambda(t_0, \tau) + \lambda^{exit} \tau)} \left( \frac{\Lambda(t_0, \tau)}{\lambda^{exit} \tau} \right)^{\frac{k}{2}} I_k \left( 2\sqrt{\Lambda(t_0, \tau) \times \lambda^{exit} \tau} \right), k > 0, k \in Z \end{cases}$$

где  $V^*$  – случайная величина «длина очереди»;

$\Lambda(t_0, \tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \lambda(t) dt$  – накопленная интенсивность входного потока в течении промежутка времени от  $[t_0, t_0 + \tau]$ ;

$t_0$  – момент начала формирования очереди ТС;

$\tau$  – длина промежутка времени.

Математическая модель времени ожидания в очереди, образующейся перед ПВП в условиях высокой интенсивности движения транспортного потока, превышающей предельную пропускную способность ПВП была сформулирована и представлена в виде теоремы, определяющей основные характеристики для случайной величины времени ожидания ТС в очереди.

**Теорема.** Пусть  $X \in Poisson(\lambda^{exit})$  – случайная величина, количество ТС, выезжающих с участка ПВП в единицу времени,  $Y \in Poisson(\lambda)$  – случайная величина, количество ТС, подъезжающих к участку ПВП и прибывающих к началу очереди в единицу времени.

Пусть  $T$  – случайная величина, время, за которое все ТС, прибывающие к началу очереди за единицу времени (с интенсивностью  $\lambda$ ), покинут очередь при интенсивности потока ТС, покидающих очередь  $\lambda^{exit}$ .

Математическое ожидание случайной величины  $T$  равно:  $E(T) = \frac{\lambda + 1}{\lambda^{exit}}$ , дисперсия:  $D = \frac{\lambda + 1}{\lambda^{exit}^2}$ , стандартное отклонение:  $\sigma = \frac{\sqrt{\lambda + 1}}{\lambda^{exit}}$ .

При доказательстве теоремы была построена функция плотности распределения случайной величины  $T$  – времени, за которое все ТС, прибывающие к началу очереди за единицу времени (с интенсивностью  $\lambda$ ), покинут очередь при условии, что интенсивность потока ТС, покидающих очередь за единицу времени  $\lambda^{exit}$ , имеющая следующий вид:

$$f^*(0, \lambda, \lambda^{exit} t) = \lambda^{exit} f(0, \lambda, \lambda^{exit} t) = \lambda^{exit} \times e^{-(\lambda + \lambda^{exit} t)} \times I_0(2\sqrt{\lambda \lambda^{exit} t}).$$

Математическая модель времени ожидания, затрачиваемого ТС на прохождение участка ПВП в очереди была представлена в следующем виде:

$$E(T \times \tau - \tau) = \frac{\Lambda(h_0, \tau) + 1 - \lambda^{exit} \tau}{\lambda^{exit}}$$

Стандартное отклонение времени ожидания очереди имеет следующий вид:

$$\sigma(T \times \tau - \tau) = \frac{\sqrt{\Lambda(h_0, \tau) + 1}}{\lambda^{exit}},$$

где  $\Lambda(h_0, \tau) = \int_{h_0}^{h_0 + \tau} \lambda(h) dh$ .

После того, как были определены математические модели параметров транспортного затора на пункте оплаты, была произведена их оценка для очереди ТС, образующейся перед ПВП на съезде с платной дороги при высокой интенсивности движения, превышающей пороговое значение для данного пропускного пункта. Для оценки данных параметров, в среде статистического пакета R были выполнены соответствующие расчеты.

Результаты расчетов показаны на Рисунках 8 и 9 и в Таблице 2.

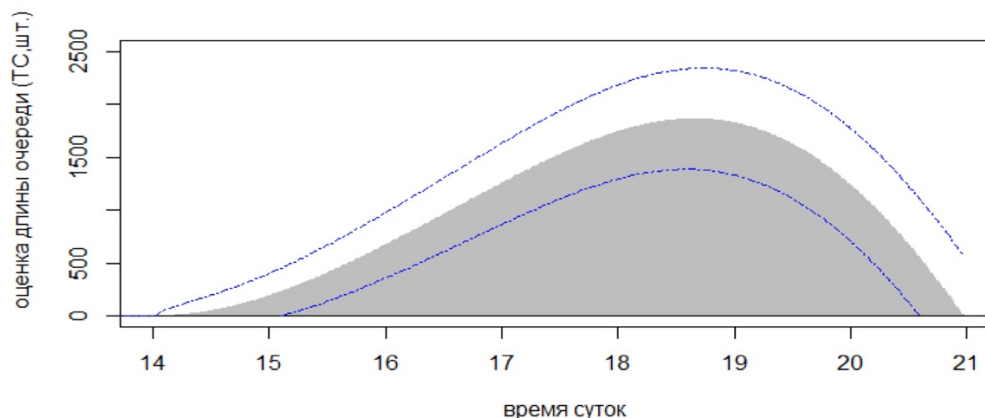


Рисунок 8. Оценка среднего количества ТС в очереди в течение дня. Синяя линия – коридор  $\pm 3\sigma$

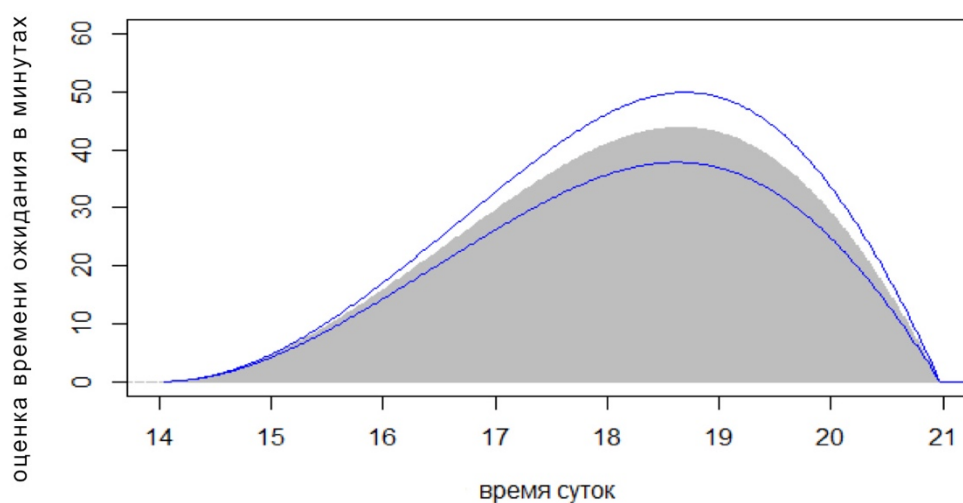


Рисунок 9. Оценка времени ожидания (в минутах) ТС в очереди от момента подъезда к началу очереди и до въезда на участок ПВП, в зависимости от времени суток, когда ТС подъехало к началу очереди. Синими линиями показан коридор возможных отклонений  $\pm 3\sigma$  к среднему времени ожидания

Таблица 2 – Время суток, средняя длина очереди, коридор возможных отклонений к средней длине очереди  $\pm 3\sigma$ , оценка средней длины очереди в километрах, среднее время ожидания ТС в очереди до въезда на участок ПВП и коридор возможных отклонений к среднему времени ожидания  $\pm 3\sigma$

| Время суток | Средняя длина очереди, ТС | Отклонение средней длины очереди - $3\sigma$ , ТС | Отклонение средней длины очереди + $3\sigma$ , ТС | Средняя длина очереди при движении ТС в 3 полосы, км | Средняя длина очереди при движении ТС в 4 полосы, км | Среднее время ожидания в очереди, мин. | Отклонение среднего времени ожидания - $3\sigma$ , мин. | Отклонение среднего времени ожидания + $3\sigma$ , мин. |
|-------------|---------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 14:00       | -                         | -                                                 | -                                                 | -                                                    | -                                                    | -                                      | -                                                       | -                                                       |
| 15:00       | 189                       | -                                                 | 403                                               | 0,50                                                 | 0,38                                                 | 4,50                                   | 4,20                                                    | 4,70                                                    |
| 16:00       | 667                       | 356                                               | 977                                               | 1,78                                                 | 1,33                                                 | 16,00                                  | 14,00                                                   | 17,00                                                   |
| 17:00       | 1 250                     | 865                                               | 1 634                                             | 3,33                                                 | 2,50                                                 | 30,00                                  | 26,00                                                   | 33,00                                                   |
| 18:00       | 1 739                     | 1 295                                             | 2 184                                             | 4,64                                                 | 3,48                                                 | 41,00                                  | 36,00                                                   | 46,00                                                   |
| 18:40       | 1 862                     | 1 385                                             | 2 340                                             | 4,97                                                 | 3,72                                                 | 44,00                                  | 38,00                                                   | 50,00                                                   |
| 19:00       | 1 825                     | 1 331                                             | 2 320                                             | 4,87                                                 | 3,65                                                 | 43,00                                  | 37,00                                                   | 49,00                                                   |
| 20:00       | 1 238                     | 704                                               | 1 772                                             | 3,30                                                 | 2,48                                                 | 29,00                                  | 25,00                                                   | 34,00                                                   |
| 20:30       | 676                       | 126                                               | 1 227                                             | 1,80                                                 | 1,35                                                 | 16,00                                  | 13,50                                                   | 18,40                                                   |
| 21:00       | -                         | -                                                 | -                                                 | -                                                    | -                                                    | -                                      | -                                                       | -                                                       |

В Таблице 2 показаны:

1. средняя длина очереди в единицах ТС;

2. коридор возможных ( $\pm 3\sigma$ ) изменений к длине очереди;
3. оценка средней длины очереди в километрах;
4. среднее время ожидания в очереди до въезда на участок ПВП;
5. коридор возможных ( $\pm 3\sigma$ ) изменений среднего времени ожидания.

Максимальное количество ТС в очереди оценивается в 1863 единицы. При формировании очереди в 3 ряда, его длина составляет 4,97 км, при формировании в 4 ряда – 3,72 км. Наибольшая длина очереди образуется в 18:40. Расчетное время существования очереди составляет период времени: с 14:03 до 20:59. Диапазон возможного изменения длины очереди в момент наибольшей длины лежит в пределах от 1386 до 2343 ТС.

Для подтверждения достоверности полученных результатов были использованы данные с поисково-информационной картографической службы «Яндекс.Карты». Данный ресурс позволяет отображать как текущую дорожную обстановку в режиме реального времени, так и прогнозируемые заторы, на основании статистических данных.

В качестве примера на Рисунке 10 показаны результаты мониторинга затора на данном участке в четверг, 21 января 2021 года, в 18:30.

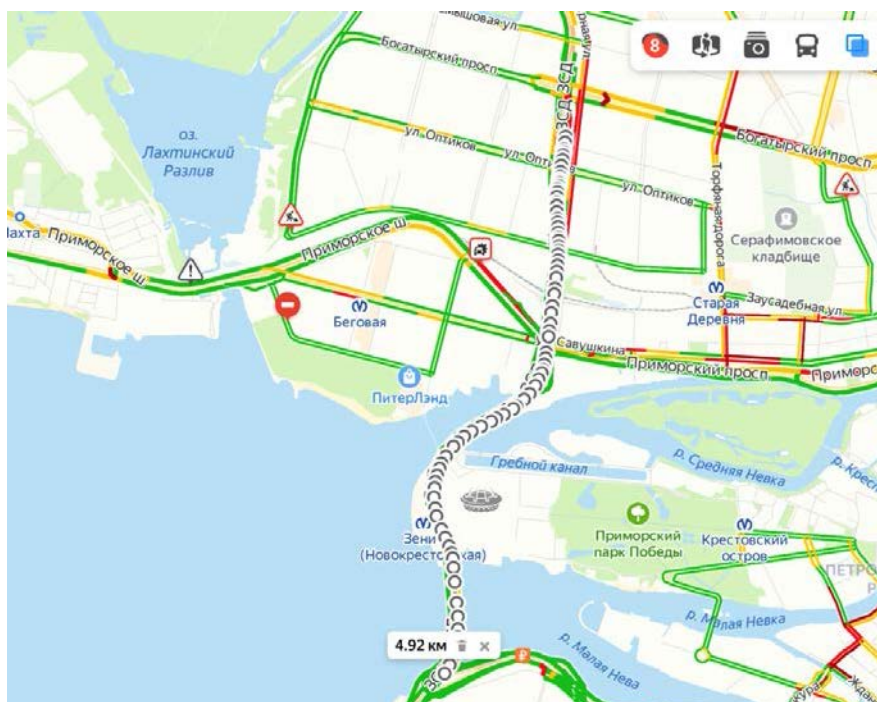


Рисунок 10. Затор (протяженностью 4,92 км) на ЗСД, образовавшаяся в часы пик перед ПВП на съезде с платной дороги 21 января 2021 года, в 18:30, по данным картографического сервиса «Яндекс.Карты»

Как показано на Рисунке 10, протяженность скопления ТС, образовавшегося в час пик в будний день, достигает 4,92 км. Наблюдаемое значение близко к полученным результатам среднего максимального количества ТС в очереди, указанным в Таблице 2.

## 6. Произведена оценка рисков экономических потерь оператора платной дороги, связанных с возможностью возникновения транспортных заторов и изменения параметров транспортного потока.

Разработанные в рамках диссертационного исследования имитационные и математические модели могут применяться для оценки и оптимизации микроэкономических процессов оператора в управлении эксплуатационной деятельностью платной дороги. В работе был рассмотрен ряд задач, направленных на повышение экономической эффективности ПВП, возникающих при образовании транспортных заторов и изменении параметров транспортного потока.

В Российской Федерации в инфраструктурных проектах, в том числе проектах платных автомобильных дорог, часто применяется организационно-правовая форма государственно-

частного партнерства (далее – ГЧП). Отношения в рамках ГЧП в дорожной отрасли народного хозяйства РФ являются относительно новыми и выводят на рынок услуг предприятия (фирмы), занимающие нишу управления платными автомобильными дорогами. В круг интересов всех участников хозяйственных отношений, возникающих в процессе эксплуатации платной дороги: концедента (обладателя права собственности на объект концессии), концессионера (инвестора, получающего возможность эксплуатировать объект на возмездной основе) и оператора входит проведение исследований в областях формирования и управления эффективными механизмами потребительского спроса на услуги платных дорог и их количественной оценки для снижения предпринимательских рисков и обоснования инвестиционных решений.

После получения результатов оценки параметров заторов, возникающих на ПВП на основном ходу платной дороги, была произведена оценка экономических рисков оператора платной дороги, которые могут возникать при эксплуатации ПВП, при изменении конфигурации СВП и потере функционирования полос оплаты. Оценка возможности возникновения затора продолжительностью более 30 минут при различных конфигурациях ПВП на основном ходу платной дороги представлена в Таблице 3.

Таблица 3 – Возможность возникновения затора продолжительностью более 30 минут при различных конфигурациях ПВП.

| № | Конфигурация СВП      |               | Затор продолжительностью более 30 минут |      |      |     |      |      |     |
|---|-----------------------|---------------|-----------------------------------------|------|------|-----|------|------|-----|
|   | Автоматические полосы | Ручные полосы | Пон.                                    | Вт.  | Ср.  | Чт. | Пт.  | Сб.  | Вс. |
| 1 | 5                     | 4             | нет                                     | нет  | нет  | нет | риск | нет  | нет |
| 2 | 4                     | 4             | нет                                     | нет  | нет  | нет | да   | нет  | нет |
| 3 | 3                     | 4             | нет                                     | нет  | нет  | нет | да   | нет  | нет |
| 4 | 4                     | 3             | нет                                     | нет  | нет  | нет | да   | нет  | нет |
| 5 | 5                     | 3             | нет                                     | нет  | нет  | нет | да   | нет  | нет |
| 6 | 5                     | 2             | риск                                    | риск | риск | да  | да   | риск | нет |

Для дней недели значение «нет» указывает на отсутствие затора продолжительностью более 30 минут, значение «да» – на наличие такого затора, значение «риск» – на повышенный риск возникновения затора, когда пропускная способность пункта оплаты приближена к интенсивности движения на ПВП.

В качестве примера повышения качества управленческих решений, улучшающих эффективность эксплуатации ПВП, была рассмотрена возможность снижения операционных затрат на оплату труда кассиров-операторов путем изменения конфигурации ПВП в течении суток на основании данных о предельных пропускных способностях пункта оплаты, полученных в результате имитационного моделирования. Результаты оценки показали возможность снижения общего количества восьмичасовых смен кассиров-операторов, обслуживающих ПВП на основном ходу автомобильной дороги с 70 до 45 единиц в неделю (с 300 до 193 смен в месяц). Также был продемонстрирован пример расчета количества смен кассиров-оператора при повышении суточной интенсивности движения через ПВП на 40%. Оценка увеличения количества смен кассиров-операторов, обеспечивающих работу ПВП в конфигурации, повышающей пропускную способность пункта оплаты при увеличении дорожного трафика, составила с 193 до 215 смен в месяц.

В работе был представлен пример предварительной оценки стоимости инвестиций в комплексную модернизацию ПВП, которые могут быть произведены оператором платной дороги при увеличении суточной интенсивности движения через ПВП на 40%. При расчете были определены следующие параметры:

- Динамика изменения тарифов;
- Объем потенциальных штрафов оператора за недостаточную пропускную способность ПВП, приводящую к возникновению транспортных заторов, являющихся потерями при операционной деятельности на эксплуатационной стадии;
- Размер увеличения операционных расходов;

- Ставка дисконтирования.

Произведенная предварительная оценка позволила оценить размер инвестиционных расходов в проект комплексной модернизации ПВП при условии его окупаемости в течении 5-ти лет. Были получены следующие результаты оценки:

1. Инвестиционные затраты в размере 1 258 млн.руб. полностью окупятся через 5 лет с показателями:  $NPV=0$ ,  $IRR$  равна ставке дисконтирования 5,67%, горизонт планирования 5 лет;
2. Инвестиционные затраты в размере 500 млн.руб. полностью окупятся через 22 месяца с показателями:  $NPV=717$  млн.руб.,  $IRR=50,24\%$ , горизонт планирования 5 лет;
3. Инвестиционные затраты, сопоставимые с суммой потенциальных штрафов оператора за 5 лет и окупающиеся в этот же срок составят 69,24 млн.руб.

Кроме того, учитывая риски оператора, возникающие при образовании транспортного затора, в рамках диссертационного исследования был предложен подход по изменению тарифной политики платной дороги путем использования более гибкой тарификации, основывающейся на разделении дневного тарифа на несколько временных интервалов, и применении повышающих коэффициентов от базового тарифа при оплате проезда в часы пик. На примере ПВП на основном ходу платной дороги были рассмотрены повышающие коэффициенты стоимости проезда в час пик, а также оценены риски снижения получаемого дохода оператора от сбора платы за проезд.

### III. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ (ЗАКЛЮЧЕНИЕ)

В связи с растущей актуальностью и важностью влияния инфраструктурных проектов на транспортно-логистические, экономические, социальные и экологические сферы развития страны, исследования, направленные на выработку наиболее эффективных технических, технологических, организационных решений в области ИТС, и, в частности СВП, будут способствовать формированию нормативной базы в виде методических и регламентирующих документов, позволяющих законодательно закрепить наиболее результативные решения, методы и модели.

В данном диссертационном исследовании были предложены математические и инструментальные методы и модели, позволяющие производить оценку функционирования как проектируемых, так и действующих ПВП, введенных в эксплуатацию.

На примерах проекта платной дороги ЗСД в г. Санкт-Петербурге были построены имитационные модели двух ПВП, расположенных на основном ходу и съезде с автомагистрали. Данные имитационные модели имеют параметры как обобщенной методики моделирования, так и дополнительные параметры, определяемые в период эксплуатации объекта и влияющие на пропускную способность пункта оплаты.

В заключительной части диссертационного исследования были сформулированы практические рекомендации по использованию разработанных в диссертации инструментальных и математических моделей. Так, разработанные модели пропускных пунктов могут быть применены оператором платной дороги на стадии эксплуатации для решения следующих задач, повышающих качество принятия управленческих решений:

1. оценки текущей пропускной способности ПВП;
2. прогнозирования пропускной способности ПВП на заданный период времени;
3. оптимизации конфигурации СВП на ПВП;
4. анализа конфигураций ПВП при модернизации ПВП;
5. оптимизация операционных расходов оператора ПВП;
6. оценки инвестиционных проектов развития СВП.

Кроме того, имитационная модель может быть применена оператором для решения других прикладных задач на этапе эксплуатации ПВП как элемента платной дороги. «Цифровой двойник» ПВП может использоваться для моделирования нештатных ситуаций на пункте оплаты (например, в случае возникновения ДТП при проезде через полосу оплаты), анализа их возможных последствий и выработки эффективных решений по их устранению, позволяющих избежать возникновения транспортного затора.

Кроме того, разработанные имитационные модели ПВП могут быть применены на этапе проектирования ПВП в качестве дополнительного инструментального метода, позволяющего:

1. подтвердить произведенные расчеты при определении конфигурации ПВП;
2. определить наличие «узких мест» при проектировании платной дороги, образующихся в непосредственной близости к ПВП.

Разработанные математические модели определения параметров транспортного затора, возникающего перед пунктом оплаты, могут быть применены оператором для его своевременного устранения путем:

1. оптимизации конфигурации СВП;
2. распространения средств оплаты проезда, ускоряющих процесс оплаты проезда на полосе оплаты;
3. своевременного информирования пользователей об образующемся заторе на ПВП;
4. других организационных методов.

Методические подходы, предлагаемые в данном диссертационном исследовании, также могут быть применены в составе информационных систем для автоматизации мероприятий по регулированию трафика в периоды пиковой нагрузки ПВП платной дороги.

Разработанные имитационные и математические модели способствуют решению широкого круга эксплуатационных задач, направленных на повышение качества обслуживания пользователей, снижение экономических рисков и операционных затрат на этапе эксплуатации платных автомобильных дорог. Параметры, полученные в результате имитационного и математического моделирования, могут быть использованы при выполнении расчетов инвестиционных проектов объектов автодорожной транспортной инфраструктуры.

Принимая во внимание увеличение темпов внедрения платных дорог в отечественную транспортную инфраструктуру за последнее десятилетие, можно утверждать, что актуальность результатов подобных исследований будет неизменно расти.

#### **IV. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**Статьи, опубликованные в сборниках научных трудов, включённых в глобальные индексы цитирования Scopus и Web of Science**

1. Talavirya A., Laskin M. Using of discrete-event modeling in throughput capacity analysis of a toll plaza at the exit of the interurban toll road // Proceedings of the 32nd European Modeling & Simulation Symposium (EMSS 2020). 2020. pp. 227-234. (авт. вклад 0,35 п.л.).
2. Talavirya A., Laskin M. Simulation modeling during operation of the toll collection station on the intercity toll road. // XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021". Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. 246, pp. 619-627. (авт. вклад 0,3 п.л.).

**Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК России**

3. Ласкин М.Б., Талавирия А.Ю. Оценка изменений рыночной стоимости жилой недвижимости в зоне введенной в эксплуатацию транспортной развязки внутригородской платной автомобильной дороги // Научно-практический рецензируемый журнал «Статистика и Экономика». 2019. Том 16. № 5, С. 57-69. (авт. вклад 0,33 п.л.).
4. Ласкин М.Б., Талавирия А.Ю., Черкесова П. А. Статистический анализ изменений стоимости недвижимости в зоне введенной в эксплуатацию платной дороги // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (77), С. 331-343. (авт. вклад 0,26 п.л.).
5. Талавирия А.Ю., Ласкин М.Б. Имитационное моделирование работы пункта взимания платы на основном ходу внутригородской платной дороги // Научно-практический журнал «Информатизация и связь». 2020. №5, С. 67-77. (авт. вклад 0,61 п.л.).
6. Талавирия А.Ю., Ласкин М.Б. Подход к оценке рисков оператора платной автомобильной дороги // Статистика и Экономика. 2021. №18 (3), С. 12-26. (авт. вклад 0,58 п.л.).
7. Талавирия А.Ю., Ласкин М.Б. Оценка изменений тарифов платной дороги в условиях повышенной транспортной нагрузки // Статистика и Экономика. 2021. №18 (5), С. 4-13. (авт. вклад 0,47 п.л.).

### **Статьи в профессиональных журналах и научных сборниках**

8. Талавирия А.Ю. Проблемы комплексной оценки влияния и прогнозирования изменений городской инфраструктуры при внедрении платных автомобильных дорог // Логистика: Современные тенденции развития. 2018. Часть 2, С. 125-129. (авт. вклад 0,24 п.л.).
9. Талавирия А.Ю. Обзор современных тенденций развития городских и автомагистральных АСУДД // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. Выпуск 5 / СПОИСУ. – СПб., 2018. С. 287-290. (авт. вклад 0,45 п.л.).
10. Ласкин М.Б., Свистунова А.С., Талавирия А.Ю. Оценка суточной интенсивности движения пункта взимания платы на съезде внутригородской платной дороги // Системный анализ в проектировании и управлении. В 3 ч. Ч. 2: сборник научных трудов XXIV Международной Научно-практической конференции, №2, 13 – 14 октября 2020 / Под общ. ред. В.Н. Козлова, А.Н. Фирсова – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2020. С. 258-275. (авт. вклад 0,37 п.л.).
11. Талавирия А.Ю. Применение методов интеллектуального анализа данных на этапе эксплуатации платных автомобильных дорог // Системный анализ в проектировании и управлении. В 3 ч. Ч. 2: сборник научных трудов XXIV Международной Научно-практической конференции, №2, 13 – 14 октября 2020 / Под общ. ред. В.Н. Козлова, А.Н. Фирсова – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2020. С. 284-296. (авт. вклад 0,74 п.л.).
12. Талавирия А.Ю., Ласкин М.Б. Применение методов имитационного моделирования на этапе эксплуатации платных автомобильных дорог // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. Выпуск 8 / СПОИСУ. – СПб., 2020. С. 295-299. (авт. вклад 0,28 п.л.).
13. Талавирия А.Ю., Ласкин М.Б. Имитационное моделирование при эксплуатации пункта взимания платы внутригородской платной автодороги. // Цифровые технологии в логистике и инфраструктуре : международная конференция, 26–27 ноября 2020 г., Санкт-Петербург. – СПб. : ПОЛИТЕХ- ПРЕСС, 2021. С. 20-26. (авт. вклад 0,12 п.л.).