

На правах рукописи



Искаков Тимур Анвярович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ
ПАССАЖИРОПОТОКА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ
КРУПНОМАСШТАБНЫХ КУЛЬТУРНО-МАССОВЫХ
МЕРОПРИЯТИЙ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (транспорт)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ) на кафедре «Управление и защита информации».

Научный
руководитель: доктор технических наук, профессор
Сидоренко Валентина Геннадьевна

Официальные
оппоненты: **Сотников Евгений Александрович**
доктор технических наук, профессор, АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», главный научный сотрудник;

Астрахан Владимир Ильич
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», руководитель центра обучения.

Ведущая
организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Защита состоится «4» марта 2020 г., в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 218.005.14 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.rut-miit.ru.

Автореферат разослан « » декабря 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сидоренко Валентина Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При планировании крупномасштабных культурно-массовых мероприятий (ККММ) задачи, связанные с организацией своевременного и безопасного прибытия и отбытия большого числа людей, являются ключевыми для организаторов. В связи с ростом пассажиропотока при проведении мероприятий такого масштаба, транспортная инфраструктура работает в условиях сверхнагрузок. Наибольшее влияние испытывает на себе городской рельсовый транспорт, планирование функционирования которого имеет важнейшее значение.

В связи с этим актуальной становится задача автоматизации регулирования пассажиропотока при проведении ККММ. В период глобальной цифровизации определение качества работы транспортной инфраструктуры эффективно выполнять на цифровых двойниках – имитационных моделях. При выборе алгоритмов автоматизированного регулирования пассажиропотока при проведении ККММ необходимо проведение имитационных экспериментов с целью получения численных значений выбранных критериев качества управления и выбора способа управления, обеспечивающего требуемые значения критериев качества управления.

Одним из аспектов решения задачи является определение алгоритмов и методов автоматизированного регулирования пассажиропотока при проведении ККММ, выбор математического аппарата и программного обеспечения для разработки имитационных моделей ККММ с учетом изменяющихся параметров.

Степень разработанности темы исследования

Исследованиям отдельных аспектов транспортного обеспечения и подготовки ККММ, в частности, задачам регулирования пассажиропотока на объектах транспортной инфраструктуры посвящены многие научные труды. Публикации по этим вопросам можно разделить на следующие группы:

– изучение и создание имитационных моделей пассажиропотоков на различных видах транспорта – работы В. К. Абросимова, А. С. Аكوпова, А. О. Аристова, А. Л. Бекларяна, С. П. Вакуленко, В. В. Доенина, Н. Ю. Еврееновой, А. С. Карсакова, А. Ф. Ланового, О. Н. Мадяр, Н. Н. Майорова, Р. В. Мельникова, А. Г. Пашкевича, М. Р. Якимова, Хэлбинга Д., Махмуда И. и др.;

– решение задач планирования и управления перевозочным процессом метрополитенов, нагрузкой которых являются переменные во времени пассажиропотоки – работы Е. П. Балакиной, Л. А. Баранова, Н. С. Бахвалова, Е. В. Вентцеля, П. Ю. Воробьева, В. С. Ерофеева, А. М. Замышляева, В. П. Козлова, В. В. Кульбы, Э. К. Лецкого, Л. Н. Логиновой, А. К. Межоха, Ю. О. Пазойского, А. И. Сафронова, В. Г. Сидоренко, И. Б. Шубинского и др.;

– административно-правовые и организационные аспекты деятельности различных служб по обеспечению культурно-массовых мероприятий – работы Е. И. Бочковой, Д. А. Коротченкова, В. В. Меньших, А. А. Морозова, Д. Н. Никитина, Н. В. Пешковой, В. П. Свечкарева и др.

В публикациях, известных автору, не рассматриваются вопросы специфики автоматизированного регулирования пассажиропотоков при проведении ККММ.

Проведенный анализ показал необходимость проработки этих вопросов и создания соответствующей методики.

Объектом исследования является транспортная инфраструктура и регулирование пешеходных потоков при проведении ККММ.

В качестве **предмета исследования** рассматриваются алгоритмы и методы автоматизированного регулирования пассажиропотока при проведении ККММ.

Целью диссертации является разработка структуры и математического обеспечения автоматизированной системы регулирования пассажиропотока при проведении ККММ (АСРП).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ состояния вопроса в области планирования и организации транспортного обслуживания ККММ с учетом административно-правовых и организационных аспектов деятельности различных служб.

2. Выбрать критерии качества планирования и управления пассажиропотоком и транспортной инфраструктурой при проведении ККММ.

3. Разработать методику автоматизированного регулирования пассажиропотока при проведении ККММ, учитывающую критерии качества управления транспортной инфраструктурой ККММ.

4. Разработать структуру АСРП и определить состав математических моделей системы.

5. Разработать математические модели, используемые в ходе автоматизированного регулирования пассажиропотока при проведении ККММ.

6. Разработать имитационную модель ККММ и провести имитационные эксперименты с целью анализа качества планирования и управления пассажиропотоком и транспортной инфраструктурой при проведении ККММ.

7. Сформулировать типовые рекомендации с целью достижения критериев качества планирования и управления пассажиропотоком и транспортной инфраструктурой при проведении ККММ.

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (транспорт), пункт 15 Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУТП, АСУП, АСПП и др.).

Научная новизна работы состоит в том, что:

– Формализованы требования к АСРП, что позволило синтезировать структуру и множество моделей этой системы;

– Составлен классификатор ККММ, позволяющий определить состав объектов и их объединений, учитываемых при планировании ККММ – зон разграничений, уровней планирования и перечня объектов управления, что позволило выполнить декомпозицию задач, стоящих перед организаторами.

– На основе анализа статистических данных выявлены различия в поведении участников пешеходного потока зрителей, специфика их взаимодействия между собой, что позволило рассматривать пешеходный поток

как неоднородный и выделить в его составе клиентские группы. Эти результаты сделали возможным адекватно моделировать поведение участников пешеходных потоков при проведении ККММ.

– Разработана методика автоматизированного регулирования пассажиропотока при проведении ККММ, учитывающая критерии качества управления транспортной инфраструктурой ККММ.

– Проведено исследование объекта во всех зонах разграничения при построении математических моделей, в результате которого представлено формализованное описание поведения клиентских групп пешеходного потока, возникающих в моделируемом пространстве.

– Создана имитационная модель функционирования зон разграничения при проведении ККММ, учитывающая в отличие от известных неоднородность пешеходного потока, различия в критериях оценки качества функционирования систем обслуживания в различных зонах разграничения.

– Выполнен анализ результатов имитационного моделирования, позволивший сформулировать типовые рекомендации по достижению целевых значений критериев качества регулирования пассажиропотока.

Теоретическая и практическая значимость состоит в том, что:

– Выполнен анализ, дающий возможность использовать существующие научные подходы, методологии, методы для обработки полученных в ходе исследования данных при подготовке к ККММ и сформулировать требования к структуре и функционалу АСРП.

– Выявлены уровни планирования и зон разграничения при проведении ККММ. В зависимости от их комбинаций это позволяет выделять клиентские группы в составе пешеходного потока и задействованные объекты инфраструктуры, что имеет важное значение при решении задач регулирования пассажиропотока.

– Составлен классификатор, позволяющий выявить частные задачи регулирования пассажиропотока, характерные для конкретной группы мероприятий, и выбрать критерии качества функционирования объектов инфраструктуры.

– Определен состав математического обеспечения АСРП, позволяющий решать задачи автоматизированного регулирования пассажиропотока при проведении ККММ.

– Представлена графическая интерпретация структурной схемы системы обслуживания, которая позволяет решать множество задач планирования транспортных процессов при проведении ККММ в едином информационном пространстве.

– Создана математическая модель пешеходного потока в различных зонах разграничения с учетом наличия в нем клиентских групп, которая позволяет решать задачи безопасного планирования и функционирования объектов инфраструктуры.

– Разработаны имитационные модели транспортной инфраструктуры с учетом наличия клиентских групп в составе прибывающего пассажиропотока на

ККММ, позволяющие решать задачи безопасного планирования функционирования транспортной инфраструктуры и пешеходного потока в зоне последней мили перед началом и по окончании ККММ.

– Сформулированы рекомендации по организации пассажиропотока и режима работы объектов транспортной инфраструктуры ККММ. Эффективность предложенных методов управления полностью подтвердилась в ходе сравнения результатов имитационного моделирования и натуральных экспериментов, включающих в том числе матчи Чемпионата Мира по футболу 2018 года (ЧМ 2018).

Методы исследований. Результаты диссертационной работы получены на основе использования теории управления, модели социальных сил пешеходного потока, математического и имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

– Структура АСРП и функциональная модель процесса планирования ККММ.

– Классификация ККММ, включая классификацию клиентских групп болельщиков, зон разграничения и уровней планирования культурно-массовых мероприятий.

– Методика автоматизированного регулирования пассажиропотока при проведении ККММ, учитывающая критерии качества управления транспортной инфраструктурой ККММ.

– Единая математическая модель пешеходного потока внутри транспортной инфраструктуры ККММ, позволяющая учесть особенности функционирования зон разграничения при проведении ККММ.

– Результаты имитационных экспериментов, выполненных с целью анализа качества регулирования пассажиропотоков при проведении ККММ.

Достоверность основных научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, опирается на адекватность разработанных моделей и обусловлена корректностью постановок задач, обоснованностью принятых допущений, подтверждением результатов имитационных экспериментов и рекомендаций, сформулированных в разработанной методике автоматизированного регулирования пассажиропотока при проведении ККММ, при проведении натуральных испытаний на реальных объектах инфраструктуры, задействованных во время ЧМ 2018.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на заседаниях кафедры «Управление и защита информации» (РУТ(МИИТ) 2016-2019 г.г.), на четырех научно-практических конференциях «Неделя Науки» (РУТ(МИИТ), 2016-2019 г.г.), на трех научно-практических конференциях «Безопасность Движения Поездов» (РУТ(МИИТ), 2016-2018 г.г.), на двух международных конференциях «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (ИПУ РАН 2016, 2017 г.г.), на двух научно-технических конференциях с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (2016, 2017 г.г.), на студенческой научно-

практической конференции «Электронный бизнес. Управление интернет-проектами. Инновации» (НИУ ВШЭ 2016 г.).

Реализация результатов работы. Разработанные модели и методика используются при планировании ККММ на стадионе «Спартак» (г. Москва) и в учебном процессе кафедры «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ). Результаты внедрения подтверждены актами.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 11 работ, 2 из них – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, приложений и списка литературы, включающего 166 наименований, изложена на 160 страницах, поясняется 41 рисунком, 25 таблицами и 4 приложениями.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, определены цель и задачи исследования.

В первой главе систематизированы работы Российских и зарубежных авторов, посвященные отдельным аспектам рассматриваемой темы исследования, таким как проведение культурно-массового мероприятия и его влияние на транспортную инфраструктуру, управление пешеходными потоками и взаимодействие с элементами транспортной инфраструктуры, транспортное обеспечение в «пиковые» часы нагрузок. Исследования, с помощью которых получены результаты, нашедшие практическое применение, основаны на математическом аппарате модели социальных сил и реализованы в виде имитационных моделей.

Вместе с тем анализ смежных областей вопроса позволил определить недостаточную степень разработанности темы исследования. Каждый блок рассматривает решение прикладных задач, которые поставлены в исследовании. Однако при их объединении возникают специфичные для такого класса мероприятий процессы, которые фундаментально изменяют подход к регулированию пассажиропотока и управлению транспортной инфраструктурой. В первую очередь необходимо определить типовые уровни планирования, зоны разграничения и состав различных групп болельщиков (клиентские группы ККММ), чьи модели поведения кардинально отличаются друг от друга. Это необходимо для разработки структуры АСРП.

При подготовке ККММ основные организационные процессы реализуются на трех уровнях. На каждом уровне планирования организаторам необходимо оценить функционирование четырех зон разграничения, представленных на Рисунке 1, внутри которых возникают и решаются задачи обслуживания и взаимодействия с посетителями.

Место проведения мероприятия следует разделить на «Площадку» и «Район мероприятия». «Площадкой» может быть стадион, спортивный комплекс, концертный зал, музей и т.д. «Районом мероприятия» или зоной последней мили

считается прилегающая территория и улично-дорожная сеть (УДС) в радиусе около 1500 метров от «Площадки».



Рисунок 1 – Зоны разграничения культурно-массового мероприятия

Транспортная инфраструктура делится на «Местную» и «Внешнюю». Под «Местной инфраструктурой» подразумевают транспортные объекты (станция метрополитена, остановка общественного транспорта, парковка и т.д.) в зоне последней мили, куда прибывают посетители массового мероприятия. Транспортные узлы региона (аэропорт, железнодорожный вокзал и т.д.), которые задействованы при проведении массового мероприятия, рассматривают как «Внешнюю инфраструктуру».

Граница между транспортной инфраструктурой и местом проведения мероприятия проходит по точке выхода из транспортных объектов в зоне последней мили.

Анализ чрезвычайных ситуаций, происходивших при проведении ККММ, позволил сделать вывод о причинах из возникновения:

- отсутствие управления пешеходными потоками;
- неслаженные действия правоохранительных органов и организаторов;
- превышение критических значений вместимости сооружений;
- отсутствие разработанных мер реагирования при возникновении чрезвычайных ситуаций.

Эти факторы следует учитывать при подготовке транспортного обеспечения и управлении пешеходными потоками во время проведения ККММ. Чаще всего трагедии происходили во время спортивных или религиозных мероприятий, когда эмоциональность мероприятия крайне высока. В этих ситуациях участники мероприятия повышено эмоциональны из-за ограниченности во времени перед началом мероприятия, а пересечение пассажиропотоков некоторых клиентских групп может привести к возникновению беспорядков и других нештатных ситуаций.

При анализе ККММ необходимо учитывать неоднородность пешеходных потоков. Рассмотрим в качестве примера Чемпионат мира по футболу – особое мероприятие (мега-событие), которое привлекает огромное количество болельщиков и многократно увеличивает нагрузку на транспортную систему всего региона, что в свою очередь требует детальной проработки транспортного обеспечения, в частности регулирования пассажиропотока. На каждом уровне планирования необходимо учитывать различные модели поведения клиентских групп болельщиков и их потребности в транспортном обеспечении. Исходя из этого были проанализированы требования и рекомендации FIFA.

ЧМ 2018 посетили различные группы болельщиков, организаторов и официальных лиц, чьи модели поведения существенно отличаются друг от друга. Рассмотрим особенности взаимодействия представителей этих групп между собой. Обычные болельщики обеих команд в большинстве случаев ведут себя мирно и спокойно передвигаются вместе в одном пешеходном потоке. То же самое можно сказать про нейтральных зрителей и официальных лиц. Будем считать степень взаимодействия (возможность возникновения конфликтных ситуаций) представителей из этих клиентских групп минимальным. Однако, к сожалению, активные болельщики бывают агрессивны. Конфликтные ситуации могут случаться даже с болельщиками своей команды, а передвижение активных болельщиков противоборствующих команд в одном пешеходном потоке неизбежно приведет к возникновению беспорядков. В связи с этим отдельное внимание следует уделить разделению маршрутов передвижения болельщиков команд-соперников, в особенности активных болельщиков. Активные болельщики предпочитают передвигаться группами по несколько человек или единым фронтом, нежели поодиночке. В зависимости от принадлежности к той или иной группе посетитель мероприятия имеет билет на определенную трибуну / сектор фан-зоны, что влияет на маршрут его передвижения. Графическая интерпретация классификации клиентских групп представлена на Рисунке 2.



Рисунок 2 – Классификация клиентских групп

Опираясь на вышеизложенное, а также анализ международного опыта проведения различных мероприятий и определение специфичных процессов, можно определить основные параметры и выделить ключевые признаки, по которым возможно классифицировать культурно-массовое мероприятие:

1. Направленность мероприятия влияет на состав клиентских групп, посещающих мероприятие, и, соответственно, меры обеспечения безопасности;
2. Численность мероприятия – количество человек, посетивших мероприятие. Численность напрямую влияет на пассажиропоток и транспортное обеспечение мероприятия, соответственно. Автором принято допущение, что

можно провести градацию на массовое мероприятие, крупномасштабное и мега-событие.

3. Напряженность мероприятия определяет меры безопасности, которые необходимо предпринять при проведении мероприятия. В зависимости от того, к какой группе принадлежит мероприятие, можно определить параметры и состав клиентских групп, что в свою очередь влияет на организацию пешеходных потоков.

4. Продолжительность мероприятия влияет на ресурсы, необходимые для его подготовки и проведения. Автором принято допущение, что можно провести градацию на разовое и серию мероприятий.

Исходя из этих признаков, культурно-массовые мероприятия поделены на 3 группы:

– I группа объединяет в себе мероприятия с небольшой нагрузкой на транспортную систему и наименьшим ажиотажем. Для организации таких мероприятий характерна подготовка как «площадки», так и «района» мероприятия;

– II группа мероприятий включает в себя события, проведение которых сопряжено с повышенной нагрузкой на транспортную систему. Подготовка таких мероприятий включает в себя планирование «площадки» и зон разграничения последней мили;

– III группа мероприятий задействует транспортную инфраструктуру на всех 4-х зонах разграничения. К мероприятиям этой группы относятся самые крупные и напряженные события, такие как Олимпийские игры и Чемпионат мира по футболу.

Во второй главе представлена методика автоматизированного регулирования пассажиропотока при проведении ККММ.

Для повышения эффективности процессов планирования ККММ необходимо решить задачу их автоматизации и разработать АСРП.

Функциональность АСРП должна обеспечивать ввод исходных данных ККММ (параметры инфраструктуры зон разграничений ККММ, систем массового обслуживания, пешеходных потоков зрителей и др.), моделирование функционирования объектов инфраструктуры зон разграничений и движения пешеходных потоков зрителей внутри них, возможность внесения изменений в исходную модель для проведения имитационных экспериментов и наличие инструментов для анализа и оценки полученных результатов экспериментов. На Рисунке 3 представлена структура АСРП.

Планирование ККММ представлено с использованием методологии функционального моделирования *IDEF0*. Разработана функциональная модель процесса планирования, в которой графически описывается логическая организация процессов планирования ККММ, включая сбор исходных данных, проектирование модели и анализ результатов. Модель детализирована до 3-го уровня декомпозиции.

Первый уровень декомпозиции состоит из трех блоков процессов:

1. Формализация параметров ККММ включает в себя формальное

описание логической структуры системы и динамики взаимодействия ее элементов. На этом уровне организаторы определяют ключевые зоны разграничения мероприятия (границы модели), множество моделируемых объектов и уровень детализации моделей отдельных объектов.

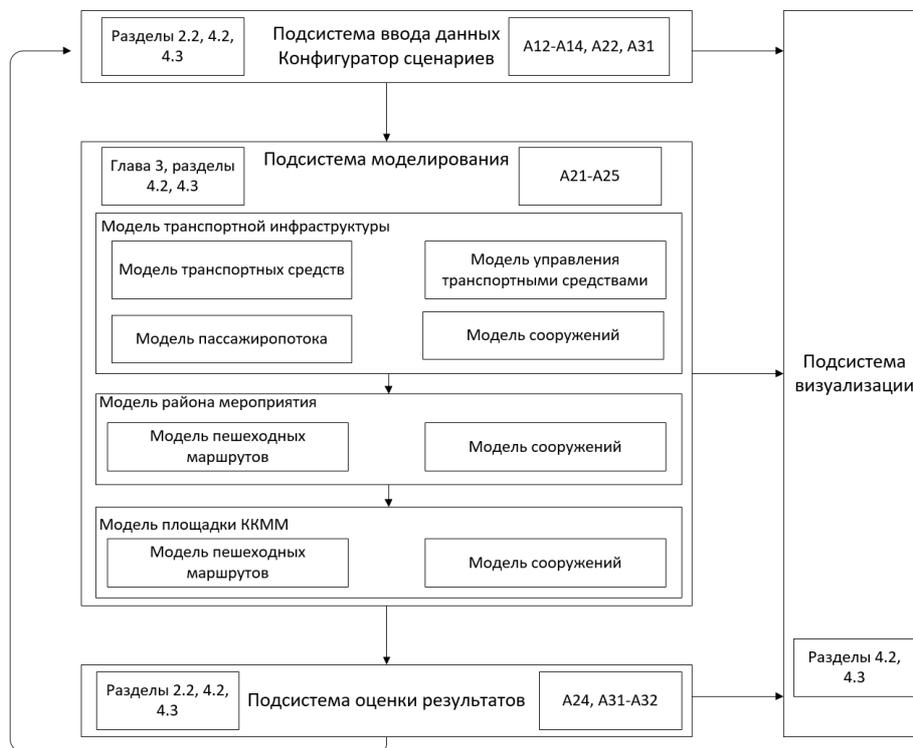


Рисунок 3 – Структура АСРП

2. Разработка модели ККММ включает в себя задачи, связанные с определением состава клиентских групп, подготовкой базовых расписаний движения, моделированием маршрутов передвижения, выбором критериев качества. Использование имитационной модели уменьшит степень неопределенности знаний о процессах поведения пешеходных потоков на основе анализа результатов имитационных экспериментов.

3. Моделирование ККММ и анализ результатов включает в себя проведение экспериментов для определения реакции модели и выявления в ней «узких» мест. На основе анализа результатов экспериментов принимается решение о внесении изменений в разработанную модель. Данный цикл повторяется до момента получения целевых значений выбранных критериев качества. При достижении целевых показателей критериев подготавливается список рекомендаций и регламентов, который используется на операционном уровне для решения оперативных задач по обслуживанию и управлению пешеходными потоками и транспортной инфраструктуры.

Диаграмма декомпозиции 3-го уровня представлена на Рисунке 4.

Опираясь на требования организаторов ККММ и накопленный опыт проведения аналогичных мероприятий, выбираются критерии качества. Они дают оценку функционированию объектов инфраструктуры при «пиковых» нагрузках, эффективности управления пешеходными потоками зрителей, времени эвакуации в различных зонах разграничений, транспортной доступности ККММ и т.д. Рассматриваются следующие критерии:

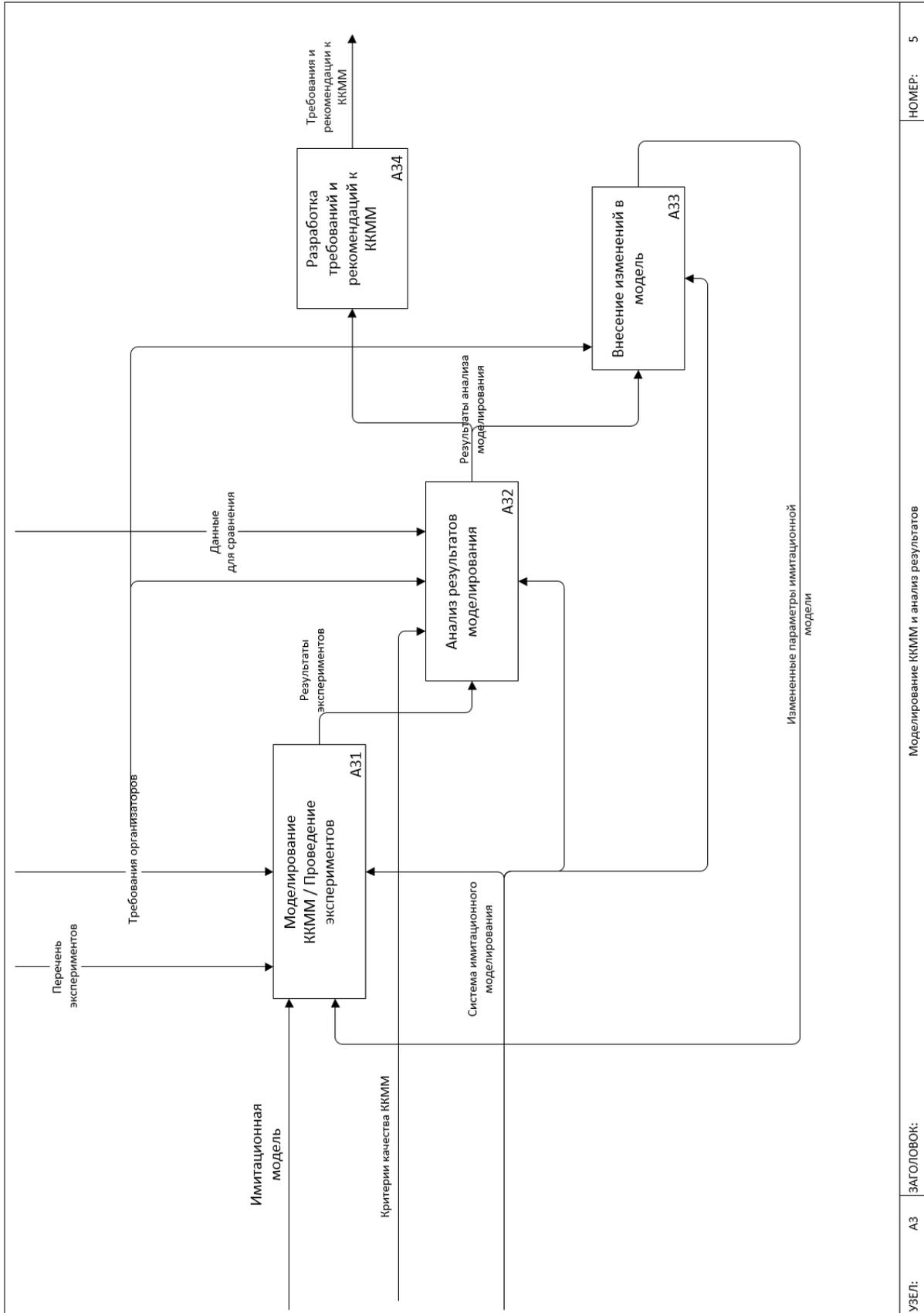


Рисунок 4 – Диаграмма третьего уровня декомпозиции функциональной модели планирования ККММ

Ψ_1 – плотность пешеходного потока на измерительных участках (управление прибытием / выходом людей из системы);

Ψ_2 – время движения в пути до цели назначения представителей клиентских групп пешеходного потока (минимальные / максимальные / среднее / значения);

Ψ_3 – качество обслуживания в системах обслуживания (время обслуживания, время ожидания, количество систем обслуживания на пути следования, наполняемость накопителей);

Ψ_4 – обеспечение безопасности;

Ψ_5 – обеспечение комфорта.

Для достижения целевых значений критериев подготовлены шаблонные требования и рекомендации:

Ω_1 – обеспечение специализированного режима работы инфраструктуры (работа только «на вход» / «на выход»);

Ω_2 – оптимизация расписания движения транспорта, вывод на линию дополнительных единиц транспорта;

Ω_3 – специальный режим работы систем обслуживания;

Ω_4 – обеспечение максимального количества видов доступного общественного транспорта;

Ω_5 – организация навесов для защиты от дождя (жары), зон отдыха / ожидания, площадок досуга;

Ω_6 – спрямление маршрутов движения, минимизация перепада высот;

Ω_7 – конфигурирование геометрических характеристик тротуаров, пешеходных дорожек, временных пешеходных коридоров (разведение пешеходных потоков различных клиентских групп);

Ω_8 – расстановка навигации (указание предпочтительного маршрута в зависимости от точки назначения внутри зоны разграничения);

Ω_9 – наличие персонала в ключевых точках (волонтеры, стюарды) для оповещения о направлении движения пешеходных коридоров, специализированных режимах работы транспортной инфраструктуры;

Ω_{10} – обеспечение свободного выхода из периметра зоны разграничения.

В зависимости от зоны разграничения и момента времени формируются собственные пути получения целевых значений критериев качества. В Таблице 1 представлена совокупность требований и рекомендаций по достижению целевых значений критериев качества.

Таблица 1 – Перечень требований и рекомендаций по достижению целевых значений критериев качества

Критерий качества	Зона разграничения	Период времени	
		Перед началом ККММ	После окончания ККММ
Уменьшение плотности пешеходного потока	Транспортная инфраструктура	$\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3;$	$\Omega_1, \Omega_3, \Omega_4$

	Район ККММ	$\Omega_3, \Omega_5, \Omega_6, \Omega_7$	$\Omega_4, \Omega_6, \Omega_9, \Omega_{10}$
	Площадка ККММ	$\Omega_3, \Omega_5, \Omega_6, \Omega_7$	X
Уменьшение значений времен в пути до цели назначения представителей клиентских групп пешеходного потока	Транспортная инфраструктура	Ω_1, Ω_3	Ω_1
	Район ККММ	$\Omega_6, \Omega_7, \Omega_8$	$\Omega_4, \Omega_5, \Omega_6$
	Площадка ККММ	$\Omega_6, \Omega_7, \Omega_8$	X
Качество обслуживания в системах обслуживания (СО) (время обслуживания, время ожидания, количество СО на пути следования);	Транспортная инфраструктура	Ω_1, Ω_3	Ω_1
	Район ККММ	Ω_9	X
	Площадка ККММ	Ω_9	
Обеспечение комфорта	Транспортная инфраструктура	$\Omega_1, \Omega_8, \Omega_9, \Omega_{10}$	$\Omega_1, \Omega_9, \Omega_{10}$
	Район ККММ	$\Omega_1, \Omega_8, \Omega_9, \Omega_{10}$	$\Omega_1, \Omega_8, \Omega_9; \Omega_{10}$
	Площадка ККММ	$\Omega_1, \Omega_8, \Omega_9, \Omega_{10}$	$\Omega_1, \Omega_9, \Omega_{10}$
Обеспечение безопасности	Транспортная инфраструктура	Ω_1, Ω_8	$\Omega_1, \Omega_4, \Omega_8, \Omega_9$
	Район ККММ	$\Omega_5, \Omega_6, \Omega_8, \Omega_9$	$\Omega_5, \Omega_8, \Omega_9, \Omega_{10}$
	Площадка ККММ	$\Omega_5, \Omega_6, \Omega_8, \Omega_9$	Ω_{10}

Анализ Таблицы 1 показал, что применение наибольшего количества требований и рекомендаций необходимо для выполнения критериев Ψ_1, Ψ_4 и Ψ_5 . Перед началом ККММ в зависимости от зоны разграничения используются все рекомендации кроме Ω_4 . Это связано с тем, что болельщики прибывают на ККММ заранее и, соответственно, отсутствует практика ограничения доступных видов транспорта. Наиболее востребованными являются рекомендации $\Omega_1, \Omega_8, \Omega_9$. После окончания ККММ необходимо применение меньшего количества рекомендаций для выполнения критериев качества планирования ККММ. Выполнение наибольшего количества рекомендаций для критериев Ψ_4 и Ψ_5 обусловлено тем, что по окончании ККММ все болельщики сразу покидают площадку мероприятия, следовательно, управление таким пешеходным потоком требует дополнительных усилий.

В третьей главе разработаны математические модели зон разграничения ККММ. При проведении ККММ можно выделить 4 основных типа движения пешеходных потоков:

- при прибытии на ККММ, внутри транспортного узла;
- при прибытии ККММ, в зоне последней мили;
- после завершения ККММ, в зоне последней мили;

– после завершения ККММ, внутри транспортного узла.

Для каждого из типов движения может быть построена математическая модель, особенности которых систематизированы в Таблице 2, где «-» обозначает нерегулируемые (возмущающие) факторы, «+» регулируемые.

Таблица 2 – Особенности математических моделей

	По прибытии на матч (<i>B</i>)		По завершении матча (<i>A</i>)	
	Внутри транспортного узла (<i>M</i>)	В зоне последней мили (<i>S</i>)	Внутри транспортного узла (<i>M</i>)	В зоне последней мили (<i>S</i>)
Смешанность клиентских групп	есть	есть	есть	регулируемая
Возможность управления прибытием людей в систему	+	-	-	+
Возможность управления выходом людей из системы	-	+	+	+
Наличие систем обслуживания	есть	есть	есть	нет
Критерий выбора управляющих воздействий	Быстродействие обслуживания и движения пешеходного потока, уменьшение длины очередей на входе систем обслуживания		Наполняемость накопителей элементов транспортного узла (станции метрополитена и других рельсовых систем, остановок наземного нерельсового транспорта)	

Рассмотрим способ обозначения потоков клиентских групп и введем буквенные обозначения. В работе использованы следующие обозначение:

$WVZ(t)$ – плотность пешеходного потока клиентских групп, где *W* – первая буква в обозначении, показывающая местоположение пешеходного потока на входе (*I*) или выходе (*O*) из зоны разграничения; *V* – вторая буква в обозначении, показывающая в какой зоне разграничения находится пешеходный поток. Значения (*M*, *S*) определяется в соответствии с Таблицей 2; *Z* – третья буква в обозначении, указывающая на период времени в который рассматривается пешеходный поток. Значения (*B*, *A*) определяются в соответствии с Таблицей 2.

Доля представителей клиентских групп, движущихся внутри или между зонами разграничений, обозначается: α_{xxx}^{xx} , где индексы в верхнем регистре обозначают зоны разграничения, в которой или между которыми движутся представители клиентских групп. Индексы в нижнем регистре обозначают принадлежность объекта инфраструктуры к указанной клиентской группе.

Величина запаздывания потока представителей клиентских групп, движущихся внутри или между зонами разграничения имеет вид: θ_{xx}^{xx} , где

индексы в верхнем регистре обозначают зоны разграничения, в которой или между которыми движутся представители клиентских групп.

Буквенные обозначения введены для единой формы интерпретации моделируемого события. Теперь посмотрим математические модели зон разграничения ККММ. Графическая интерпретация представлена на Рисунке 5.

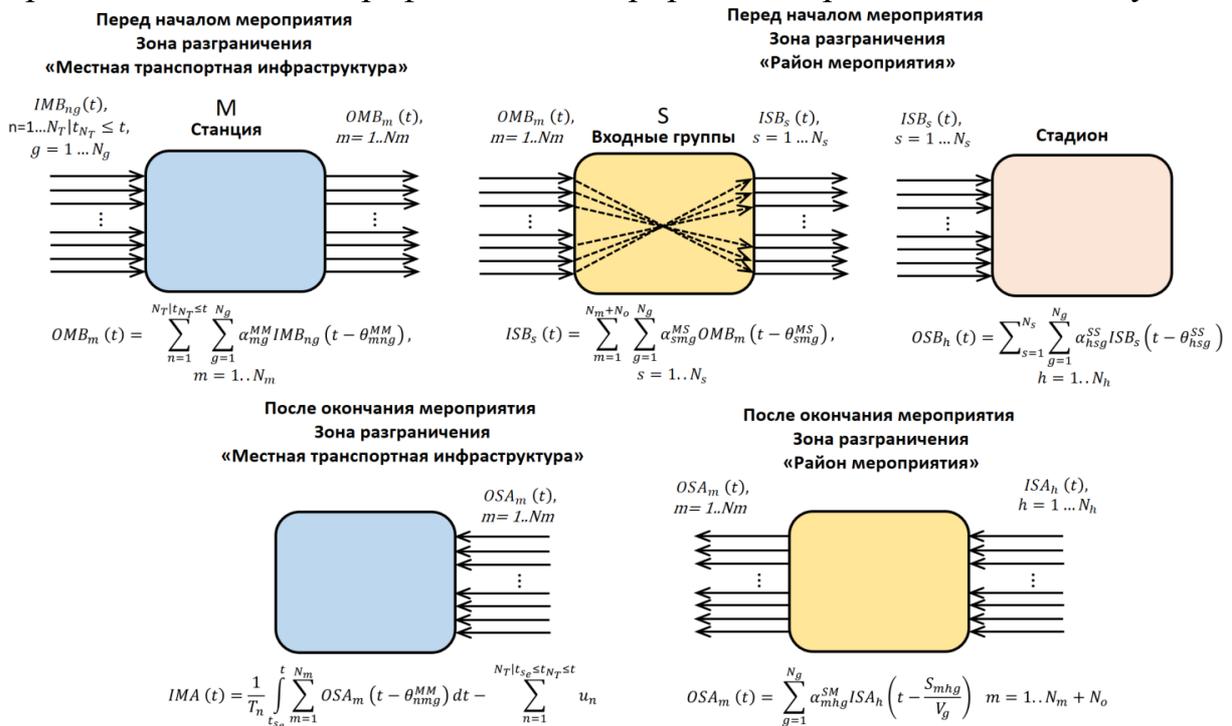


Рисунок 5 – Графическая интерпретация математических моделей зон разграничения ККММ

Рассмотрим математическую модель транспортного узла (местной инфраструктуры) при прибытии на ККММ. Входами системы являются потоки представителей клиентских групп болельщиков, прибывающих на транспортных средствах местной инфраструктуры, выходами являются потоки тех же людей на выходах элементов местной транспортной инфраструктуры.

Плотность потока представителей клиентских групп, проходящих через сечение в пространстве, соответствующее m -му выходу, за единицу времени, $OMB_m(t)$ определяется по формуле:

$$OMB_m(t) = \sum_{n=1}^{N_T | t_{N_T} \leq t} \sum_{g=1}^{N_g} \alpha_{mg}^{MM} IMB_{ng}(t - \theta_{mng}^{MM}), \quad m = 1..N_m \quad (1)$$

где t – время, g – номер клиентской группы; α_{mg}^{MM} – доля представителей g -й клиентской группы, двигающихся к m -му выходу.

Плотность потока представителей клиентской группы g на выходе из n -го поезда определяется по формуле:

$$IMB_{ng}(t) = \begin{cases} \frac{dx_{ng}}{dt} \approx \frac{x_{ng}}{T_n}, & \text{если } t_n \leq t \leq t_n + T_n \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (2)$$

$$\int_{t_n}^{t_n+T_n} IMB_{ng}(t)dt = x_{ng}, \quad (3)$$

где x_{ng} – количество представителей клиентской группы g , вышедших из n -го поезда. Плотность пассажиропотока на входе на станцию и на выходе после прохождения систем обслуживания примерно одинакова. Отличие в величине запаздывания функции IMB_{ng} – времени θ_{mng}^{MM} , которое затрачивается на прохождение всех элементов инфраструктуры и на потерю времени в очередях.

Целью управления в решаемой задаче является успешное прохождение маршрута каждым участником клиентских групп – прибытие на стадион до начала матча, которое требует выполнения следующего неравенства:

$$\sum_{m=1}^{N_m} \int_{t_s}^{t_{fm}} OMB_m(t)dt \geq Y, \quad (4)$$

где Y – число зрителей, которые планировали добраться до места проведения мероприятия на метро;

В качестве примера выбранных критериев для достижения поставленной цели рассмотрим минимум опоздавших зрителей:

$$Crit = \sum_{m=1}^{N_m} \int_{t_s}^{t_{fm}} OMB_m(t)dt - Y \geq 0, \text{ или} \quad (5)$$

$$Crit = \sum_{m=1}^{N_m} \int_{t_s}^{t_{fm}} OMB_m(t)dt \rightarrow \max$$

Частными критериями являются следующие выражения:

– минимум суммы всех интервалов времени, затрачиваемых людьми на ожидание при прохождении всех систем обслуживания T (при учете условий комфортности обслуживания людей):

$$T(x_{ng}, g = 1 \dots N_g, n = 0 \dots N_{T_{fm}} - 1 | t_{NT} \leq t_{fm}) = \quad (6)$$

$$= \sum_{m=1}^{N_m} \sum_{N_T=1}^{N_{T_{f_m}} | t_{N_T} \leq t_{f_m}} \sum_{i=1}^{N_{im}} \sum_{g=1}^{N_g} \tau_{gi} \left(\sum_{n=0}^{N_T-1 | t_{N_T} \leq t} \sum_{g=1}^{N_g} \alpha_{mg}^{MM} x_{ng} \right) \rightarrow \min$$

– минимальная длина очередей в момент времени t_{f_m} (без учета условий комфортности обслуживания людей).

Ограничениями на управление являются:

– максимальная плотность потока людей, которые могут пройти через m -й выход в момент времени t :

$$OMB_m(t) - OMB_{m \max} \leq 0, m = 1..N_m, \quad (7)$$

где $OMB_{m \max}$ – максимальное число людей, которые могут пройти через k -й выход в момент времени t ;

– максимальная плотность потока людей, которые могут пройти через i -ю систему обслуживания в момент времени t , $c_i(t)$:

$$c_i[n] - c_{\max}[n] \leq 0, i = 1..N_i \quad (8)$$

где c_{\max} – максимальное число людей, которые могут пройти через i -ю систему обслуживания в момент времени t .

При невыполнении этих ограничений будут образовываться очереди и увеличиваться интервалы времени, затрачиваемые на прохождение систем обслуживания.

Опираясь на предложенный математический аппарат автором построены математические модели для остальных типов движения пешеходных потоков (Рисунок 5). При разработке математических моделей функционирования зон разграничений сформулированы цели управления, частные критерии по достижению цели, ограничения на управление.

В четвертой главе рассмотрены вопросы компьютерной реализации математических моделей и имитационных экспериментов. При выборе параметров инфраструктуры на этапе планирования транспортного обеспечения при проведении ККММ модели зон разграничения должны проходить экспертизу в АСРП для определения оптимальных решений, а также моделирования нештатных ситуаций и мер реагирования на них. В качестве системы моделирования пассажиропотоков и объектов инфраструктуры был выбран программный комплекс *Anylogic*. Он позволяет строить пешеходные модели, используя в качестве математического аппарата модель социальных сил.

С использованием пешеходной библиотеки программного продукта разработаны имитационные модели ККММ на стадионах «Спартак» и «Лужники» до начала и после окончания. Фрагмент моделирования представлен на Рисунке 6.



a)



b)

Рисунок 6 – Фрагмент имитационного моделирования (подсистема моделирования)

a) модель станции метрополитена «Спартак» до начала ККММ

b) модель района последней мили стадиона «Лужники» по окончании ККММ

После совпадения данных, полученных в имитационной модели, с реальными событиями были проведены эксперименты, имитирующие изменение интервалов в движении поездов, специализированное управление пешеходными потоками, различные поломки объектов инфраструктуры и чрезвычайные ситуации. Проведены эксперименты, включающие зоны разграничения «местная транспортная инфраструктура» и «район мероприятия» перед началом мероприятия на примере стадиона «Спартак» и по окончании мероприятия на примере стадиона «Лужники». Результаты некоторых экспериментов, реакция моделей и примененные мероприятия из методики планирования транспортного обеспечения ККММ приведены в Таблице 3.

Таблица 3 – Результаты моделирования

№ п/п	Моделируемое событие	Реакция модели	Требования / рекомендация методики
Стадион «Спартак» до начала мероприятия			
1	Изменение интервалов в движении поездов	Нормальное функционирование станции при соблюдении плановых графиках. Увеличение плотности пассажиропотоков перед каждым из выходов в интервале с 17:30 до 17:50.	Ω_2 .
2	Профилактика	Уменьшение значений плотности	$\Omega_7, \Omega_8, \Omega_9$.

	избыточных перемещений с одного конца станции на другой	пассажиропотоков и времен нахождения на станции у пассажиров каждой клиентской группы.	
3	Управление пешеходными потоками в зоне последней мили	Минимизация пересечения маршрутов пешеходных потоков клиентских групп g_3 и g_4 .	$\Omega_6, \Omega_7, \Omega_8, \Omega_9$.
Стадион «Лужники» по окончании мероприятия			
4	Реорганизация пешеходных потоков	увеличение средней скорости движения на 1,2 км/ч и сокращение среднего времени в пути до станций «Лужники» и «Спортивная» на 10 и 8 минут соответственно; сокращение усредненного времени в пути до объектов транспортной инфраструктуры на 30%;	$\Omega_7, \Omega_8, \Omega_9$.

График изменения значений времени в пути до станции «Спортивная», полученный по результатам имитационных экспериментов над моделью района последней мили стадиона «Лужники» по окончании ККММ представлен на Рисунке 7.



Рисунок 7 – График изменения значений времени в пути до ст. «Спортивная»

Для анализа полученных данных использованы инструменты описания статистики общей и пешеходной библиотеки. В подсистеме анализа результатов АСРП (Рисунок 8) автором были разработаны блоки, описывающие графики интенсивности пассажиропотоков, структуры пассажиропотока в любой данный момент времени, графики загруженности турникетов, диаграммы распределения и графики плотности пассажиропотоков и др.

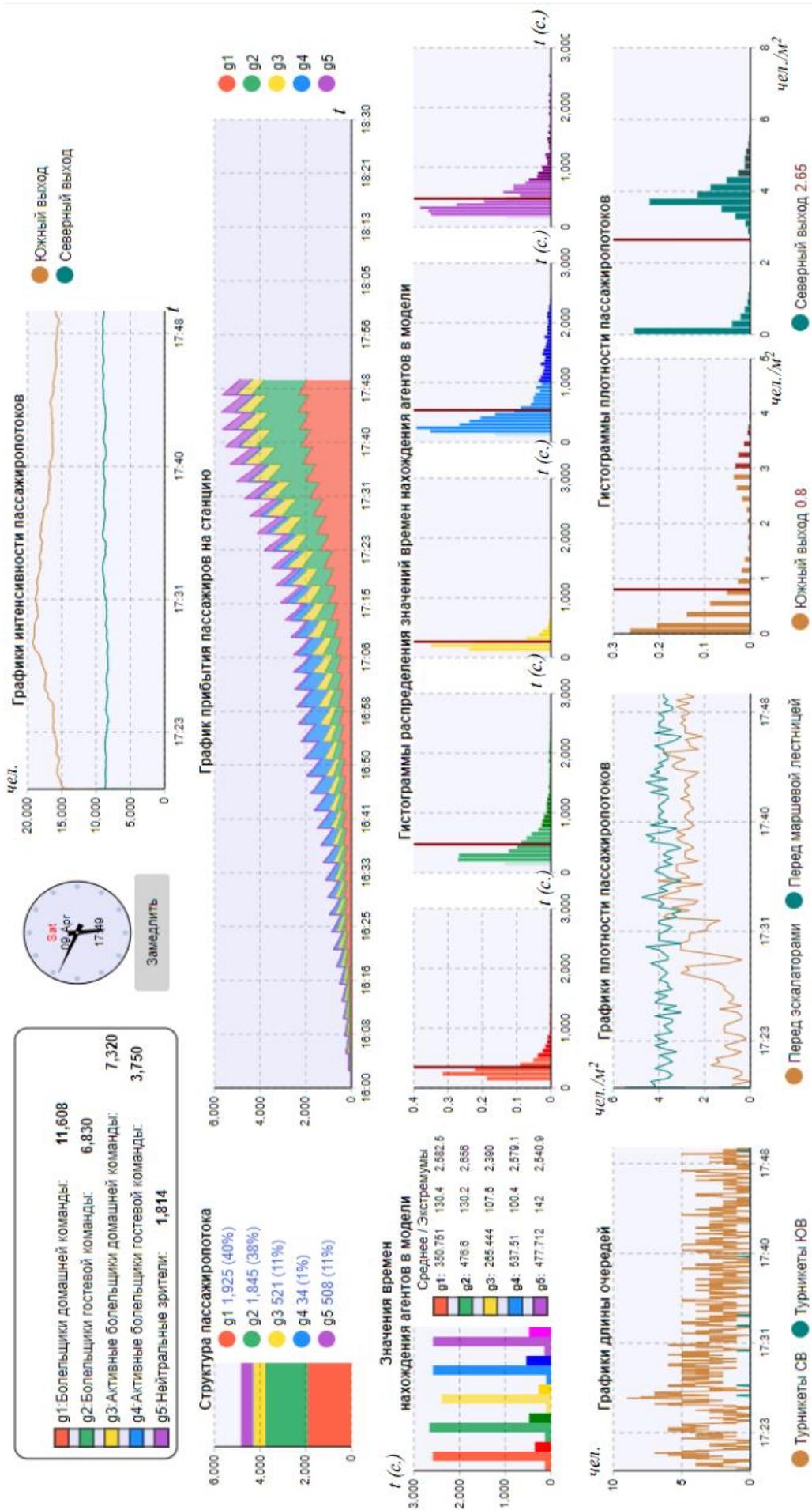


Рисунок 8 – Подсистема оценки результатов АСРП

Данные, полученные при имитационных экспериментах подтвердились при проведении реальных мероприятий, в том числе, во время ЧМ 2018. Подтверждена гипотеза о множестве рекомендаций и требований Ω , позволяющих повысить качество обслуживания участников пешеходного потока и увеличить эффективность использования объектов инфраструктуры.

Показано, что при пиковых нагрузках целевые значения критериев качества транспортного обеспечения отличаются от штатных ситуаций. В зависимости от типа (масштаба) мероприятия, зоны разграничения, состава клиентских групп, рассматриваемого интервала времени предложены методы преодоления сложившейся ситуации. Показана их эффективность путем проведения имитационных экспериментов и совпадения результатов натуральных и имитационных экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании разработана структура и математическое обеспечение АСРП при проведении ККММ. Имитационные модели, входящие в состав АСРП, позволяют оценить функционирование транспортной инфраструктуры в период повышенных нагрузок и управление пешеходными потоками зрителей с использованием соответствующих критериев качества.

1. Выполненное многоуровневое исследование процессов и объектов инфраструктуры, задействованных при планировании и проведении ККММ, а также анализ работ, посвященный отдельным аспектам транспортного обеспечения ККММ, позволили выделить классификационные признаки культурно-массовых мероприятий, общие причины возникновения чрезвычайных ситуаций во время ККММ, различия в моделях поведения участников пешеходного потока зрителей и особенности их взаимодействия друг с другом, зоны разграничения и уровни планирования ККММ. Систематизация полученных данных позволяет сделать вывод о задачах, стоящих перед организаторами при подготовке ККММ, определить обоснованные критерии качества ККММ и перечень объектов управления.

2. Разработанная методика автоматизированного регулирования при проведении ККММ позволила систематизировать и логически выстроить процессы, требующие реализации, в единую последовательность действий. Показано, что использование предложенных методов и рекомендаций по организации режима работы зон разграничений до начала и по окончании ККММ положительно влияет на повышение качества обслуживания участников пешеходного потока зрителей и эффективности функционирования объектов транспортной инфраструктуры.

3. Исследование объекта во всех зонах разграничения позволило построить на базе единой формализации математические модели поведения клиентских групп участников пешеходного потока зрителей, возникающих в моделируемых пространствах различных зон разграничений, являющиеся основой математического обеспечения АСРП.

4. Применение разработанной имитационной модели функционирования зон разграничения при проведении ККММ на реальных объектах

инфраструктуры (стадионы «Спартак» и «Лужники»), учитывающей исторические данные прошедших событий, позволяет отслеживать и контролировать плотность пассажиропотоков в различных зонах моделируемого пространства, выявлять недостатки транспортного обеспечения, оценить требуемый уровень безопасности, комфорта и эффективности функционирования транспортной инфраструктуры мероприятия и применения рекомендаций созданной методики автоматизированного регулирования пассажиропотока при проведении ККММ, провести эксперименты, имитирующие экстренные ситуации.

5. Полученные результаты имитационного моделирования и экспериментов получили подтверждение при проведении футбольных матчей 11.11.2017 г. и 17.03.2018 г. на стадионе «Лужники». Реализация действий и рекомендаций, предложенных в методике автоматизированного регулирования пассажиропотока при проведении ККММ, позволила, в частности, увеличить среднюю скорость пешеходного потока на 2,2 км/ч, что привело к целевым значения критерия качества «Время движения в пути до цели назначения представителей клиентских групп пешеходного потока»/

6. Сходимость результатов имитационных и натурных экспериментов обеспечивает успешное функционирование объектов инфраструктуры во всех зонах разграничения при проведении ККММ. Открытая архитектура АСРП позволяет исследовать различные типы сбойных и чрезвычайных ситуаций, менять параметры зон разграничения и клиентских групп, варьировать состав транспортного обеспечения. Это позволяет утверждать, что разработанная методика может быть применена для других типов культурно-массовых мероприятий в будущих исследованиях.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

1. Исаков, Т. А. Модель поведения различных клиентских групп в системе управления транспортного узла / Т. А. Исаков // Наука и техника транспорта. – 2016. – № 3. – С. 79–89.

2. Исаков, Т. А. Организация транспортного обеспечения стадиона «Лужники» на примере футбольного матча 11.11.2017 / Т. А. Исаков // Автоматика на транспорте. – 2018. – № 2. – Том 4. – С. 279–296.

Публикации в иных научных изданиях

3. Исаков, Т. А. Математическая модель взаимодействия клиентских групп пешеходов внутри транспортного узла / Т. А. Исаков, В. Г. Сидоренко // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – №6. – С. 32–35.

4. Исаков, Т. А. Транспортное обеспечение крупномасштабных культурно-массовых и спортивных мероприятий / Т. А. Исаков // Труды студенческой научно-практической конференции «Электронный бизнес.

Управление интернет-проектами. Инновации» – М.: НИУ ВШЭ. – 2015. – Секция III. – С. 100–103.

5. Исаков, Т. А. Оценка пропускной способности транспортной инфраструктуры спортивных объектов / Т. А. Исаков // Труды научно-практической конференции «Неделя науки–2016». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2016. – Секция III. – С. 36.

6. Исаков, Т. А. Использование информационных систем при организации культурно-массовых мероприятий / Т. А. Исаков // Труды международной научно-технической и научно-методической конференции «Современные технологии в науке и образовании СНТО–2016». – Рязань. – 2016. – Том 2. – С. 99–103.

7. Исаков, Т. А. Безопасность транспортного обеспечения при проведении культурно-массовых мероприятий / Т. А. Исаков // Труды научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2016. – Секция III. – С. 14.

8. Исаков, Т. А. Имитационное моделирование функционирования транспортного узла при проведении культурно-массового мероприятия / Т. А. Исаков // Труды конференции «ИСУЖТ – Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование». – М. – 2016. – С. 221–225.

9. Исаков, Т. А. Моделирование пешеходных потоков на станции метрополитена во время проведения культурно-массового мероприятия / Т. А. Исаков // Труды международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» – XXIV. – М. ИПУ РАН – 2016. – С. 356–360.

10. Исаков, Т. А. Математическая модель пассажиропотоков внутри транспортного узла при пиковых нагрузках / Т. А. Исаков // Труды научно-практической конференции «Неделя науки–2017». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2017. – Часть I. – С. 36.

11. Исаков, Т. А. Функционирование транспортной инфраструктуры по окончании культурно-массового мероприятия / Т. А. Исаков // Труды научно-практической конференции «Неделя науки-2018». – М.: МГУПС (МИИТ). – 2018. – Секция III. – С. 37–38.

АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ КУЛЬТУРНО-МАССОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (транспорт)

Подписано к печати _____ Объем 1,5 п.л. Формат 60x84/16

Тираж 80 экз. Заказ № _____

УПЦ ГИ МИИТ, Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.