

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи

ИСКАКОВ ТИМУР АНВЯРОВИЧ

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

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

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Сидоренко Валентина Геннадьевна

Москва – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕОРИИ И ОПЫТА ПРОВЕДЕНИЯ КУЛЬТУРНО-МАССОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ	12
1.1 Анализ исследований в области регулирования пассажиропотока, функционирования инфраструктуры и организации культурно-массовых мероприятий.....	12
1.2 Анализ чрезвычайных ситуаций при проведении культурно-массовых мероприятий.....	17
1.3 Клиентские группы и зоны разграничения крупномасштабных культурно-массовых мероприятий	20
1.4 Классификация культурно-массовых мероприятий	27
1.5 Постановка задачи научного исследования.....	34
Основные выводы и результаты по Главе 1	36
2. МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ КУЛЬТУРНО-МАССОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ	37
2.1 Структура автоматизированной системы регулирования пассажиропотока	37
2.2 Функциональная модель планирования крупномасштабных культурно-массовых мероприятий	39
2.3 Выбор критериев качества планирования крупномасштабного культурно-массового мероприятия.....	52
Основные выводы и результаты по Главе 2	56
3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН РАЗГРАНИЧЕНИЙ КРУПНОМАСШТАБНЫХ КУЛЬТУРНО-МАССОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ 57	
3.1 Принципы построения математических моделей зон разграничений крупномасштабных культурно-массовых мероприятий.....	57

3.2	Математическая модель транспортного узла при прибытии на крупномасштабное культурно-массовое мероприятие	61
3.3	Математическая модель района мероприятия при прибытии на крупномасштабное культурно-массовое мероприятие	69
3.4	Математическая модель района после завершения крупномасштабного культурно-массового мероприятия.....	74
3.5	Математическая модель транспортного узла после завершения крупномасштабного культурно-массового мероприятия.....	75
	Основные выводы и результаты по Главе 3	78
4	МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАССАЖИРОПОТОКОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ КУЛЬТУРНО-МАССОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ	79
4.1	Анализ моделей пешеходных потоков и средств имитационного моделирования.....	79
4.2.	Построение имитационной модели зон разграничения при прибытии на крупномасштабное культурно-массовое мероприятие и проведение экспериментов.....	92
4.3.	Построение имитационной модели зон разграничения по окончании крупномасштабного культурно-массового мероприятия и проведение экспериментов.....	108
	Основные выводы и результаты по Главе 4	126
	Заключение.....	127
	Список литературы.....	129
	Приложение А	148
	Приложение В	154
	Приложение С	156
	Приложение D	160

ВВЕДЕНИЕ

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. Доеина, 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, АСУЦ, АСТПП 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 натурных 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 натурных 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.

В первой главе систематизированы работы российских и зарубежных авторов, посвященные различным аспектам автоматизации регулирования пассажиропотока при проведении ККММ. Показано, что в рассматриваемых работах в достаточной мере не учитываются вопросы и специфика планирования транспортного обеспечения ККММ. Выявлены причины возникновения чрезвычайных ситуаций при проведении ККММ. Описаны клиентские группы посетителей ККММ и их характерные отличия. Выявлены зоны разграничений территории, на которой проводится ККММ. Предложены классификационный блок культурно-массовых мероприятий и его графическая интерпретация, выделены клиентские группы посетителей, зоны разграничения ККММ.

Во второй главе представлена структура АСРП. Описаны подсистемы АСРП, сформулированы требования к ее функциональности. С использованием методологии *IDEF0* разработана функциональная модель процесса планирования ККММ. Для оценки качества планирования ККММ, в частности функционирования объектов инфраструктуры, эффективности планировочных решений, организации навигации и т.д. выбраны критерии качества.

Сформулированы типовые рекомендации, направленные на достижение целевых значений критериев качества.

В третьей главе разработаны математические модели зон разграничения ККММ. При разработке математических моделей сформулированы цели управления, частные критерии качества для каждой из зон разграничений при различных фазах ККММ, ограничения на управление. Проведенное исследование объекта во всех зонах разграничения ККММ позволило представить формализованное описание клиентских групп пешеходного потока, существующих в моделируемом пространстве.

В четвертой главе проведен анализ средств имитационного моделирования и моделей пешеходных потоков. Разработаны имитационные модели проведения ККММ на реальных объектах инфраструктуры. Данные модели учитывают неоднородность пешеходного потока и позволяют решать задачи безопасного планирования функционирования местной транспортной инфраструктуры и пешеходного потока в зоне последней мили по окончании ККММ. Над моделями проведены имитационные эксперименты, по результатам которых сформулированы рекомендации по организации режима работы объектов транспортной инфраструктуры. Результаты моделирования полностью подтвердились на натурном эксперименте, включая матчи Чемпионата Мира по футболу 2018 года (ЧМ 2018).

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕОРИИ И ОПЫТА ПРОВЕДЕНИЯ КУЛЬТУРНО-МАССОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

1.1 Анализ исследований в области регулирования пассажиропотока, функционирования инфраструктуры и организации культурно-массовых мероприятий

Существует несколько определений термина «культурно-массовое мероприятие» или «массовое мероприятие». К примеру, Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) дает следующее определение: мероприятие с участием достаточного количества людей на ограниченном горизонте планирования, вызывающее дефицит ресурсов и требующее реагирования на уровне местной администрации, штата или государств [1] [2]. Росстат и Министерство культуры Российской Федерации под культурно-массовыми мероприятиями подразумевают культурно-досуговые мероприятия (вечера отдыха, чествования, кино- и тематические вечера, выпускные, танцевальные/дискотеки, балы, праздники, игровые программы и др.), а также информационно-просветительские мероприятия (литературно-музыкальные, видеогостиные, встречи с деятелями культуры, науки, литературы, форумы, конференции, симпозиумы, съезды, круглые столы, семинары, мастер-классы, экспедиции, лекционные мероприятия, презентации) [3].

Исследованиям отдельных аспектов планирования транспортного обеспечения и организации культурно-массовых мероприятий посвящены многие научные труды Российских и зарубежных авторов. В этих работах рассматривались вопросы:

- управления пешеходными потоками;
- автоматизации транспортного обеспечения;
- построения математических и имитационных моделей пассажиропотоков;

- обеспечения административно-правовой охраны, общественного порядка и безопасности при проведении культурно-массовых мероприятий;
- предотвращения чрезвычайных ситуаций.

Публикации по этим вопросам можно разделить на 3 группы.

К первой группе относятся работы, посвященные изучению и созданию имитационных моделей пассажиропотоков, в т.ч. на различных видах транспорта и включает работы В. К. Абросимова [4], А. С. Аكوпова [5] [6], А. О. Аристова [7] [8] [9], А. Л. Бекларяна [6] [10] [11], С. П. Вакуленко [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21], В. В. Доенина [14] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31], Н. Ю. Еврееновой [12] [13] [14] [32] [33], А. С. Карсакова [34], А. Ф. Ланового [35], О. Н. Мадяр [36] [37] [38], Н. Н. Майорова [39], Р. В. Мельникова [40], А. Г. Пашкевича [41], М. Р. Якимова [42], Хэлбинга Д. [43] [44] [45] [46] [47], Махмуда И. [48] и др.

Отдельно стоит отметить работы В. К. Абросимова, С. П. Вакуленко, В. В. Доенина, Н. Ю. Еврееновой, Махмуда И. В частности, в них рассматриваются:

- основные положения моделирования организации массовых мероприятий с использованием многоагентной технологии на примере XXII зимних Олимпийских игр 2014 года [4];
- моделирование пассажиропотоков на транспортно-пересадочном узле (ТПУ), учитывающее различные модели поведения пешеходов и логические зависимости их перемещения внутри объекта транспортной инфраструктуры [12] [14] [33];
- транспортные модели, построенные на логико-разностных подходах [22] [25];
- планирование на основе имитационной модели экстренной эвакуации при проведении одного из самых масштабных массовых мероприятий в мире — Хадже [48].

В данных работах выделены особенности пассажиропотоков, культурно-массовых мероприятий, а также показана практическая значимость моделирования.

Вторая группа работ исследует задачи планирования и управления перевозочным процессом метрополитенов и магистральных железных дорог, нагрузкой которых являются переменные во времени пассажиропотоки и включает работы Е. П. Балакиной [49] [50] [51] Л. А. Баранова [49] [52] [53] [54] [55] [56] [57] [58] [59] [60], П. Ю. Воробьева [55] [61] [62], В. С. Ерофеева [49] [53] [54], А. М. Замышляева [63] [64] [65], В. П. Козлова [66] [67], Л. Н. Логиновой [52] [60] [68] [56], Ю. О. Пазойского [18] [19] [20] [21] [69], А. И. Сафронова [70], В. Г. Сидоренко [49] [70] [71] [72] [56] [73] [59], И. Б. Шубинского [65] [74] и др.

Эти работы в первую очередь рассматривают:

- принципы построения, основные достоинства и свойства многофункциональных моделей систем управления [49];
- алгоритмы оперативного управления линией метрополитена [50] [53] [54];
- вопросы автоматизированного построения планового графика движения пассажирских поездов и графика оборота электроподвижного состава метрополитена и организации отдельных его этапов [70].

Третья группа работ рассматривает административно-правовые и организационные аспекты деятельности различных служб по обеспечению культурно-массовых мероприятий и включает в себя работы Е. И. Бочковой [75], Д. А. Коротченкова [76] [77], В. В. Меньших [78], А. А. Морозова [79], Д. Н. Никитина [80], Н. В. Пешковой [81], В. П. Свечкарева [82], других авторов, а также нормативные документы, установленные в Российской Федерации [83] [84] [85].

В этих работах главным образом исследуется:

- организация административно-правовой охраны общественного порядка и обеспечения общественной безопасности при проведении массовых мероприятий [78] [81] [77] [86];
- обобщение современного российского и международного опыта

проведения культурно-массовых мероприятий [80] [82] [87] [88].

Вместе с тем, в указанных публикациях в достаточной мере не рассматриваются вопросы специфики автоматизированного регулирования пассажиропотока при проведении ККММ и функционирования инфраструктуры, в то время, как проведение таких мероприятий накладывает определенные ограничения на транспортное обеспечение: необходимо учесть вопросы безопасности, увеличившийся пассажиропоток, обеспечить эффективное управление пешеходными потоками. Учитывая регулярное проведение таких мероприятий в нашей стране, а также выполненный анализ исследований, необходимо отдельно проработать эти вопросы, систематизировать полученные знания и создать соответствующую методику.

Таким образом, вопрос автоматизации регулирования пассажиропотока при проведении ККММ находится в области зон наложения специализации и специфики функционирования отдельных групп исследований, представляемых как:

- проведение ККММ и влияние этого мероприятия на транспортную инфраструктуру;
- управление пешеходными потоками и элементами транспортной инфраструктуры, с которой взаимодействуют пешеходные потоки;
- транспортное обеспечение в пиковые часы нагрузки.

Графическая интерпретация области диссертационного исследования, учитывающая управление бизнес-процессами и технологическими процессами при проведении ККММ, представлена на Рисунке 1.1.

Объединение этих трех областей определяет особенности данного диссертационного исследования



Рисунок 1.1 - Графическая интерпретация области исследования

1.2 Анализ чрезвычайных ситуаций при проведении культурно-массовых мероприятий

Спортивные мероприятия, концертные выступления и некоторые религиозные события одновременно собирают в одном месте тысячи людей. Если не управлять потоками людей и не предусмотреть меры реагирования при возникновении чрезвычайных ситуаций, в этих потоках могут возникнуть массовые давки, которые приводят к трагическим последствиям [89].

Серия трагических мероприятий происходила во время Хаджа – традиционного паломничества мусульман к святому городу Мекка, в котором принимают участие сотни тысяч человек, что видно из Рисунка 1.2. В 1990 году в пешеходном тоннеле, ведущем из г. Мекка в г. Мина, образовалась сильная давка [90] – погибло свыше 1400 человек. Пешеходный туннель вместимостью до 1000 человек и протяженностью около 500 метров открыт в 1979 году в рамках программы властей Саудовской Аравии по организации пешеходных потоков паломников. В тот день, при жаркой погоде, тысячи паломников двинулись в туннель со стороны г. Мекки. По середине туннеля поток внезапно остановился. Количество людей в этот момент возросло до 5000. Затем произошла остановка вентиляционных систем, что привело к недостатку кислорода.

В 2004 году давка в районе пешеходного моста Джамра привела к 244 жертвам, однако организаторы не предприняли соответствующих мер, чтобы предотвратить повторение чрезвычайного происшествия и в 2006 году трагедия повторилась вновь. Погибло 350 человек [91].

Крупнейшая катастрофа произошла в 2015 году [92]. Давка образовалась на перекрестке двух улиц, когда паломники направлялись к мосту Джамра. По официальной версии, давка произошла из-за того, что две большие группы паломников пересеклись на одной и той же улице, двигаясь в разных направлениях. В результате трагедии погибло свыше 2100 человек [93] [94].



Рисунок 1.2 – Паломничество в Мекку

Стоит отметить, что единичные случаи смерти во время давки происходят во время Хаджа каждый год.

В апреле 2006 года в спортивном комплексе «*Ultra Arena*» в городе Манила, Филиппины, погибли десятки людей, желавших поучаствовать в юбилейном выпуске популярной телевизионной передачи. Когда в указанное организаторами время вход на арену открылся, более 30 тысяч человек ринулись внутрь [95]. Из-за отсутствия планов эвакуации, узких проходов и неслаженных действий администрации образовалась массовая давка, в которой погибло 73 человека. Ответственность за трагедию была возложена на организаторов телевизионной

Давка на мосту, ведущем через реку Тигр, произошедшая в Багдаде в 2005 году унесла жизни 978 людей [96]. Десятки тысяч верующих направлялись по мосту к мечети Кадимиа, находящейся на севере города, в какой-то момент кто-то сказал, что в толпе есть террорист-смертник. Слух быстро распространился и привёл к панике и давке в последующем.

15 апреля 1989 года на стадионе «*Hillsborough*» произошла трагедия, которая унесла жизни 96 болельщиков футбольной команды «Ливерпуль» [97]. За воротами стадиона скопилась огромная толпа, местные полицейские приняли решение открыть их, чтобы освободить пространство. В этот момент сотни людей ринулись к уже заполненной трибуне, спереди и по бокам которой были защитные ограждения. По окончании расследования происшествия был создан документ [98], описывающий факторы, способствующие трагическим последствиям.

20 октября 1982 года произошла массовая давка с человеческими жертвами в конце футбольного матча на стадионе «Лужники» [99]. По одной из версий, по окончании матча для выхода с трибуны были открыты лишь одна лестница и ворота, а ступеньки не были очищены от снега. В результате трагедии по официальной версии погибло 66 человек.

30 мая 1999 года в Минске проходил фестиваль пива и приуроченный к нему концерт. Внезапно началась гроза, сопровождаемая крупным градом. Около двух с половиной тысяч молодых людей попытались укрыться от непогоды в подземном переходе. В результате давки погибло 53 человека [100].

В Таблице 1.1 представлена информация о причинах происшествий на культурно-массовых мероприятиях.

Таблица 1.1 – Происшествия на культурно-массовых мероприятиях.

Чрезвычайное происшествие	Причины
Массовые давки во время Хаджа	<ul style="list-style-type: none"> – отсутствие управления пешеходными потоками; – неслаженные действия сотрудников служб безопасности; – отсутствие мер реагирования; – превышение критических значений вместимости сооружения.
Давка в спортивном комплексе «Ultra Arena»	<ul style="list-style-type: none"> – отсутствие планов эвакуации; – неслаженные действия организаторов; – превышение критических значений вместимости сооружения.
Давка на мосту, ведущем через реку Тигр	<ul style="list-style-type: none"> – провокация; – отсутствие служб безопасности во время шествия.
Давка на стадионе «Hillsborough»	<ul style="list-style-type: none"> – действия правоохранительных органов и организаторов.
Давка на стадионе «Лужники»	<ul style="list-style-type: none"> – действия правоохранительных органов и организаторов.
Давка в Минске	<ul style="list-style-type: none"> – неслаженные действия организаторов; – превышение критических значений вместимости сооружения.

Рассмотрев данные происшествия, можно заметить, что к ним привели одни и те же причины, а именно:

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

Полученные результаты задействуются в качестве данных для сравнения в блоке А3 «Моделирование и анализ результатов» функциональной модели АСРП планирования ККММ, разработанной в Главе 2 (Рисунок 2.3).

Эти факторы следует учитывать при подготовке транспортного обеспечения и управлении пешеходными потоками во время проведения культурно-массовых и спортивных мероприятий. Необходимо отметить, что чаще всего трагедии происходили во время спортивных или религиозных мероприятий, когда напряженность мероприятия крайне высока, а эмоциональность участников повышена из-за ограниченности во времени перед началом мероприятия. В этой связи возникало пересечение пассажиропотоков, которое приводило к возникновению нештатных ситуаций [101]. Учет этих фактов лег в основу создания функциональной, математических и имитационных моделей, реализованных в Главах 2-4.

1.3 Клиентские группы и зоны разграничения крупномасштабных культурно-массовых мероприятий

Примером ККММ, требующего детальной проработки всех аспектов транспортного обеспечения и выработки специальных алгоритмов управления, является Чемпионат Мира по футболу *FIFA* (ЧМ). В 2018 году в России прошел ЧМ – самое значимое ККММ года в мире. Обеспечение безопасности и комфортного времяпрепровождения участников соревнования стало ключевой задачей для всех задействованных служб. Основная потребность, которую должно

удовлетворять транспортное обеспечение – это безопасное управление большими пешеходными потоками и транспортными объектами в период повышенных нагрузок.

На каждую игру ожидалось прибытие большого количества зрителей, планировавших посещение стадиона (вместимость от 40 000 до 80 000 человек), а также болельщиков, не имевших билетов на матч, но прибывших в город для участия в событии на площадке фестиваля болельщиков (фан-зона). Количество болельщиков в фан-зоне в дни матчей составляло до 20 000 человек, еще около 15 000 человек наблюдали за матчами на альтернативных площадках, т.е. общее количество участников мероприятий в день матча в городе доходило до 120 000 человек. Такое количество болельщиков несомненно влечет за собой риски, связанные с несоответствующим транспортным обеспечением, а также отсутствием мер реагирования при возникновении чрезвычайных ситуаций. Для минимизации этих рисков *FIFA* разработаны специальные требования и рекомендации в области транспортного обеспечения участников и гостей мероприятия. На их основе реализована логика блоков А1 «Формализация параметров ККММ», А2 «Разработка модели ККММ», А3 «Моделирование ККММ и анализ результатов» функциональной модели планирования ККММ, разработанной в Главе 2 (Рисунок 2.3).

Эти требования учтены при подготовке Заявочной книги РФ [102], а также в соглашениях, заключенных между *FIFA* и Оргкомитетом «Россия-2018», городами, принимающими матчи ЧМ 2018, и в концепции транспортного обеспечения ЧМ 2018 [103].

ЧМ посещают различные группы болельщиков, организаторов и официальных лиц. Модели поведения этих групп существенно отличаются друг от друга, поэтому их разделяют на клиентские группы [101]. Участников мероприятия можно разделить на следующие группы:

– клиентские группы *FIFA* – члены футбольных ассоциаций, официальные лица матчей (судьи и официальные представители), почетные гости *FIFA* и

организационного комитета, представители средств массовой информации, коммерческие партнеры, рабочий персонал *FIFA* и организационного комитета;

– клиентские группы болельщиков – посетители мероприятия из домашнего и гостевых регионов.

Клиентские группы болельщиков, в свою очередь, можно разделить на следующие подгруппы [101]:

– болельщики в фан-зоне – посетители фан-зоны, включающие жителей города-организатора, жителей близлежащих регионов РФ (в радиусе 100-200 км), а также заранее прибывших и разместившихся иностранных болельщиков (такие иностранные болельщики на части матчей могут быть зрителями, а на части – болельщиками в фан-зонах);

– болельщики на стадионе (зрители) – владельцы билетов, прибывающие на матч индивидуально или в составе небольших групп по 3 – 4 человека из своих стран, города базирования или другого города-организатора, перемещаются по городу на городском пассажирском транспорте.

Болельщика следует рассматривать как агента, стремящегося попасть на трибуну стадиона / сектор фан-зоны, ориентирующегося в пространстве и взаимодействующего с другими агентами [4]. Выделены три класса и шесть групп агентов, они представлены на Рисунке 1.3 [101]:

– обычные болельщики – они разделяются на домашних и гостевых (в зависимости от команд). Их модель поведения схожа с поведением обычных пассажиров метрополитена. Эти болельщики могут передвигаться в одном потоке без возникновения экстренных ситуаций;

– активные болельщики – они также разделяются на домашних и гостевых. Болельщики данного класса, достаточно агрессивны, их скорость движения выше. Чаще всего они перемещаются группой, а при пересечении маршрутов движения гостевых и домашних болельщиков возможны конфликтные ситуации;

– лояльные посетители – этот класс подразделяют на нейтральных болельщиков и официальных лиц. Лояльные посетители во многом схожи с болельщиками первого класса, однако их скорость движения ниже, так как они

редко посещают мероприятия данного типа и у них могут возникнуть проблемы с навигацией, в отличие от обычных болельщиков. Классификация клиентских групп задействуется в блоке А12 «Определение состава и характеристик клиентских групп ККММ» функциональной модели процесса планирования ККММ, представленной в Разделе 2.2 (Рисунок 2.4).

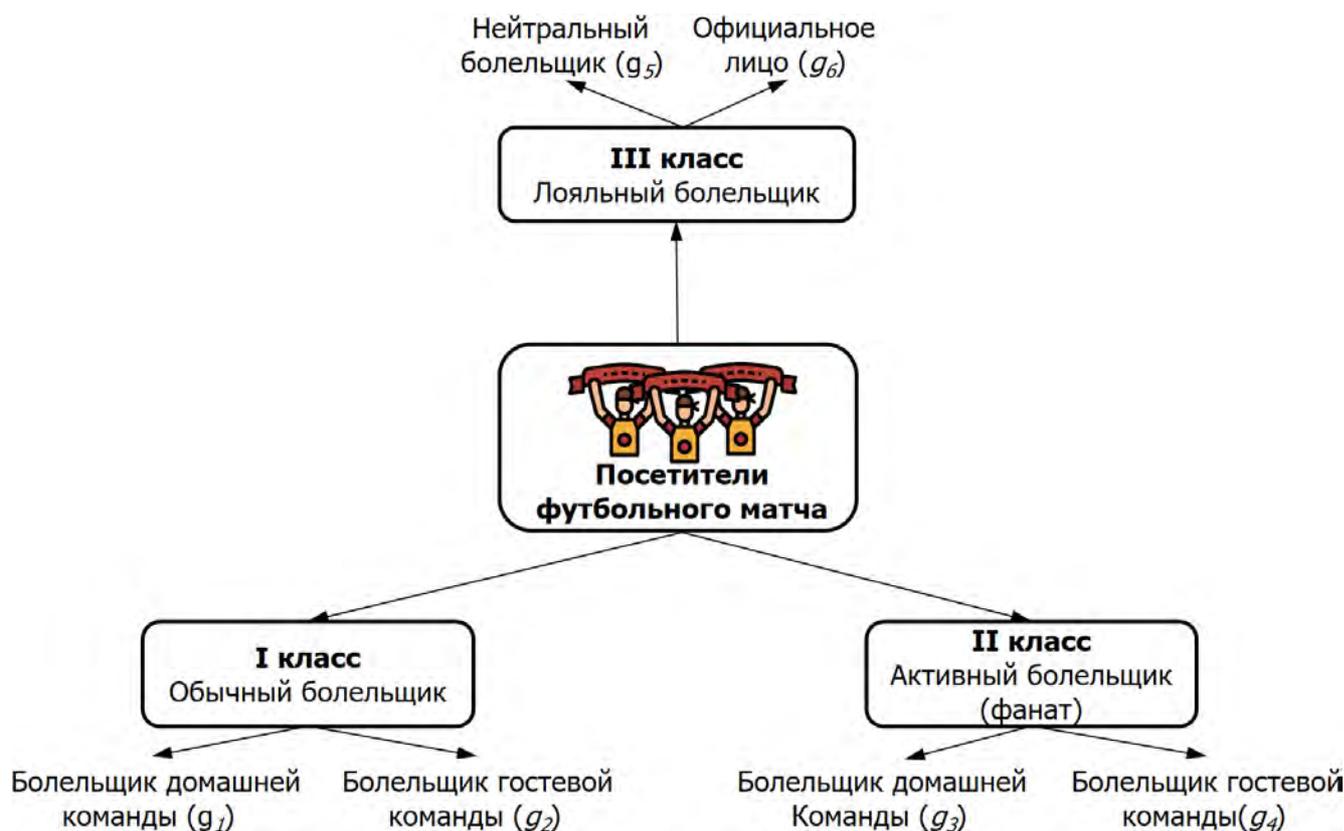


Рисунок 1.3 – Графическая интерпретация клиентских групп болельщиков.

Рассмотрим особенности взаимодействия агентов между собой. Они представлены в Таблице 1.2. 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) агентов из этих клиентских групп минимальным. 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. Поэтому 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, а не поодиночке. В зависимости от класса посетитель мероприятия имеет билет на определенную трибуну или сектор фан-зоны, что влияет на маршрут его передвижения в зоне последней мили [101].

Таблица 1.2 – Клиентские группы ЧМ

Клиентская группа	Особенности
Клиентские группы <i>FIFA</i>	
Члены футбольных ассоциаций	– проезд на территорию стадиона; – обеспечение максимального соглашения об оказании уровня услуг.
Официальные лица матчей (судьи и официальные представители)	– предоставление соответствующих мест размещения в городе пребывания; – обеспечение максимального соглашения об оказании уровня услуг.
Почетные гости <i>FIFA</i> и организационного комитета	– проезд на территорию стадиона; – обеспечение максимального соглашения об оказании уровня услуг.
Представители средств массовой информации	– организация беспрепятственного доступа в пресс-центр.
Коммерческие партнеры	– обеспечение соответствующего соглашения об оказании уровня услуг.
Рабочий персонал <i>FIFA</i> и организационного комитета	– проезд на территорию стадиона; – доступ к объектам инфраструктуры в зависимости от необходимости.
Клиентские группы болельщиков	
Обычные болельщики гостевой команды	– модель поведения схожа с моделью пассажира метрополитена; – выбор соответствующей трибуны на стадионе.
Обычные болельщики домашней команды	
Активные болельщики гостевой команды	– скорость движения больше, чем у обычных болельщиков; – склонны перемещаться в группе; – выбор соответствующей трибуны на стадионе; – прибывают к началу мероприятия раньше обычных болельщиков; – необходимо разделять потоки домашних и гостевых
Активные болельщики домашней команды	

	активных болельщиков.
Лояльные болельщики	– скорость движения ниже, так как они редко посещают мероприятия данного типа; – могут возникнуть проблемы с навигацией.

Графическая интерпретация классификации клиентских групп на ЧМ представлена на Рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Классификация клиентских групп

При подготовке культурно-массового мероприятия, в особенности ЧМ, основные организационные процессы реализуются на трех уровнях. На каждом уровне планирования организаторам необходимо оценить функционирование четырех зон разграничения, представленных на Рисунке 1.5, внутри которых возникают и решаются вопросы обслуживания и взаимодействия с посетителями. [101].

На стратегическом уровне создается макромодель, которая позволяет оценить возможности региона по проведению рассматриваемого мероприятия. На этом уровне организаторы определяют ключевые зоны разграничения мероприятия

(границы модели), множество моделируемых объектов и уровень детализации моделей отдельных объектов.

Тактический уровень ставит перед организаторами задачи, связанные с согласованием клиентских групп, подготовкой базовых расписаний движения, моделированием маршрутов передвижения. Разрабатывается микромодель, над которой проводятся различные эксперименты для определения реакции модели и выявления «бутылочных горлышек» [101].

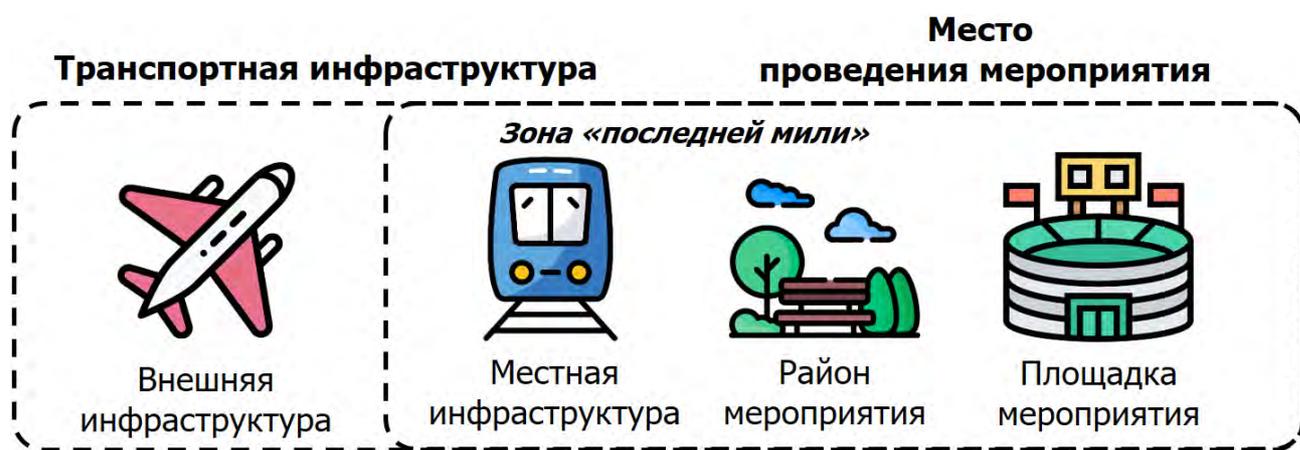


Рисунок 1.5 – Зоны разграничения культурно-массового мероприятия.

По результатам моделирования подготавливается список рекомендаций и регламентов, который используется на операционном уровне для решения оперативных задач по обслуживанию и управлению пешеходными потоками.

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 в радиусе около 1500 метров от «площадки» [101].

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 [101].

Граница между транспортной инфраструктурой и местом проведения мероприятия проходит по месту выхода из транспортных объектов в зоне «последней мили» [101].

Формализация параметров ККММ, перечень клиентских групп ККММ и зоны разграничения ККММ в дальнейшем использованы при создании функциональной модели планирования ККММ, положенной в основу АСРП, структура которой синтезирована в Главе 2 диссертации, и методики автоматизированного регулирования пассажиропотока при проведении ККММ, созданной в Главе 2. Диссертационное исследование сосредоточено на зоне последней мили.

1.4 Классификация культурно-массовых мероприятий

Для обеспечения необходимых ресурсов при подготовке к культурно-массовым мероприятиям следует максимально подробно изучить его характерные особенности. Культурно-массовые мероприятия можно классифицировать по нескольким признакам [104]:

- направленность мероприятия;
- численность мероприятия;
- напряженность мероприятия;
- продолжительность мероприятия.

Графическая интерпретация классификационной схемы культурно-массовых мероприятий представлена на Рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Классификационная схема культурно-массовых мероприятий

Направленность мероприятия (1-й классификационный признак) влияет на состав клиентских групп, посещающих мероприятие и соответственно меры обеспечения безопасности. Можно выделить следующие группы:

Религиозно-общественные мероприятия – дата мероприятия обычно известна заранее, оно проходит с определённой периодичностью, состав клиентских групп обычно однороден. Характерными примерами таких мероприятий являются гуляния в честь дня города или религиозные праздники (Пасха, Рождество и т.д.).

Общественно-политические мероприятия – к таким мероприятиям относятся митинги, демонстрации. Участники мероприятия могут быть агрессивно настроены, что влияет на планирование мероприятия. Характерным примером мероприятия того типа может быть митинг и демонстрация.

Развлекательно-просветительские мероприятия – к таким мероприятиям относятся выставки, концерты, спектакли и фестивали. Дата мероприятия обычно известна заранее, состав клиентских групп обычно однороден, посетители мероприятия неагрессивны.

Спортивные мероприятия – соревнования по различным видам спорта. Выделяются различные клиентские группы. В зависимости от конкретного события посетители мероприятия могут быть агрессивно настроены.

Численность мероприятия (2-й классификационный признак) – количество человек, посетивших мероприятия. Численность напрямую влияет на пассажиропоток и транспортное обеспечение мероприятия, соответственно.

Согласно экспертным оценкам мероприятия можно разделить на массовое мероприятие, крупномасштабное и мега-событие.

Напряженность мероприятия (3-й классификационный признак) 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.

Нейтральное мероприятие – мероприятие, которое не предполагают разделение пешеходных потоков. Модели поведения посетителей мероприятия схожи, отдельные клиентские группы не выделяются.

Мероприятие повышенного внимания – мероприятие, привлекающее повышенное внимание у публики. Выделяют несколько клиентских групп, нейтральных и неагрессивных.

Чрезвычайное мероприятие – мероприятие, характеризующееся повышенными мерами безопасности. При проведении выделяют различные клиентские группы, пешеходные потоки которых необходимо разводить.

Продолжительность мероприятия (четвертый классификационный признак)

Разовое мероприятие – мероприятия продолжительностью не более 1-го дня.

Серия мероприятий – комплекс мероприятий, продолжительность более 1-го дня. Серию мероприятий также можно разделить на мероприятия до 3-х дней и более 3-х дней.

Присвоим числовые коэффициенты значениям классификационных признаков (Таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Градация значений классификационных признаков

Классификационный признак	Значение классификационного признака	Числовой коэффициент
Направленность	Не рассматривается – значения коэффициентов могут варьироваться в зависимости от конкретного мероприятия	
Численность	Массовое мероприятие	1
	Крупномасштабное мероприятие	2
	Мега-событие	3
Напряженность	Нейтральное мероприятие	1
	Мероприятие повышенного внимания	2
	Чрезвычайное мероприятие	3
Продолжительность	Разовое мероприятие	1
	Серия мероприятий (до 3-х дней)	2
	Серия мероприятий (более 3-х дней)	3

Рассмотрим перечень культурно-массовых мероприятий, представленный в Таблице 1.4. Исходя из значений классификационных признаков, культурно-массовые мероприятия можно разделить на 3 группы.

К первой группе относятся мероприятия, с суммой коэффициентов не больше 4. В этом случае основная нагрузка приходится на площадку мероприятия, Пешеходный поток рассматривается однородным, без выделения в нем клиентских групп.

Ко второй группе относятся мероприятия, с суммой коэффициентов от 5 до 6. В этой группе задействуется местная транспортная инфраструктура и район мероприятия, в пешеходном потоке выделяются клиентские группы.

К третьей группе относятся мероприятия, с суммой коэффициентов 7 и более. В них задействуется внешняя транспортная инфраструктура и характерна повышенная численность и напряженность. Присутствует смешанность клиентских групп.

Таблица 1.4 – Перечень культурно-массовых мероприятий

№ п/п	Мероприятие	Коэффициенты	Сумма коэффициентов
1.	Волейбольный матч	Массовое, нейтральное, 1 день	3
2.	Премьера фильма	Массовое, нейтральное, 1 день	3
3.	Купание на Крещение	Массовое, повышенного внимания, 1 день	4
4.	Выборы	Массовое, повышенного внимания, 1 день	4

5.	Выставка Третьяковской галереи	в	Крупномасштабное, нейтральное, более 30 дней	6
6.	Празднование Пасхи		Крупномасштабное, повышенного внимания, 1 день	5
7.	Митинг, демонстрация		Крупномасштабное, чрезвычайное, 1 день	6
8.	Концерт рок-группы		Крупномасштабное, повышенного внимания, 1 день	5
9.	Хоккейный матч сборных команд		Крупномасштабное, повышенного внимания, 1 день	5
10.	Футбольный матч		Крупномасштабное, чрезвычайное, 1 день	6
11.	Хадж		Мега-событие, чрезвычайное, более 3-х дней	9
12.	Празднование 9 мая		Мега-событие, чрезвычайное, 1 день	7
13.	Празднование дня города		Крупномасштабное, чрезвычайное, 2 дня	7
14.	Музыкальный фестиваль		Крупномасштабное, чрезвычайное, 2 дня	7
15.	ЧМ по футболу		Мега-событие, чрезвычайное, более 3-х дней	9
	Олимпийские Игры		Мега-событие, чрезвычайное, более 3-х	9
16	Финал Лиги- чемпионов		Мега-событие, чрезвычайное, 1 день	7

В Таблице 1.5 представлена классификация культурно-массовых мероприятий.

Таблица 1.5 – Классификация культурно-массовых мероприятий

	I группа		II группа		III группа	
Религиозно-общественные мероприятия						
Численность	Массовое		Крупномасштабное		Крупномасштабное	
Продолжительность	1 день		1 день		20 дней	
Напряжённость	Повышенного внимания		Повышенного внимания		Чрезвычайное	
Пример	Купание на крещение		Пасха		Хадж	
Общественно-политические мероприятия						
Численность	Массовое		Крупномасштабное		Мега-событие	Мега-событие
Продолжительность	1 день		1 день		1 день	3 дня
Напряжённость	Повышенного внимания		Чрезвычайное		Чрезвычайное	Повышенного внимания
Пример	Выборы		Митинг		Празднование 9 мая, «Бессмертный полк»	Празднование дня города, Москва
Развлекательно-просветительские мероприятия						
Численность	Массовое	Крупномасштабное	Крупномасштабное		Крупномасштабное	
Продолжительность	1 день	90 дней	1 день		3 дней	
Напряжённость	Нейтральное	Нейтральное	Повышенного внимания		Чрезвычайное	
Пример	Премьера фильма Михалкова	Выставка Васнецова	Концерт рок-группы (AC/DC)		Музыкальные фестивали (АFP, Нашествие)	
Спортивные мероприятия						
Численность	Массовое		Крупномасштабное	Крупномасштабное	Мега-событие	Мега-событие
Продолжительность	1 день		1 день	1 день	30 дней	1 день
Напряжённость	Нейтральное		Повышенного внимания	Чрезвычайное	Чрезвычайное	Чрезвычайное
Пример	Волейбольный матч		Хоккейный матч (сборные)	Футбольный матч (клубы)	ЧМ по футболу, Олимпийские Игры	Финал Лиги Чемпионов

Присвоив значения коэффициентам, мероприятия можно расположить в трехмерном пространстве с точки зрения расстояния по Хэммингу – грани куба являются осями для каждого классификационного признака, а значения этих признаков являются расстоянием по Хэммингу [105]. Графическое изображение представлено на Рисунке 1.7. Цифра внутри круга соответствует порядковому номеру мероприятия в Таблице 1.4.

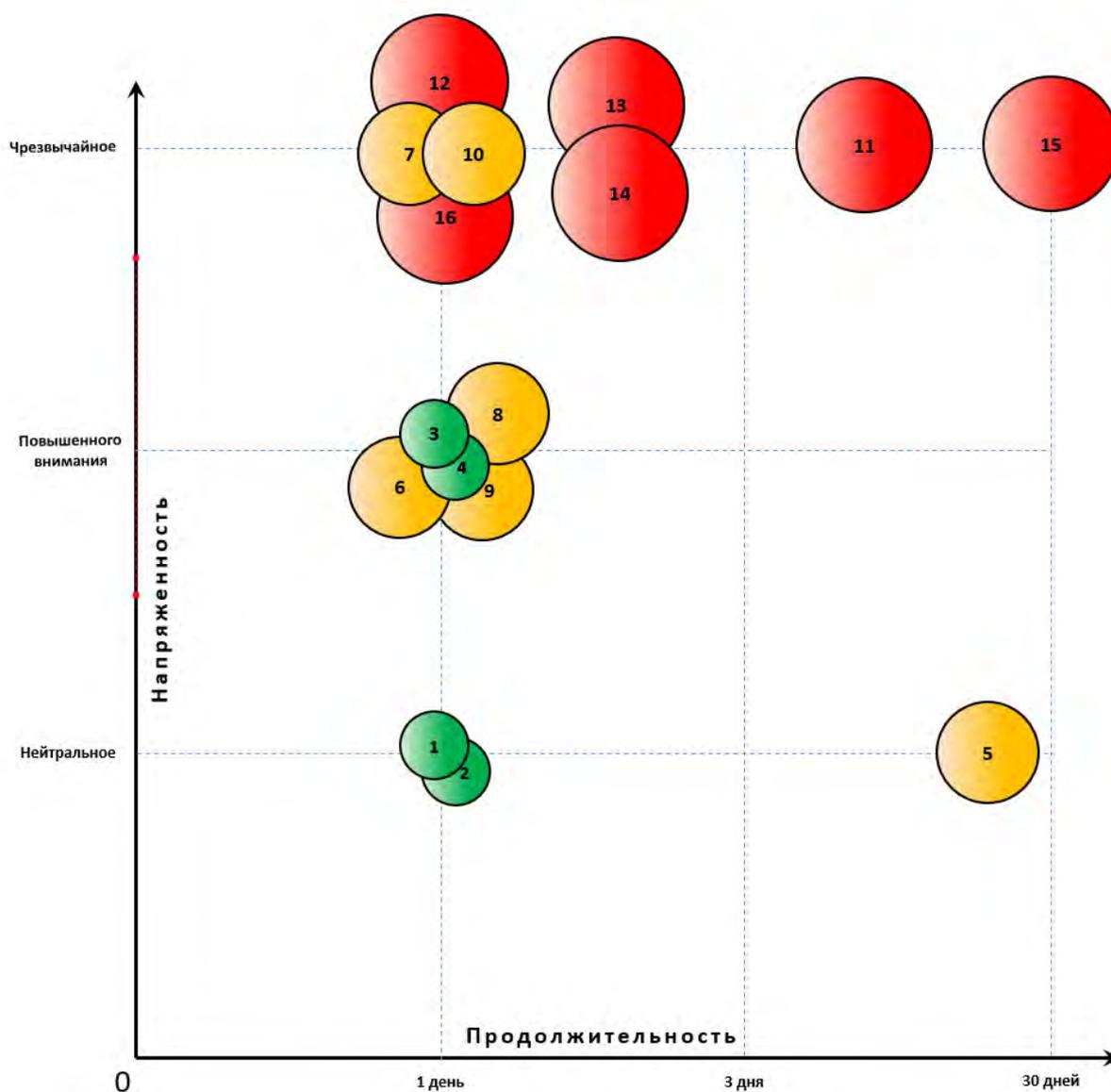


Рисунок 1.7 – Графическое изображение классификационной схемы культурно-массовых мероприятий

Разработанные классификационные блоки задействованы в блоке А11 «Классификация ККММ» функциональной модели планирования ККММ, разработанной в Разделе 2.2 диссертации для определения типа мероприятия и формализации его параметров.

1.5 Постановка задачи научного исследования

Средства автоматизированного регулирования пассажиропотока относятся к классу систем поддержки принятия решения, разработка которых предполагает развитое математическое и информационно-технологическое обеспечение. В связи с этим актуальным является документирование автоматизируемых бизнес-процессов и технологических процессов, объединенное в функциональную модель, разработка структуры соответствующей автоматизированной системы управления и имитационных моделей в качестве основы для реализации следующих этапов проектирования средств автоматизации. В отличие от известных систем [34] [106] [72], в данном диссертационном исследовании следует сделать акцент на формализацию и анализ параметров ККММ, транспортной инфраструктуры и пешеходных потоков. В зависимости от зоны разграничения и фазы мероприятия необходимо применять различные подходы для достижения целевых значений критериев качества.

В ККММ принимают участие различные клиентские группы посетителей со своими персональными характеристиками и моделями поведения [101]. Их взаимодействие в едином пешеходном потоке может изменяться в зависимости от зоны разграничения стадии ККММ [107]. Отдельное внимание следует уделить способам управления пешеходными потоками и транспортной инфраструктурой в период повышенных нагрузок. При этом определение качества работы эффективно выполнять на имитационных моделях, построенных, в свою очередь, на специально разработанных математических моделях. В связи с этим актуальной является задача разработки математических и имитационных моделей функционирования зон разграничения ККММ на всех этапах его проведения, учитывающих, в отличие от известных автору, неоднородность пешеходного потока зрителей, различия в критериях оценки качества функционирования систем обслуживания и объектов инфраструктуры в зависимости от рассматриваемой зоны разграничения. Раньше эта задача не была решена, поэтому в данном исследовании она является одним из направлений научного исследования.

Работы [12] [13] [14] [15] [16] [17] [32] [33] рассматривают моделирование пассажиропотоков на транспортно-пересадочном узле с учетом логических зависимостей в организации их перемещения. Показана модель функционирования транспортно-пересадочного узла, оцениваются средства оптимизации планировочных решений, анализа и обоснования направлений, интенсивности и скорости пассажиропотоков в условиях многоярусной и разнотипной городской транспортной среды в условиях плановых каждодневных нагрузок [33]. Однако, в связи с этим, ещё одним направлением выполненных автором исследований является построение и апробирование методики автоматизированного регулирования пассажиропотока при проведении ККММ на основе выработанных критериев качества, когда нагрузка на инфраструктуру значительно превышает ежедневную. Данная методика должна учитывать особенности мероприятий такого масштаба, а именно эмоциональное состояние участников ККММ, различия в их моделях поведения до начала ККММ и по окончании, планировочные решения каждой из зон разграничения. Успешное испытание данной методики позволит повысить качество обслуживания участников пешеходного потока зрителей и эффективность функционирования объектов транспортной инфраструктуры при проведении аналогичных мероприятий.

Основные выводы и результаты по Главе 1

1. Проблема транспортного планирования и регулирования пассажиропотока при проведении ККММ лежит на стыке нескольких фундаментальных тем и затрагивает вопросы управления пешеходными потоками, управления объектами транспортной инфраструктуры, а также методологические вопросы подготовки и организации культурно-массовых мероприятий.

2. Анализ опыта организации и проведения различных ККММ позволил определить:

- основные параметры и ключевые признаки, по которым возможно классифицировать культурно-массовое мероприятие, на основании которых составлен соответствующий классификатор;

- причины возникновения чрезвычайных ситуаций, в частности давки, во время культурно-массового мероприятия;

- клиентские группы ККММ на примере ЧМ;

- типовые уровни планирования и зоны разграничения ККММ.

3. ЧМ 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 планирования и транспортного обеспечения. На каждом уровне планирования необходимо учитывать различные модели поведения клиентских групп болельщиков и их потребности в транспортном обеспечении.

4. Исследованиям отдельных аспектов организации культурно-массовых и спортивных мероприятий посвящены многие научные работы. Однако существует лишь небольшое количество исследований, которые учитывают влияние ККММ на транспортную систему и рассматривают специфику регулирования пассажиропотока при проведении таких мероприятий. Учитывая регулярное проведение массовых мероприятий в нашей стране, необходимо детальное исследование и проработка общего вопроса.

2. МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ КУЛЬТУРНО-МАССОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

2.1 Структура автоматизированной системы регулирования пассажиропотока

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

В первую очередь следует рассмотреть вопросы, связанные с разработкой математического обеспечения АСРП, определением состава ее подсистем (модулей) и разработкой архитектуры (структуры) системы [106] [108] [109].

Функциональность АСРП должна соответствовать следующим требованиям:

- ввод исходных данных ККММ (параметры инфраструктуры зон разграничений ККММ, систем обслуживания, пешеходных потоков зрителей и др.);
- моделирование функционирования объектов инфраструктуры, зон разграничений и движения пешеходных потоков зрителей внутри них до начала и по окончании ККММ;
- возможность внесения изменений в исходную модель для проведения имитационных экспериментов;
- наличие инструментов для анализа, оценки и сравнения полученных результатов экспериментов на соответствие целевым значениям выбранных критериев качества;
- наглядная визуализация процесса моделирования.

Опираясь на требования и принципы построения АСУ данного типа [108] разработана ее архитектура. Модули системы и их взаимодействие представлены на Рисунке 2.1. Раскроем их назначение:

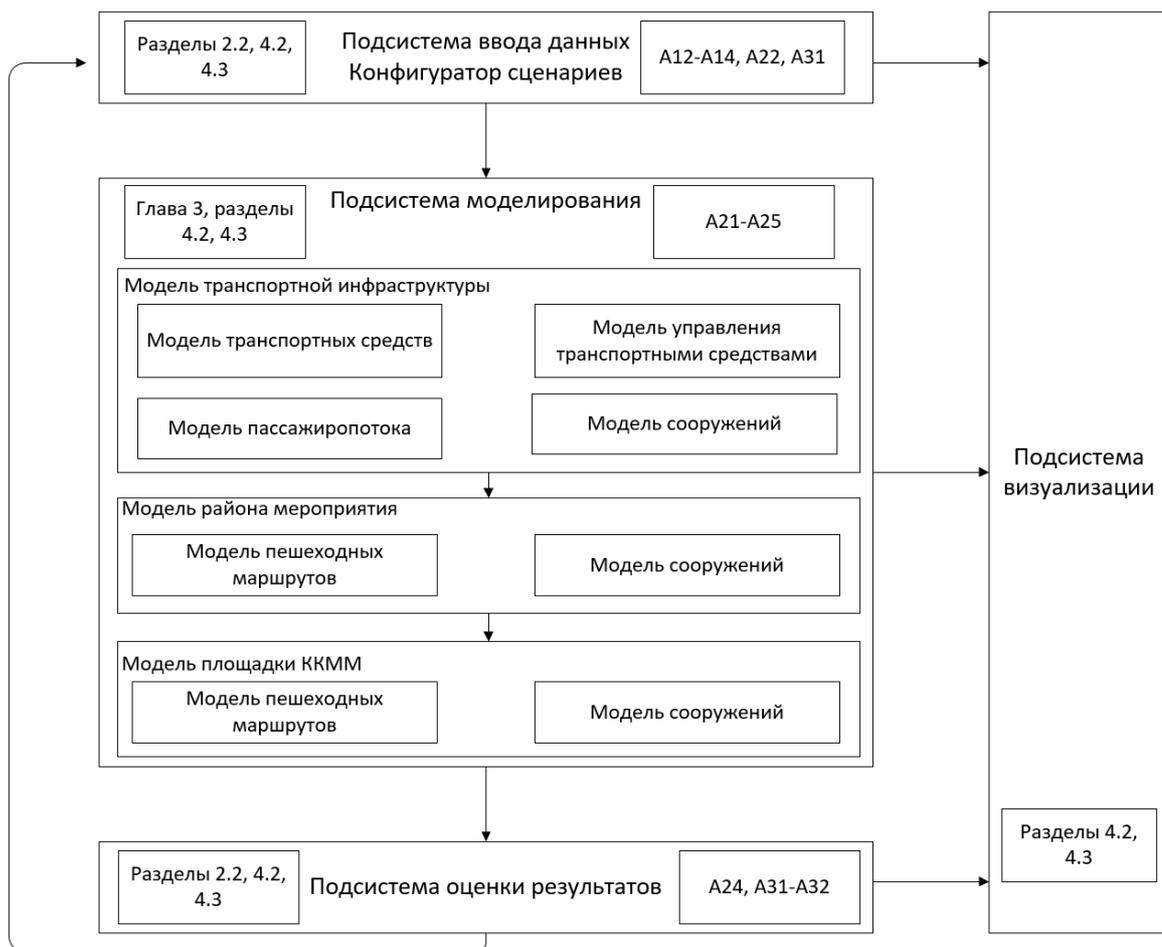


Рисунок 2.1 – Структура АСРП

– подсистема ввода данных включает в себя конфигуратор сценариев имитационных экспериментов, которые реализует подсистема моделирования, позволяющая осуществлять выбор параметров и исходных данных объектов инфраструктуры, зон разграничений, характеристик клиентских групп представителей пешеходного потока зрителей для достижения цели эксперимента. Ввод данных осуществляется с помощью пользовательского интерфейса. Множество задач, решаемых подсистемой ввода данных, формируется на основе информации, собранной в блоках A12-A14, и используется при выполнении действий в блоках A22, A31 функциональной модели, разработанной в Разделах 2.2, 4.2 и 4.3;

– подсистема моделирования отвечает за разработку, функционирование и взаимодействие между собой моделей объектов инфраструктуры, пешеходных потоков зрителей ККММ для каждой зоны разграничения ККММ. Множество задач, решаемых подсистемой моделирования, реализуется в блоках A21-A25

функциональной модели, разработанной в Разделе 2.2, Главе 3 и Разделах 4.2-4.3 диссертации;

– подсистема визуализации представляет собой графический интерфейс, содержащий демонстрационные, управляющие элементы, панели меню, навигации и диалоговое окно моделирования. Она отвечает за воспроизведение данных из конфигуратора сценариев. Визуализация процесса моделирования происходит с помощью анимации, что позволяет оценивать реалистичность эксперимента и контролировать ход процесса. Рассматривается в Разделах 4.2-4.3 диссертационной работы;

– подсистема оценки результатов осуществляет расчет значений критериев качества выбранного сценария функционирования транспортной инфраструктуры ККММ по результатам проведения имитационных экспериментов. Отвечает за вывод данных о параметрах пешеходного потока зрителей в точках измерения, функционировании объектов инфраструктуры различных зон разграничения в процессе моделирования с помощью графиков и диаграмм. Множество задач, решаемых подсистемой моделирования, формируется на основе информации о блоках А24, А31-А32 функциональной модели, разработанной в Разделе 2.2 диссертации и Разделах 4.2-4.3.

При разработке структуры АСРП в ходе диссертационного исследования определен функционал системы и представлено формальное детализированное описание автоматизируемого бизнес-процесса. Функциональная модель планирования ККММ разработана в Разделе 2.2.

2.2 Функциональная модель планирования крупномасштабных культурно-массовых мероприятий

Для корректного функционирования АСРП необходимо составить формальное детализированное описание автоматизируемых бизнес-процессов и технологических процессов, в нашем случае, это процессы планирования ККММ.

Выполним их формализацию с помощью методологии функционального моделирования *IDEF0* – достаточно простым и в то же время наглядным способом описания бизнес-процессов. Инструмент разработан для задач бизнес-аналитики, активно используется с начала 2000-х годов и хорошо себя зарекомендовал в работах [8] [9]. Данная нотация представляет собой набор блоков со входами и выходами, управлением и механизмами, которые детализируются до необходимого уровня. В качестве описания потоков данных и информации используются различные виды стрелок:

- входящие – вводные, которые ставят определенную задачу;
- исходящие – конечный результат;
- управляющие (сверху-вниз) – механизмы управления (положения, инструкции, правила и т.д.);
- механизмы / ресурсы (снизу-вверх) – то, что используется в процессе решения задачи в блоке.

Подробное описание методологии содержится в рекомендациях Р 50.1.028-2001 «Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования» [110].

В модели графически описывается логическая организация процесса планирования ККММ, включая сбор исходных данных, проектирование модели и анализ результатов. На контекстной диаграмме верхнего уровня присутствует единственный блок Планирование ККММ, все описанные виды стрелок, цель процесса и точка зрения. Диаграмма процессов блока А0 (Планирование ККММ) представлена на Рисунке 2.2.

Декомпозируем блок А0. Первый уровень декомпозиции состоит из трех блоков подпроцессов:

1. Формализация параметров ККММ (описательная часть) 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.

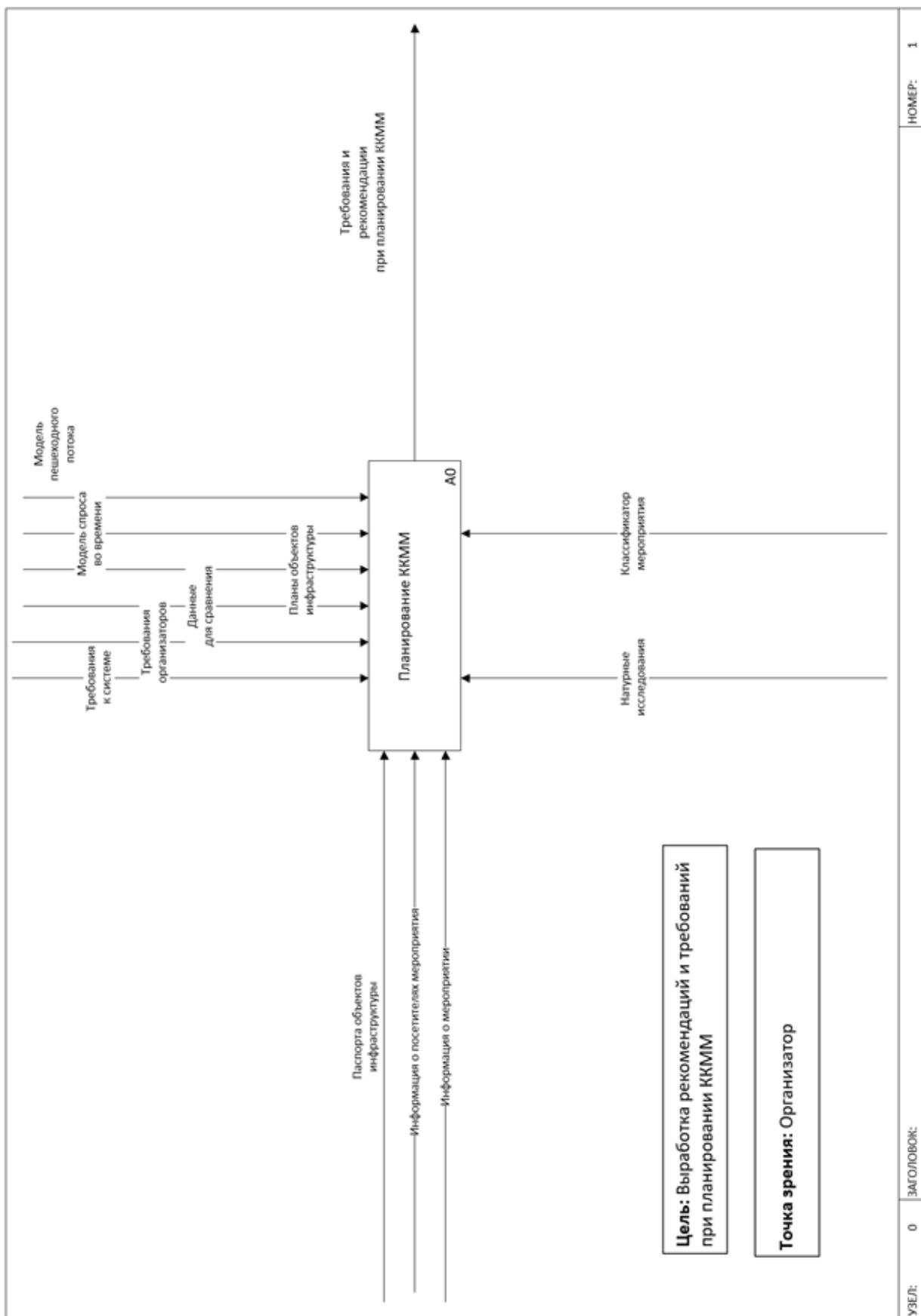


Рисунок 2.2 – Диаграмма процессов верхнего уровня

2. Разработка модели ККММ включает в себя задачи, связанные 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. Над разработанной моделью проводятся эксперименты для определения реакции модели.

Диаграмма декомпозиции процессов блока А0 представлена на Рисунке 2.3. По результатам моделирования подготавливается список рекомендаций и регламентов, который используется на операционном уровне для решения оперативных задач по обслуживанию и управлению пешеходными потоками и транспортной инфраструктуры.

Детализируем блок А1, в котором формализуются параметры ККММ. Это необходимо для создания имитационной модели ККММ. На базе классификатора, представленного в Разделе 1.4, определяется тип ККММ. Он влияет на определение количества необходимых ресурсов, дает оценку потенциальных рисков при проведении ККММ, выявляет критерии оценки качества проведения мероприятия.

На следующем этапе определяется перечень клиентских групп участников мероприятия, вычисляются значения параметров (количество представителей, скорость движения, передвижение в группе, агрессивность и т.д.). Данные позволяют определить структуру пешеходных потоков, участвующих в ККММ.

После получения данных об участниках мероприятия и пассажиропотоках необходимо формализовать описание зон разграничения, задействованных при проведении ККММ. В зонах разграничения выделяются ее физические границы, объекты инфраструктуры, их пропускные способности, системы обслуживания, с которыми взаимодействуют представители клиентских групп, соответствующее время обслуживания. Описание процессов блока А1 представлено в Таблице 2.1. Диаграмма процессов блока А1 представлена на Рисунке 2.4.

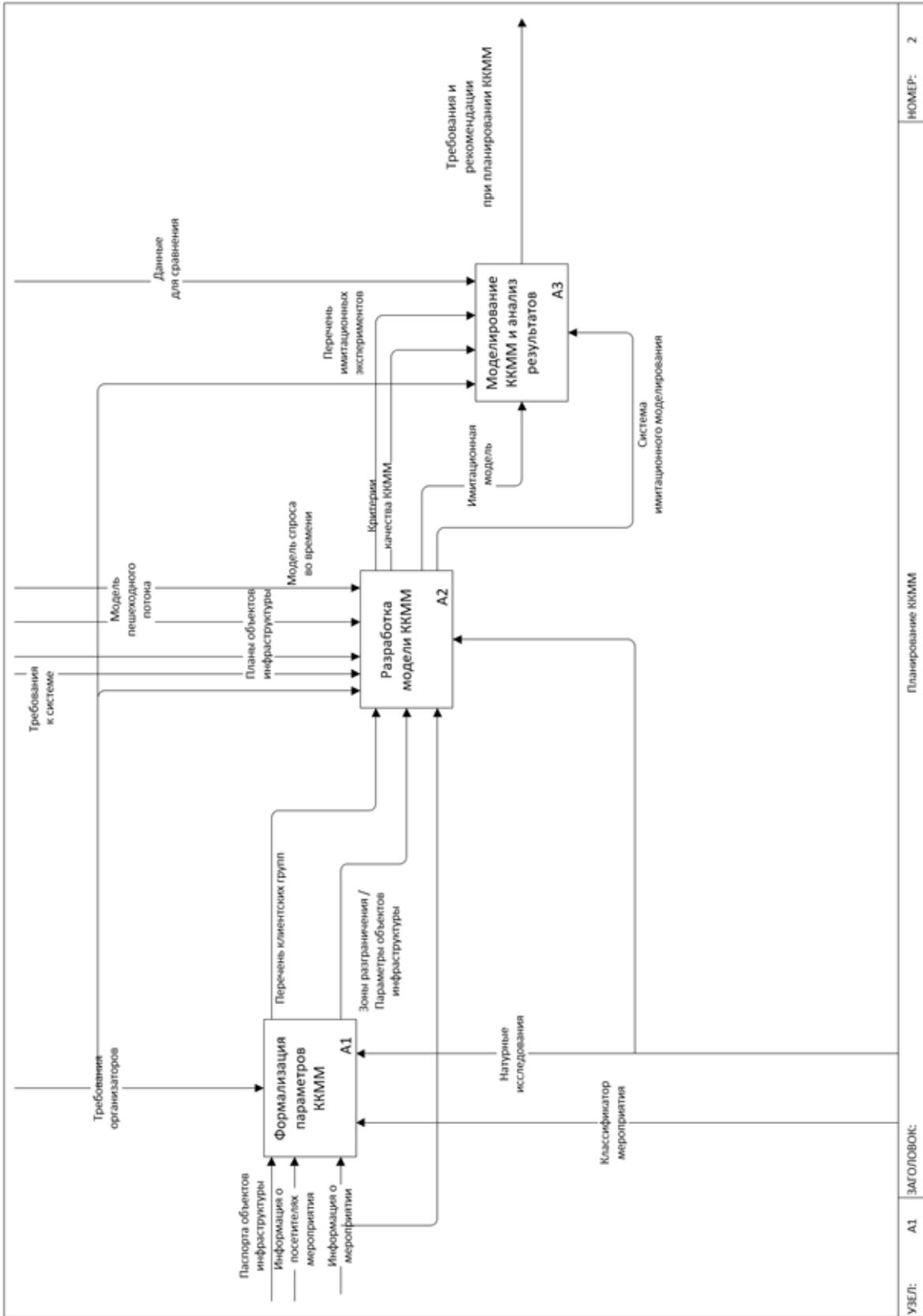
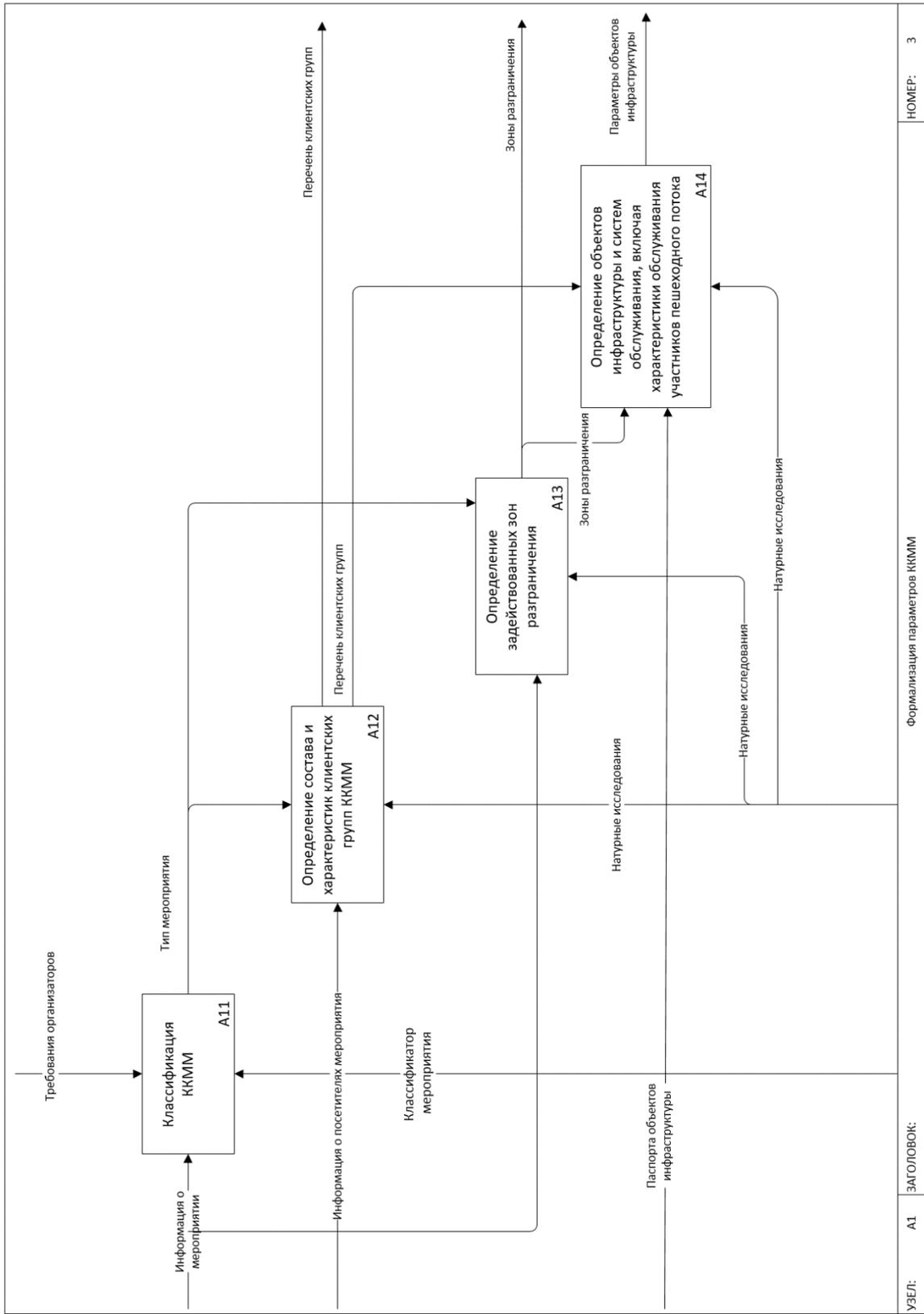


Рисунок 2.3 –Декомпозиция процессов блока А0



УЗЕЛ: А1

Формализация параметров ККМ

НОМЕР: 3

Рисунок 2.4 – Декомпозиция процессов блока А1

Таблица 2.1 – Описание процессов блока А1

Блок	Процесс	Входящие потоки	Результат	Подсистема АСРП
A11	Классификация ККММ (Раздел 1.4)	– информация о мероприятии; – требования организаторов; – классификатор мероприятия.	Тип мероприятия	Подсистема ввода данных
A12	Определение состава и характеристик клиентских групп ККММ (Раздел 1.3)	– тип мероприятия; – натурные исследования (объекта / системы); – информация о посетителях мероприятия.	Перечень клиентских групп участников мероприятия и их характеристики / параметры (значения атрибутов)	Подсистема ввода данных
A13	Определение задействованных зон разграничений (Раздел 1.4)	– тип мероприятия – информация о мероприятии; – натурные исследования (объекта / системы);	Перечень зон разграничения, задействованных при проведении ККММ	Подсистема ввода данных
A14	Определение объектов инфраструктуры, включая характеристики обслуживания участников пешеходного потока (Разделы 3.2-3.5, 4.2)	– зона разграничения; – перечень клиентских групп; – натурные исследования (объекта / системы); – паспорта объектов инфраструктуры.	Перечень объектов инфраструктуры и их характеристики	Подсистема ввода данных

Блок процессов разработки модели ККММ (А2) начинаются с определения системы компьютерного моделирования, наиболее подходящей для решения поставленной задачи (А21). Опираясь на перечень данных, полученный по результатам описания ККММ, моделируются объекты инфраструктуры, которые

входят в состав геометрической модели (A22). На следующем этапе разрабатывается логика движения, предполагаемые маршруты передвижения (A13), определяются критерии качества (A24) и перечень имитационных экспериментов. Полученные компоненты формируют имитационную модель ККММ (A21). Табличное описание процессов блока A2 представлено в Таблице 2.2. Диаграмма процессов блока A2 представлена на Рисунке 2.5

Таблица 2.2 – Описание процессов уровня A2

Блок	Процесс	Входящие потоки	Результат	Подсистема АСРП
A21	Выбор системы имитационного моделирования (Раздел 4.1)	<ul style="list-style-type: none"> – требования к системе; – информация о мероприятии. 	Система имитационного моделирования	X
A22	Разработка модели объектов инфраструктуры (Раздел 4.2)	<ul style="list-style-type: none"> – зона разграничения; – параметры объектов инфраструктуры; – система имитационного моделирования; – натурные исследования (объекта / системы); – информация о мероприятии; – планы объектов инфраструктуры 	Геометрическая модель	Подсистема моделирования: <ul style="list-style-type: none"> – модели сооружений; – модели транспортных средств.
A23	Разработка логики движения и пешеходных маршрутов (Разделы 3.1-3.5, 4.2)	<ul style="list-style-type: none"> – перечень клиентских групп; – модель пешеходного потока; – система имитационного моделирования; – натурные исследования 	Маршруты движения пешеходных потоков	Подсистема моделирования: <ul style="list-style-type: none"> – модели пассажирских потоков; – модели пешеходных маршрутов

		(объекта системы; – информация о мероприятии; – модель спроса во времени.		
A24	Выбор критериев качества / точек проведения измерений (Раздел 2.1)	– маршруты движения; – геометрическая модель; – система имитационного моделирования; – требования организаторов (исторические данные / опыт проведения аналогичных мероприятий).	– критерии качества; – перечень имитационных экспериментов; – измерительные участки.	Подсистема ввода данных (конфигуратор сценариев)
A25	Компиляция имитационной модели (Разделы 3.1-3.5, 4.2)	– компоненты имитационной модели; – система имитационного моделирования; – информация о мероприятии; – измерительные участки.	Имитационная модель	Подсистема моделирования

После разработки имитационной модели необходимо провести моделирование рассматриваемого мероприятия и оценить его результаты. Над моделью проводятся имитационные эксперименты, результаты которых позволяют сделать выводы о:

- времени эвакуации зрителей в различных зонах разграничений;
- расположении, количестве и характеристиках эвакуационных выходах;
- конфигурации зон досмотра, накопительных площадок и систем контроля управления доступа (СКУД);
- расположении барьеров безопасности, пешеходных коридоров и др.;

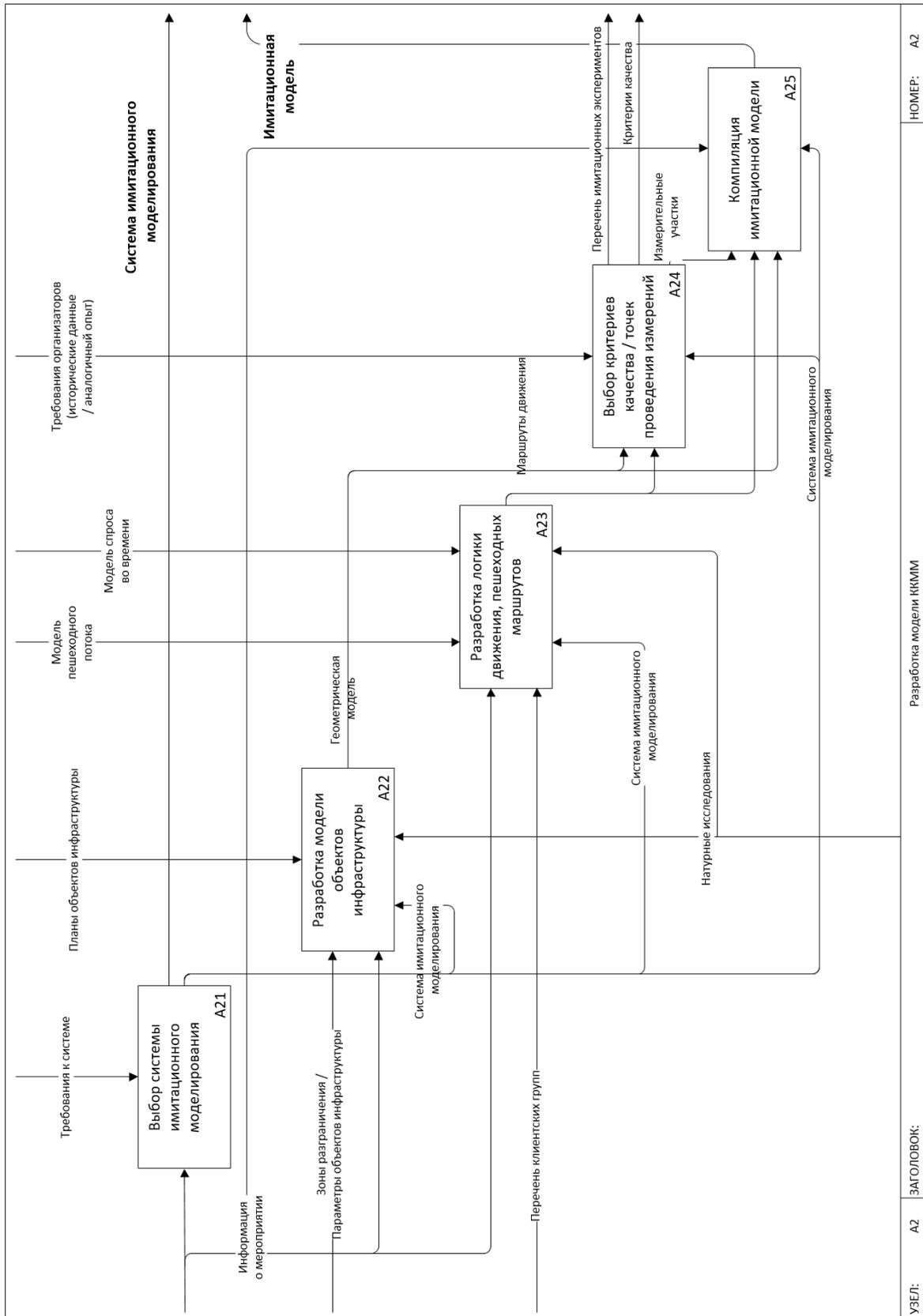


Рисунок 2.5 – Декомпозиция процессов блока A2

- характеристиках тротуаров, пешеходных дорожек и др.;
- транспортной доступности ККММ;
- безопасности и пропускной способности в местах пересечений пешеходных и транспортных потоков;
- расписании движения транспорта (сбор данных для подготовки расписания движений наземного транспорта, городского рельсового транспорта и других систем, задействованных в организации транспортного обеспечения ККММ).

На основе анализа результатов экспериментов принимается решение о внесении изменений в разработанную модель. Данный цикл повторяется до момента получения необходимых значений выбранных критериев качества. Это можно рассматривать как циклический повторяющийся процесс принятий решения при управлении качеством – цикл Деминга-Шухарата / методология *PDCA* (*Plan* (Планирование) - *Do* (Действие) - *Check* (Проверка) - *Act* (Корректировка)) [111] [112] (Рисунок 2.6). С точки зрения теории управления процесс изменения имитационной модели ККММ рассматривается как замкнутая система управления с обратной связью.



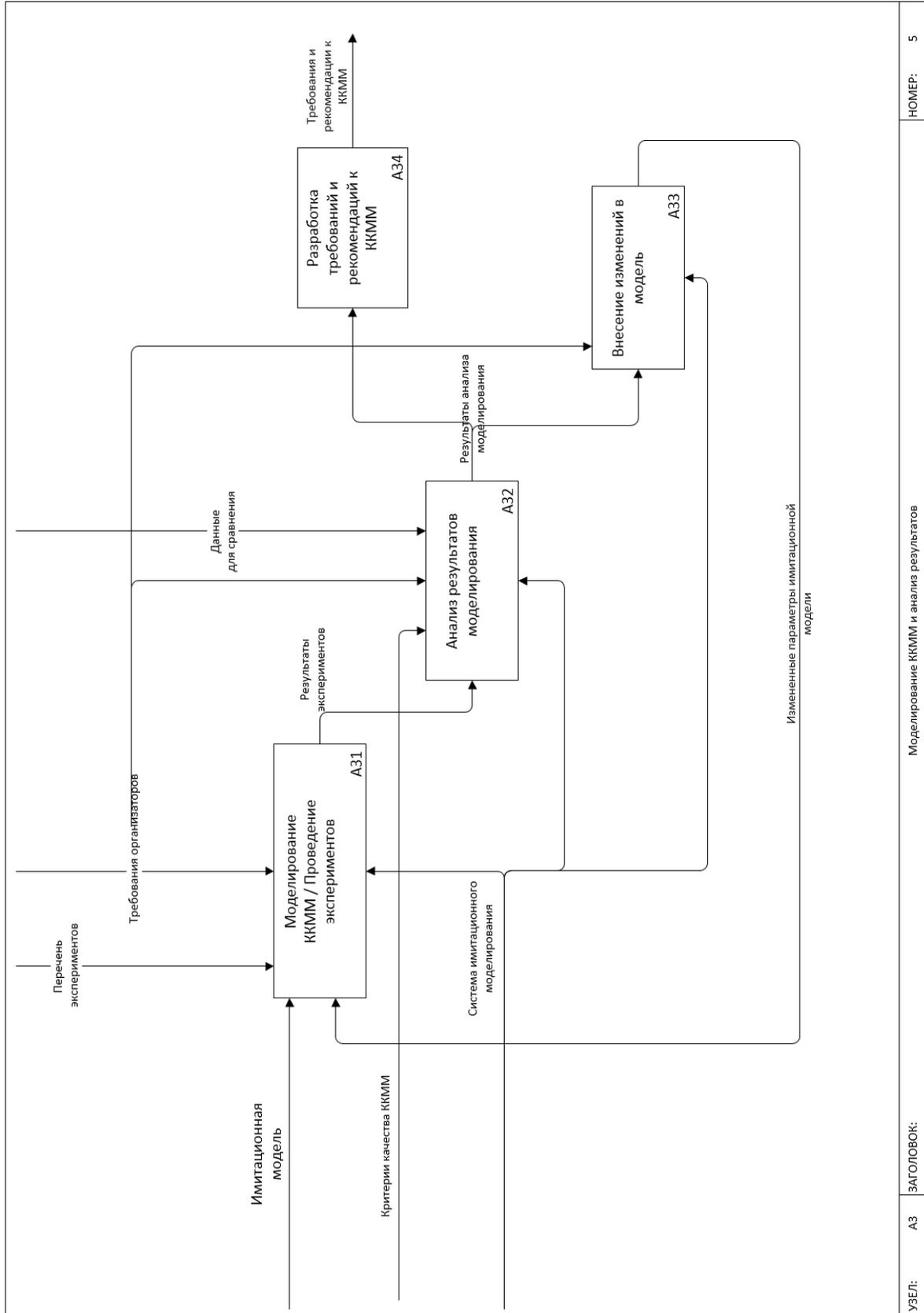
Рисунок 2.6 – Цикл Деминга-Шухарта

Полученные данные ложатся в основу требований и рекомендаций к ККММ.

Табличное описание процессов блока А3 (Моделирование ККММ и анализ результатов) представлено в Таблице 2.3. Диаграмма процессов блока А3 представлена на Рисунке 2.7

Таблица 2.3 – Описание процессов уровня А3

Блок	Процесс	Входящие потоки	Результат	Подсистема АСРП
А31	Моделирование ККММ и проведение имитационных экспериментов (Раздел 4.2)	<ul style="list-style-type: none"> – система имитационного моделирования; – имитационная модель; – требования организаторов; – критерии качества ККММ; – перечень экспериментов; – измененные параметры имитационной модели. 	– результаты моделирования/ экспериментов	Подсистема моделирования Подсистема визуализации Конфигуратор сценариев
А32	Анализ результатов моделирования (Раздел 4.2)	<ul style="list-style-type: none"> – система моделирования; – требования организаторов; – данные для сравнения; – критерии качества ККММ; – результаты моделирования. 	Результаты анализа моделирования	Уменьшение плотности пешеходного потока
А33	Внесение изменений в модель (Раздел 4.2)	<ul style="list-style-type: none"> – результаты экспериментов; – система имитационного моделирования. 	Измененные параметры имитационной модели	Подсистема моделирования
А34	Подготовка требований и рекомендаций к ККММ (Разделы 2.2, 4.2)	<ul style="list-style-type: none"> – результаты анализа моделирования; – требования организаторов; – критерии качества ККММ. 	Требования и рекомендации к ККММ	Подсистема визуализации



УЗЕЛ: А3

ЗАГОЛОВОК: Моделирование ККММ и анализ результатов

НОМЕР: 5

Рисунок 2.7 – Декомпозиция процессов блока А3

2.3 Выбор критериев качества планирования крупномасштабного культурно-массового мероприятия

Повышение качества транспортного обслуживания требует комплексного подхода [49] [113]. В качестве основных критериев (параметров), которые предоставляют информацию о качестве планирования ККММ (функционирование объектов инфраструктуры, эффективность планировочных решений, организация навигации и т.д.) рассматриваются:

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 / средние 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.

Оценку полученных значений критериев качества необходимо провести во всех зонах разграничения до начала и после окончания ККММ. Для этого предназначены процессы А32 (Анализ результатов моделирования) и А33 (Внесение изменений в модель). Выполнение типовых рекомендаций позволит повысить качество обслуживания участников пешеходного процесса зрителей и эффективность функционирования объектов транспортной инфраструктуры. В ходе исследования сформулировано множество требований и рекомендаций Ω , необходимых для повышения качества ККММ:

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 алгоритмы получения целевых значений критериев качества. В Таблице 2.4 представлена совокупность требований и рекомендаций по достижению целевых значений критериев качества.

Таблица 2.4. – Перечень требований и рекомендаций по достижению целевых значений критериев качества

Критерий качества	Зона разграничения	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	Транспортная инфраструктура	Ω_1, Ω_3	Ω_1
	Район ККММ	$\Omega_6, \Omega_7, \Omega_8$	$\Omega_4, \Omega_5, \Omega_6$
	Площадка	$\Omega_6, \Omega_7, \Omega_8$	X

пешеходного потока	ККММ		
Качество обслуживания в системах обслуживания (время обслуживания, время ожидания, количество систем обслуживания на пути следования);	Транспортная инфраструктура	Ω_1, Ω_3	Ω_1
	Район ККММ	Ω_9	X
	Площадка ККММ	Ω_9	
Обеспечение безопасности	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 комфорта	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}

В диссертационной работе в ходе имитационного моделирования будут проверены выдвинутые гипотезы Ω по достижению целевых значений критериев качества Ψ .

Сопоставим критерии качества планирования ККММ и предложенные рекомендации для каждой зоны разграничения. В Таблице 2.5 представлен анализ рекомендаций, применение которых необходимо до начала ККММ, в Таблице 2.6 – после окончания ККММ.

Таблица 2.5 – Анализ требований и рекомендаций перед началом ККММ

	Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_4	Ω_5	Ω_6	Ω_7	Ω_8	Ω_9	Ω_{10}	ИТОГО:
Ψ_1	1	1	3		2	2	2				11
Ψ_2	1		1			2	2	2			8
Ψ_3	1		1						2		4
Ψ_4	1				2	2		3	2		10
Ψ_5	3							3	3	3	12
ИТОГО:	7	1	5	0	4	6	4	8	7	3	

Таблица 2.6 – Анализ требований и рекомендаций после окончания ККММ

	Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_4	Ω_5	Ω_6	Ω_7	Ω_8	Ω_9	Ω_{10}	ИТОГО:
Ψ_1	1		1	2		1			1	1	7

Ψ_2	1			1	1	1					4
Ψ_3	1										1
Ψ_4	1			1	1			2	2	2	9
Ψ_5	3							1	3	3	10
ИТОГО:	7	0	1	4	2	2	0	3	6	6	

Из Таблицы 2.5 видно, 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 – «Обеспечение максимального количества видов доступного общественного транспорта». Это связано с тем, что болельщики прибывают на ККММ заранее и, соответственно, отсутствует практика ограничения доступных видов транспорта. Наиболее востребованными являются рекомендации $\Omega_1, \Omega_8, \Omega_9$.

Из анализа данных Таблицы 2.6 видно, что после окончания ККММ необходимо применение меньшего количества рекомендаций для выполнения критериев качества планирования ККММ. Выполнение наибольшего количества рекомендаций для критериев Ψ_4, Ψ_5 обусловлено тем, что по окончании ККММ все болельщики сразу покидают площадку мероприятия, следовательно, управление таким пешеходным потоком требует дополнительных усилий.

Основные выводы и результаты по Главе 2

1. Эффективное планирование и проведение ККММ требует автоматизации соответствующих процессов и разработки автоматизированной системы регулирования пассажиропотока (АСРП).

2. При проектировании АСРП определены состав подсистем (модулей) АСУ, разработана архитектура (структура) и математическое обеспечение системы.

3. Разработанная функциональная модель планирования ККММ, основывающаяся на методологии функционального моделирования *IDEFO*, позволяет наглядным образом представить логическую организацию технологического процесса, включая сбор исходных данных, проектирование модели и анализ результатов.

4. Функциональная модель автоматизируемого технологического процесса является основой структуры АСРП, в рамках которой достижение целевых значений выбранных критериев качества рассматривается как циклический повторяющийся процесс принятий решения при управлении качеством (цикл Деминга-Шухарата).

5. Сформулированы критерии качества планирования ККММ, позволяющие сделать вывод об эффективности функционирования объектов инфраструктуры при пиковых нагрузках и управления пешеходными потоками.

6. Сформировано множество рекомендаций и требований Ω , позволяющих повысить качество обслуживания участников пешеходного потока и увеличить эффективность функционирования объектов транспортной инфраструктуры при проведении ККММ. Составлены таблицы соответствия между критериями качества планирования ККММ и рекомендациями, которые позволяют определить степень востребованности рекомендаций и широту возможностей их воздействия на значение того или иного критерия.

3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН РАЗГРАНИЧЕНИЙ КРУПНОМАСШТАБНЫХ КУЛЬТУРНО-МАССОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

3.1 Принципы построения математических моделей зон разграничений крупномасштабных культурно-массовых мероприятий

При проведении ККММ можно выделить 4 основных типа движения пешеходных потоков в зависимости от зоны разграничения (Рисунок 1.4):

- 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 в ходе диссертационного исследования построены математические модели, особенности которых систематизированы в Таблице 3.1. «-» обозначает нерегулируемые (возмущающие) факторы, «+» регулируемые.

Таблица 3.1 – Особенности математических моделей

	При прибытии на ККММ		После завершения ККММ	
	Внутри транспортного узла	В зоне последней мили	Внутри транспортного узла	В зоне последней мили
Смешанность клиентских групп	есть	есть	есть	регулируемая
Управление прибытием людей в систему	+	-	-	+
Управление выходом людей из системы	-	+	+	+
Наличие систем	есть	есть	есть	нет

обслуживания				
Критерий выбора управляющих воздействий	Быстродействие обслуживания и движения пешеходного потока, уменьшение длины очередей на входе систем обслуживания	Наполняемость накопителей элементов транспортного узла (станций метрополитена и других рельсовых систем, остановок наземного нерельсового транспорта)		

Рассмотрим способ обозначения потоков клиентских групп и введем буквенные обозначения в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Буквенные обозначения в математических моделях

Буква в обозначении	Значение
<i>I</i>	первая буква в обозначении потоков на входе в зоны разграничения (от англ. <i>inside</i> – внутри)
<i>O</i>	первая буква в обозначении потоков на выходе из зон разграничения (от англ. <i>out</i> – из)
<i>B</i>	последняя буква в обозначении потоков, указывающая на то, что они относятся к периоду времени до начала мероприятия (от англ. <i>before</i> – до)
<i>A</i>	последняя буква в обозначении потоков, указывающая на то, что они относятся к периоду времени после окончания мероприятия (от англ. <i>after</i> – после)
<i>M</i>	вторая буква в обозначении или буква в верхнем индексе, показывающая, что поток относится к зоне разграничения внутри местной инфраструктуры (от англ. <i>metro</i> – метро) в соответствии с разграничением, введенным в п. 1.6 и проиллюстрированным Рисунком 1.5
<i>S</i>	вторая буква в обозначении или буква в верхнем индексе, показывающая, что поток относится к зоне разграничения район мероприятия (от англ. <i>stadium</i> – стадион) в соответствии с разграничением, введенным в п. 1.6 и проиллюстрированным

	Рисунком 1.5
α_{xxx}^{xx}	доля представителей клиентских групп, движущихся внутри или между зонами разграничения, определяемыми значениями индексов
θ_{xx}^{xx}	величина запаздывания потока представителей клиентских групп, движущихся внутри или между зонами разграничения, определяемыми значениями индексов
g	номер клиентской группы
T_{gx}	промежуток времени, затрачиваемый участником g -й клиентской группы на прохождение системы обслуживания
τ_{gx}	промежуток времени, затрачиваемый участником g -й клиентской группы на прохождение системы обслуживания

Буквенные обозначения введены для единой формы интерпретации моделируемого события. Перейдем к построению математических моделей зон разграничения ККММ. Связь этих математических моделей представлена на Рисунке 3.1.

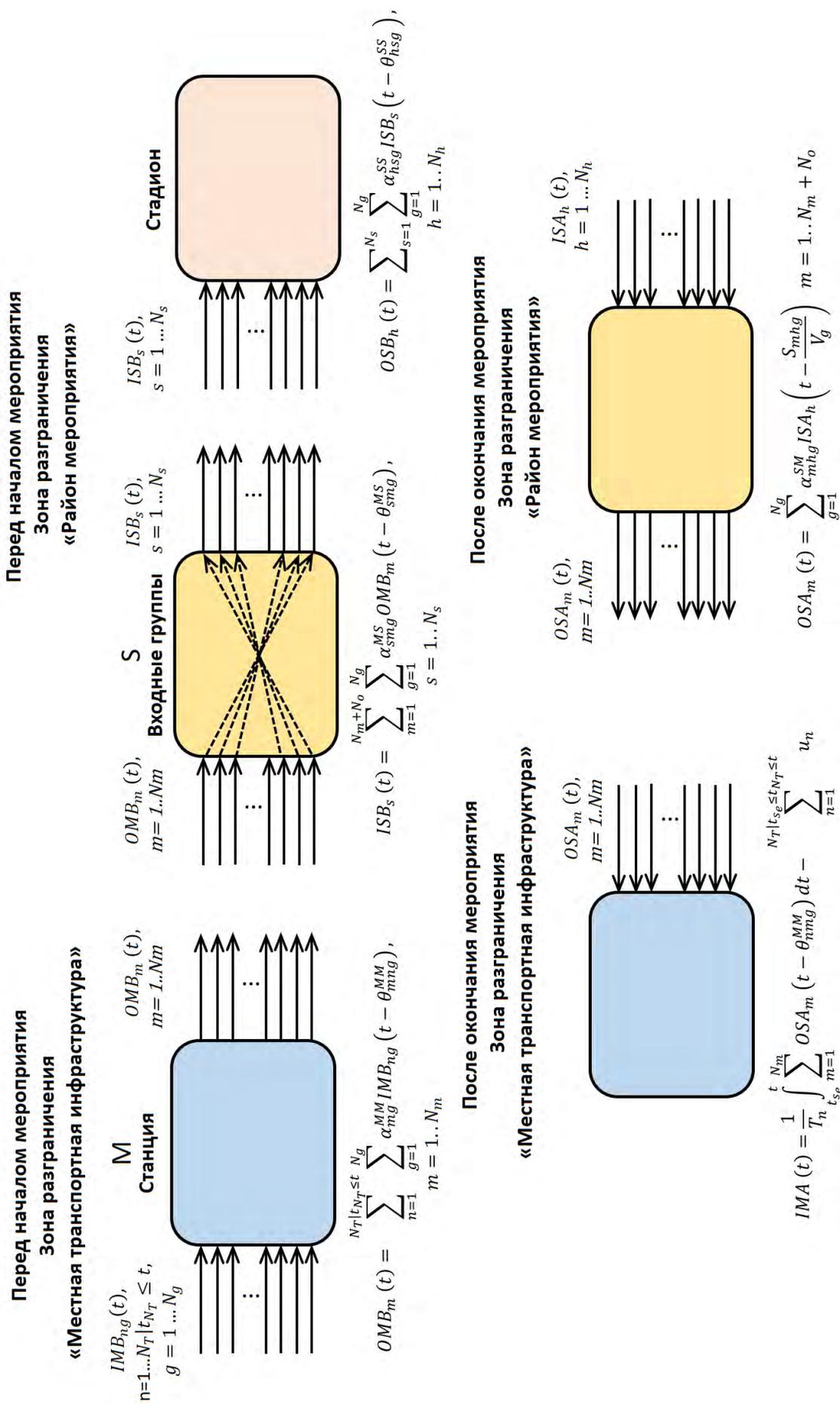


Рисунок 3.1 – Графическая интерпретация математических моделей зон разграничения ККММ.

3.2 Математическая модель транспортного узла при прибытии на крупномасштабное культурно-массовое мероприятие

Построим математическую модель транспортного узла (местной инфраструктуры) при прибытии на ККММ [114] [115]. 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. В качестве примера такой системы рассмотрим станцию «Спартак» Московского метрополитена, имитационная модель которой построена в Разделе 4.2.1. При рассмотрении в качестве ККММ футбольного матча поток болельщиков, прибывающих на поездах на станцию «Спартак», является входом системы [116]. Выходами системы являются потоки людей на Северном и Южном выходах станции «Спартак», что отражено на Рисунке 3.2 [71].

Плотность потока представителей клиентских групп, проходящих через сечение в пространстве, соответствующее m -му выходу, за единицу времени, $OMB_m(t)$ определяется по формуле (3.1). Буквенные обозначения расшифровываются согласно Таблице 3.2.

$$OMB_m(t) = \sum_{n=1}^{N_T | t_{N_T} \leq t} \sum_{g=1}^{N_g} \alpha_{m,g}^{MM} IMB_{n,g}(t - \theta_{mng}^{MM}), \quad m = 1..N_m \quad (3.1)$$

где $\alpha_{m,g}^{MM}$ – доля представителей g -й клиентской группы,двигающихся к m -му выходу внутри зоны разграничения «Местная транспортная инфраструктура»:

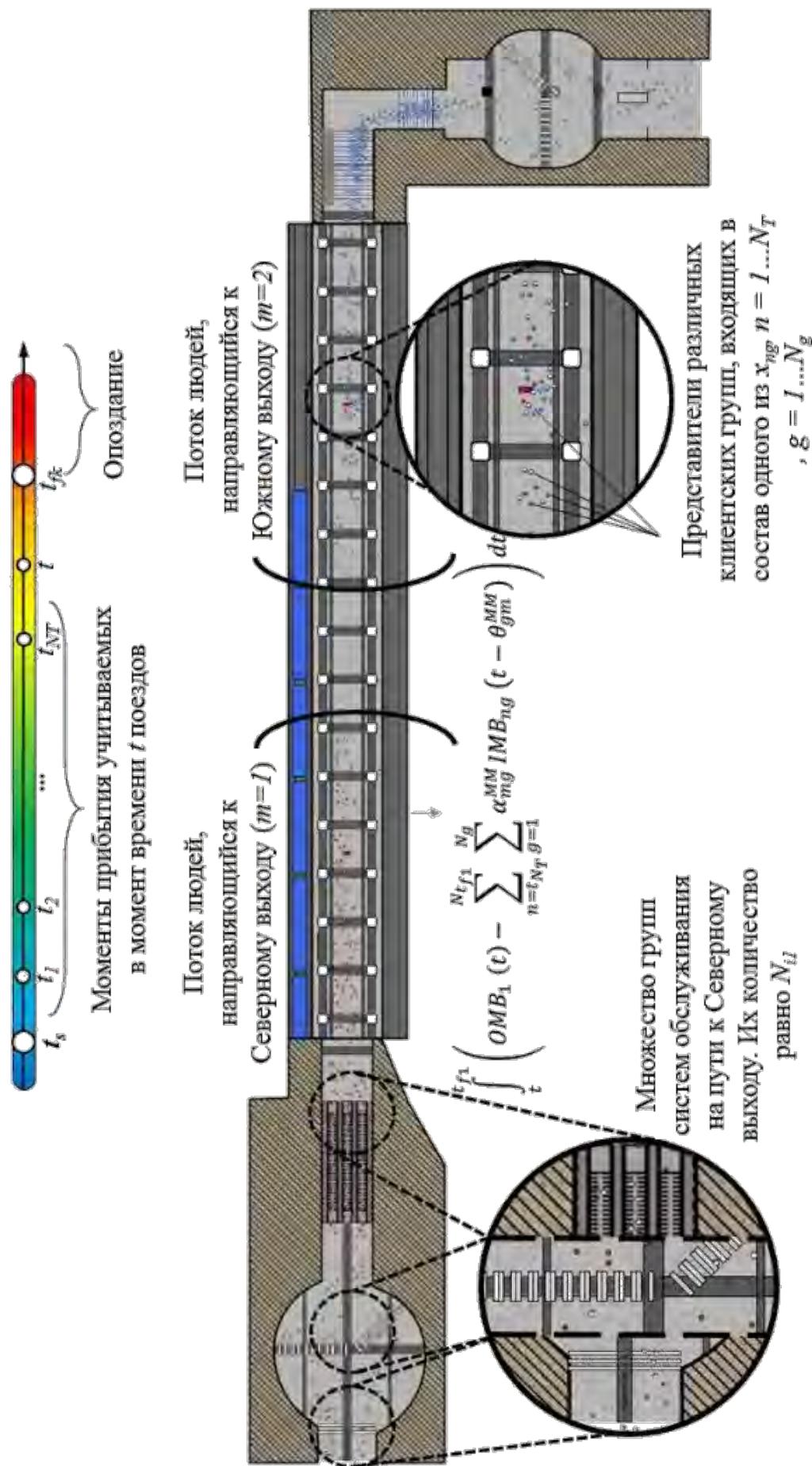


Рисунок 3.2 – Связь между имитационной и математической моделью транспортного узла станции «Спартак» перед началом ККММ

$$\sum_{m=1}^{N_m} \alpha_{mg}^{MM} = 1, \quad g = 1..N_g; \quad (3.2)$$

N_g – количество клиентских групп;

N_{im} – количество систем обслуживания на пути к m -му выходу;

N_m – количество выходов;

N_T – количество рассматриваемых поездов, прибывших до момента времени t : $t_{N_T} \leq t$;

IMB_{ng} – плотность потока представителей g -й клиентской группы на выходе из n -го поезда; она представлена в модели последовательностью прямоугольных импульсов [117] с периодом повторения, равным периоду прибытия поездов, и имеющих амплитуду, определяемую следующим выражением:

$$IMB_{ng}(t) = \begin{cases} \frac{dx_{ng}}{dt} \approx \frac{x_{ng}}{T_n}, & \text{если } t_n \leq t \leq t_n + T_n \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\int_{t_n}^{t_n+T_n} IMB_{ng}(t)dt = x_{ng}, \quad g = 1..N_g; \quad (3.4)$$

x_{ng} – количество представителей g -й клиентской группы, вышедших из n -го поезда.

t_n – время прибытия n -го поезда;

T_n – длительность стоянки n -го поезда.

Плотность пассажиропотока на входе в транспортный узел и на выходе после прохождения систем обслуживания примерно одинакова. Отличие заключается в величине запаздывания функции IMB_{ng} – интервале времени θ_{mng}^{MM} , которое

затрачивается на прохождение всех элементов инфраструктуры и на потерю времени в очередях. Она имеет вид:

$$\theta_{mng}^{MM} = \sum_{i=1}^{N_{im}} (T_{gi} + \tau_{gi}) + \frac{S_{gm}}{V_g} + \delta_g^M \quad (3.5)$$

где S_{gm} – сумма отрезков пути между системами обслуживания участника g -й клиентской группы на пути к m -му выходу;

V_g – скорость движения участника g -й клиентской группы;

i – номер системы обслуживания внутри транспортного узла;

T_{gi} – интервал времени, затрачиваемый участником g -й клиентской группы на прохождение i -й системы обслуживания;

τ_{gi} – интервал времени, затрачиваемый участником g -й клиентской группы на ожидание прохождения i -й системы обслуживания, является функцией величины

$$\sum_{n=0}^{N_T-1 | t_{N_T} \leq t} \sum_{g=1}^{N_g} \alpha_{mg}^{MM} x_{ng}; \quad (3.6)$$

δ_g^M – величина запаздывания, определяемая взаимодействием представителей клиентских групп в зоне разграничения M .

Целью управления в этой зоне разграничения является успешное прохождение маршрута каждым участником пешеходного потока – прибытие на стадион до начала матча, которое требует выполнения следующего неравенства:

$$\sum_{m=1}^{N_m} \int_{t_s}^{t_{fm}} OMB_m(t) dt \geq Y \quad (3.7)$$

где Y – число зрителей, которые планировали добраться до места проведения мероприятия с помощью элементов транспортной инфраструктуры;

t_s – время прибытия первого зрителя;

t_{fm} – момент времени для m -го выхода, после которого зрители не успевают занять свои места до начала матча.

Критерием достижения поставленной цели является минимум опоздавших зрителей:

$$\begin{aligned}
 Crit &= \sum_{m=1}^{N_m} \int_{t_s}^{t_{fm}} OMB_m(t) dt - Y \geq 0, \text{ или} \\
 Crit &= \sum_{m=1}^{N_m} \int_{t_s}^{t_{fm}} OMB_m(t) dt \rightarrow \max
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Достижение поставленной цели реализуется в соответствии с выражением (3.5) при условии $\tau_{gi} \rightarrow 0$, $i = 1..N_{im}$, $g = 1..N_g$. Иначе 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):

$$\begin{aligned}
 &T(x_{ng}, g = 1 \dots N_g, n = 0 \dots N_{T_{fm}} - 1 | t_{N_T} \leq t_{fm}) = \\
 &= \sum_{m=1}^{N_m} \sum_{N_T=1}^{N_{T_{fm}}} \sum_{i=1}^{N_{im}} \sum_{g=1}^{N_g} \tau_{gi} \left(\sum_{n=0}^{N_T-1} \sum_{g=1}^{N_g} \alpha_{mg}^{MM} x_{ng} \right) \rightarrow \min
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

– минимальная длина очередей в момент времени t_{fm} (без учета условий комфортности обслуживания людей) E :

$$\begin{aligned}
& , \Xi \left(x_{ng}, g = 1 \dots N_g, n = 0 \dots N_{T_{fm}} - 1 \mid t_{N_T} \leq t_{fm} \right) = \\
& = \tau_{gi} \left(\sum_{n=0}^{N_{T_{fm}}-1} \sum_{g=1}^{N_g} \alpha_{mg}^{MM} x_{ng} \right) \rightarrow 0 \text{ при } t > t_{fm}, m = 1..N_m, i \\
& = 1..N_{im}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}
& \Xi \left(x_{ng}, g = 1 \dots N_g, n = 0 \dots N_{T_{fm}} - 1 \mid t_{N_T} \leq t_{fm} \right) = \\
& = \sum_{i=1}^{N_{im}} \sum_{g=1}^{N_g} \tau_{gi} \left(\sum_{n=0}^{N_{T_{fm}}-1} \sum_{g=1}^{N_g} \alpha_{mg}^{MM} x_{ng} \right) \rightarrow \min \text{ при } t > t_{fm}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Ограничениями на управление являются:

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

$$OMB_m(t) - OMB_{m \max} \leq 0, m = 1..N_m, \tag{3.11}$$

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

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

$$c_i[n] - c_{\max}[n] \leq 0, i = 1..N_i \tag{3.12}$$

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

Разработаем структурную схему рассматриваемых систем обслуживания [71] [118] [119] [120]. Соответствующая модель системы дискретного времени представлена на Рисунке 3.3. Период дискретизации примем равным интервалу времени, затрачиваемому на прохождение i -й системы обслуживания T_i . На вход системы поступает пешеходный поток плотностью $w_{i-1}[n]$, сформировавшийся на

выходе предыдущей системы обслуживания или в результате комбинации потоков из поездов.

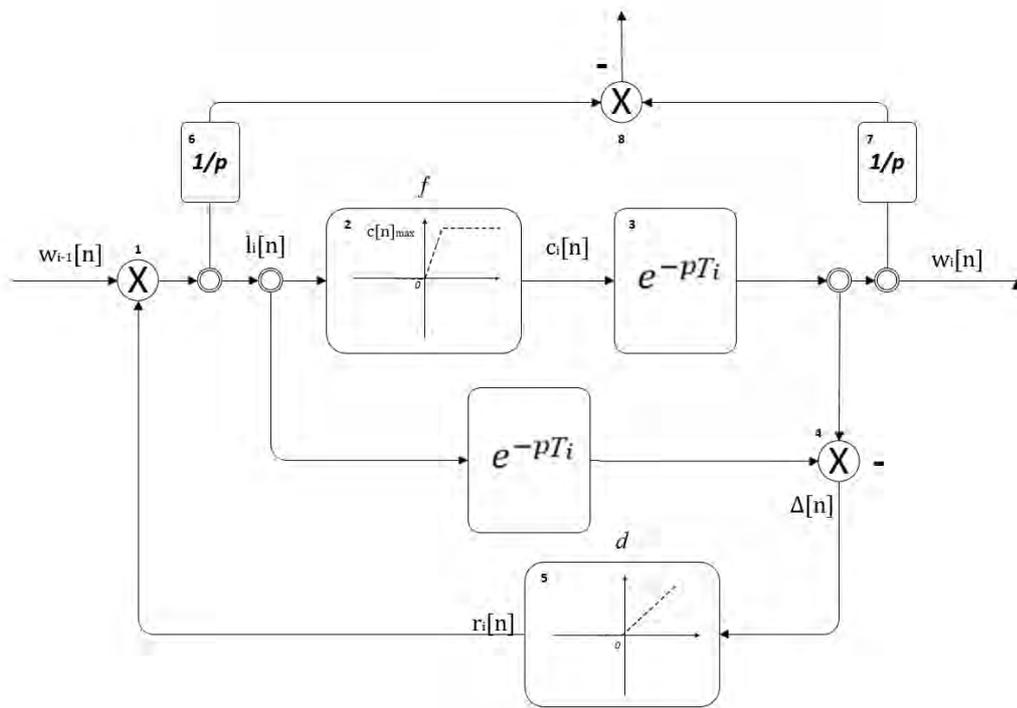


Рисунок 3.3 – Структурная схема модели системы обслуживания

На вход блока 2, представляющего собой нелинейный элемент f с насыщением на уровне $c_{max}[n]$, поступает пешеходный поток, сформированный на выходе сумматора 1. Плотность этого потока определяется по формуле (3.13).

$$l_i[n] = w_{i-1}[n] + r_i[n] \quad (3.13)$$

$r[n]$ – плотность очереди, которая может возникнуть на входе в систему в связи с необходимостью выполнения условия (3.12).

На выходе блока 2 формируется поток с плотностью $c_i[n] = \begin{cases} l_i[n], l_i[n] \leq c_{max}[n] \\ c_{max}[n], l_i[n] > c_{max}[n] \end{cases}$ которая удовлетворяет условию (3.12). Система обслуживания представлена звеном запаздывания 3, с величиной запаздывания, равной интервалу времени, затрачиваемому на прохождение i -й системы обслуживания T_i . Сумматор 4 и нелинейный элемент в блоке 5 позволяют определить плотность людей в очереди, которая может возникнуть из-за

необходимости выполнения условия (3.12) и перехода нелинейного элемента в блоке 2 в режим насыщения.

На выходе сумматора 4 определяется разность между плотностью потока $l_i[n - 1]$, имеющегося на входе системы обслуживания, с учетом запаздывания (после прохождения через блок 10) и потока $w_{i-1}[n]$, имеющего возможность через нее пройти:

$$\Delta_i[n] = l_i[n - 1] - c_i[n - 1] \quad (3.14)$$

Блок 5 служит для парирования возможных отрицательных значений на выходе сумматора 4 в случае резкого уменьшения величины входного потока. Плотность очереди на выходе из блока 5 определяется по формуле:

$$r_i[n] = d(\Delta_i[n]) = \begin{cases} \Delta_i[n], & \text{если } \Delta_i[n] \geq 0 \\ 0, & \text{если } \Delta_i[n] < 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

Интегратор в блоке 6 позволяет определить число людей, которым необходимо пройти через систему обслуживания к текущему моменту времени. Интегратор в блоке 7 позволяет определить число людей, которым удалось пройти через систему обслуживания к текущему моменту времени. Значение на выходе сумматора 8, равное разности между числом людей, которым необходимо пройти через систему обслуживания и которым удалось пройти через систему обслуживания к текущему моменту времени, определяет число людей, стоявших в очереди, является показателем качества функционирования системы и позволяет вычислить значения критериев (3.8) и (3.9).

Учитывая вышеизложенное, плотность потока на выходе из блока 2 можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} c_i[n] &= f(w_{i-1}[n] + r_i[n]) = f(w_{i-1}[n] + d(\Delta_i[n])) \\ &= f(w_{i-1}[n] + d(l_i[n - 1] - c_i[n - 1])) \end{aligned} \quad (3.16)$$

3.3 Математическая модель района мероприятия при прибытии на крупномасштабное культурно-массовое мероприятие

Построим математическую модель района мероприятия (зона последней мили) при прибытии на ККММ. Входами системы являются потоки представителей клиентских групп болельщиков на выходах из транспортной инфраструктуры, либо прибывающие через иные входы в зону разграничения. Выходами системы являются потоки представителей клиентских групп, подходящие к соответствующей входной группе площадки ККММ. В качестве примера такой системы в Разделе 4.2.1 рассмотрена зона последней мили стадиона «Спартак». Рассматривая в качестве ККММ футбольный матч, можно сделать вывод о том, что болельщики прибывают из двух выходов станции «Спартак» и со стороны Волоколамского шоссе. Это иллюстрирует Рисунок 3.4 [71].

Плотность потока представителей клиентских групп, проходящих через сечение в пространстве за единицу времени, через s -ю входную группу $ISB_s(t)$ определяется по формуле (3.17). Буквенные обозначения расшифровываются согласно Таблице 3.2.

$$ISB_s(t) = \sum_{m=1}^{N_m+N_o} \sum_{g=1}^{N_g} \alpha_{smg}^{MS} OMB_m(t - \theta_{smg}^{MS}), \quad s = 1..N_s \quad (3.17)$$

где N_s – количество входных групп на площадке мероприятия;

N_o – количество входов на территорию не из элементов транспортного узла (пешеходные потоки);

α_{smg}^{MS} – доля представителей g -й клиентской группы, двигающихся из m -го выхода местной транспортной инфраструктуры к s -й входной группе, из зоны разграничения M в зону разграничения S ;

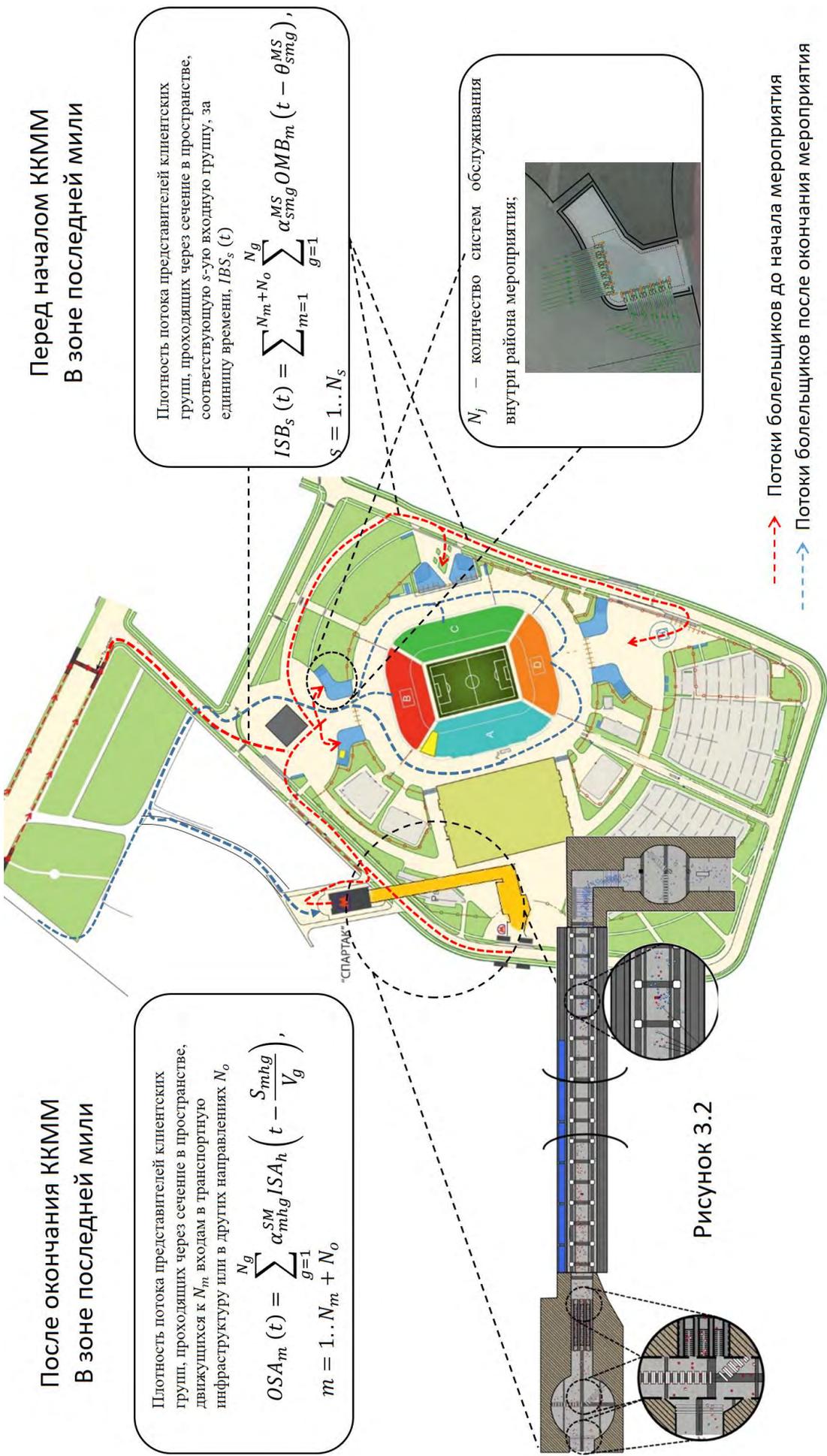


Рисунок 3.4 – Связь между математическими моделями района мероприятия при прибытии на ККММ и по его окончании и схемой района мероприятия на примере стадиона «Спартак»

OMB_m – плотность потока, двигающихся из m -го выхода транспортной инфраструктуры $m = 1 \dots N_m$ – поток из метро, если $m = N_m + 1 \dots N_m + N_o$ не из метро;

$$\int_{t_s^S}^{t_{fs}^S} OMB_m(t) dt = \sum_{g=1}^{N_g} y_{mg} \quad (3.18)$$

t_s^S – время прибытия первого зрителя в зону последней мили;

t_{fs}^S – время прохода последнего зрителя через s -ю входную группу;

y_{mg} – количество представителей g -й клиентской группы, вышедших из m -выхода.

Плотность пассажиропотока при входе в зону разграничения «Район мероприятия» и на выходе из входных групп после прохождения систем обслуживания примерно одинакова. Отличие в величине запаздывания функции OMB_m – времени θ_{smg}^{MS} , которое затрачивается на прохождение всех элементов инфраструктуры и на потерю времени в очередях. Она имеет вид:

$$\theta_{smg}^{MS} = \sum_{j=1}^{N_{jm}} (T_{gj} + \tau_{gj}) + \frac{S_{smg}}{V_g} + \delta_g^S \quad (3.19)$$

где S_{smg} – сумма отрезков пути участника g -й группы от m -й точки попадания из местной транспортной инфраструктуры к s -й входной группе района мероприятия;

j – номер системы обслуживания внутри района мероприятия;

N_j – количество систем обслуживания внутри района мероприятия;

δ_g^S – величина запаздывания, определяемая взаимодействием представителей клиентских групп в зоне разграничения «Район мероприятия».

Плотность потока представителей клиентских групп, проходящих через сечение в пространстве, на h -ю трибуну в зоне разграничения «Район мероприятия»

за единицу времени $OSB_h(t)$. Для стадиона «Спартак», например, $OSB_1(t)$ - плотность потока на Северной трибуне, $OSB_2(t)$ - плотность потока на Южной трибуне, $OSB_3(t)$ - плотность потока на Восточной трибуне, $OSB_4(t)$ – плотность потока на Западной трибуне) определяется по формуле (3.20). Буквенные обозначения расшифровываются согласно Таблице 3.2.

$$OSB_h(t) = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{g=1}^{N_g} \alpha_{hsg}^{SS} ISB_s(t - \theta_{hsg}^{SS}), \quad h = 1..N_h \quad (3.20)$$

где α_{hsg}^{SS} – доля представителей g -й клиентской группы,двигающихся из s -й входной группы к h -й трибуне в зоне разграничения «Район мероприятия»

Плотность пассажиропотока на выходе из входных групп и при входе на трибуны, после прохождения систем обслуживания примерно одинакова. Отличие в величине запаздывания функции ISB_s – времени θ_{hsg}^{SS} , которое затрачивается на прохождение всех элементов инфраструктуры и на потерю времени в очередях. Она имеет вид:

$$\theta_{hsg}^{SS} = \sum_{q=1}^{N_{qm}} (T_{gq} + \tau_{gq}) + \frac{S_{hsg}}{V_g} + \delta_g^h \quad (3.21)$$

где S_{hsg} – сумма отрезков пути участника g -й группы от s -й входной группы к h -й трибуне в зоне разграничения «Район мероприятия»;

q – номер системы обслуживания на стадионе в зоне разграничения «Район мероприятия»;

N_q – количество систем обслуживания на стадионе обслуживания в зоне разграничения «Район мероприятия»;

δ_g^h – величина запаздывания, определяемая взаимодействием представителей клиентских групп на стадионе в зоне разграничения «Район мероприятия».

Целью управления для этой зоны разграничения является успешное прохождение маршрута каждым участником пешеходного потока от района мероприятия до своего места на трибуне, которое требует выполнения следующего неравенства:

$$\sum_{h=1}^{N_h} \int_{t_s^S}^{t_{fh}^S} OSB_h(t) dt \geq G \quad (3.22)$$

где G – число всех зрителей ККММ;

t_{fh}^S – момент времени для h -й трибуны, после которого зрители не успевают занять свои места до начала матча.

Критерием достижения поставленной цели является минимум опоздавших зрителей:

$$Crit = \sum_{h=1}^{N_h} \int_{t_s^S}^{t_{fh}^S} OSB_h(t) dt - G \geq 0, \text{ или} \quad (3.23)$$

$$Crit = \sum_{h=1}^{N_h} \int_{t_s^S}^{t_{fh}^S} OSB_h(t) dt \rightarrow \max$$

Достижение поставленной цели реализуется в соответствии с выражениями (3.19) и (3.21) при условии $\tau_{gj} \rightarrow 0, j = 1..N_{jm}, \tau_{gq} \rightarrow 0, q = 1..N_{qm}, g = 1..N_g$.

3.4 Математическая модель района после завершения крупномасштабного культурно-массового мероприятия

Построим математическую модель пассажиропотока в зоне разграничения «Район мероприятия» после завершения ККММ. Входами системы являются клиентские группы болельщиков, находящиеся на различных трибунах площадки мероприятия (как правило, распределение зрителей между трибунами совпадает с их распределением по клиентским группам болельщиков, учитываемых при построении модели пассажиропотока внутри транспортного узла при прибытии на ККММ). Выходами системы являются потоки людей на входах в местную транспортную инфраструктуру. Например, для стадиона «Спартак» выходами системы являются потоки людей (представителей клиентских групп) к Северному и Южному входам станции «Спартак», а также в других направлениях [71].

Плотность потока представителей клиентских групп, проходящих через сечение в пространстве, соответствующее m -му выходу, за единицу времени, $OSA_m(t)$ определяется по формуле (3.24). Буквенные обозначения расшифровываются согласно Таблице 3.2.

$$OSA_m(t) = \sum_{g=1}^{N_g} \alpha_{mhg}^{SM} ISA_h \left(t - \frac{S_{mhg}}{V_g} \right), \quad m = 1..N_m + N_o \quad (3.24)$$

где α_{mhg}^{SM} – доля представителей g -й клиентской группы,двигающихся из h -й трибуны к m -й точке выхода к местной транспортной инфраструктуре, $m = 1..N_m$ – поток к метро, если $m = N_m+1..N_m + N_o$ не в метро;

ISA_h – плотность потока представителей клиентской группы g -й на выходе из h -й трибуны:

$$\int_{t_e}^{t_e+T_d} ISA_h(t)dt = Z_h \quad (3.25)$$

Z_h – количество зрителей на h -й трибуне;

t_e – время окончания матча;

T_d – время, необходимое для полного освобождения стадиона;

S_{mhg} – сумма отрезков пути участника g -й группы от h -й трибуны к m -му входу в местную транспортную инфраструктуру в зоне разграничения «Район мероприятия».

Целями управления в текущей модели являются:

- минимизация времени освобождения трибун и района мероприятия;
- предотвращение давки на входах на станции метрополитена путем управления длиной очереди;
- успешное прохождение маршрута каждым участником клиентских групп.

Управляющее воздействие в этом случае применяется к плотности потока представителей клиентской группы g на выходе из h -й трибуны и коэффициентам α_{mhg}^{SM} .

Если критерием является отсутствие очереди на входе на станцию метрополитена, то критерий описывается следующим выражением:

$$OSA_m(t) - OSA_{m\max} \rightarrow 0, \quad m = 1..N_m, \quad (3.26)$$

3.5 Математическая модель транспортного узла после завершения крупномасштабного культурно-массового мероприятия

Построим математическую модель пассажиропотока внутри транспортного узла после завершения ККММ. Например, рассматривая ККММ на стадионе «Спартак», входами являются смешанные потоки представителей клиентских

групп, проходящих через сечение в пространстве, соответствующее m -у входу станции метрополитена «Спартак» в зоне разграничения «Местная транспортная инфраструктура». Выходами системы являются потоки людей, сающихся в прибывающие на станцию «Спартак» поезда метрополитена [71].

Плотность потока людей, проходящих через сечение в пространстве, соответствующее m -му входу, за единицу времени, определена по формуле (3.24) в предыдущем пункте.

Плотность людей, убывающих на поездах $IMA(t)$, определяется по формуле (3.27). Буквенные обозначения расшифровываются согласно Таблицы 3.2.

$$IMA(t) = \frac{1}{T_n} \int_{t_{se}}^t \sum_{m=1}^{N_m} OSA_m(t - \theta_{nm}^{MM}) dt - \sum_{n=1}^{N_T | t_{se} \leq t_{N_T} \leq t} u_n, \quad (3.27)$$

где t_{se} – время прибытия первого поезда, на котором начали уезжать посетители;

θ_{nm}^{MM} – величина запаздывания определяет время, которое затрачивается на прохождение всех элементов инфраструктуры и на потерю времени в очередях.

Она имеет вид:

$$\theta_{nm}^{MM} = \sum_{i=1}^{N_{im}} (T_{gi} + \tau_{gi}) + \frac{S_{nm}}{V_0} + \delta_g^M \quad (3.28)$$

где N_{im} – количество систем обслуживания на m -м входе;

S_{nm} – сумма отрезков пути участника пешеходного потока от m -го входа на станцию метрополитена к n -у поезду в зоне разграничения «Местная транспортная инфраструктура»;

V_0 – скорость движения пешеходного потока;

u_n – плотность потока людей на входе в n -й поезд.

В любой момент времени должно выполняться условие отсутствия переполнения платформы станции метрополитена:

$$\int_{t_{se}}^t \sum_{m=1}^{N_m} OSA_m (t - \theta_{nmg}^{MM}) dt - T_n \sum_{n=1}^{N_T | t_s \leq t_{N_T} \leq t} u_n \leq K_{\max} \quad (3.29)$$

где K_{\max} — максимальная вместимость платформы.

Основные выводы и результаты по Главе 3

1. Разработанные математические модели функционирования зон разграничений с учетом наличия в них клиентских групп позволяют решать задачи безопасного планирования и анализа функционирования объектов инфраструктуры.

2. При разработке математических моделей функционирования зон разграничений сформулированы цели управления, частные критерии по достижению цели, ограничения на управление.

3. Проведено исследование объекта во всех зонах разграничения при построении математических моделей, в результате которого представлено формализованное описание клиентских групп пешеходного потока, возникающих в моделируемом пространстве (зонах разграничения), включающее в себя единую систему буквенных обозначений и графическую интерпретацию структурной схемы системы обслуживания, позволяющей решать множество задач планирования транспортных процессов при проведении ККММ в едином информационном пространстве.

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАССАЖИРОПОТОКОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ КУЛЬТУРНО-МАССОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

4.1 Анализ моделей пешеходных потоков и средств имитационного моделирования

При проведении ККММ характерна полная загрузка элементов транспортной инфраструктуры, дефицит пропускных и провозных способностей, поэтому наиболее актуальной становится задача управления транспортной инфраструктурой в период повышенных нагрузок [121]. Эта задача требует разработки соответствующих алгоритмов. Примером транспортного объекта, требующего специализированного управления во время повышенных нагрузок, является станция метрополитена [122], находящаяся вблизи объекта ККММ (стадион, музей, концертный зал и т.д.). При этом определение и прогнозирование качества работы элементов транспортной инфраструктуры, организацию пешеходных потоков и навигации эффективно выполнять на имитационных моделях [101].

Международный опыт показывает [123], что моделирование пассажиропотоков [124] и режимов работы транспортной инфраструктуры является неотъемлемой частью не только на этапе планирования ККММ, но и при подготовке предпроектных и проектных решений сооружений и объектов инфраструктуры (стадионов, ТПУ, торговых центров и т.д.). Ключевая цель разработки таких моделей – обеспечение безопасности и комфорта для посетителей ККММ [125].

Транспортное обеспечение ККММ представляет собой совокупность пассажирских систем различных видов транспорта, которыми пользуются участники ККММ [126]. Качество функционирования этих систем зависит от эффективности организации транспортных процессов, взаимодействия этих систем между собой и с объектами сторонней инфраструктуры.

Помимо функционирования объектов транспортной инфраструктуры необходимо моделировать пассажиропотоки зрителей, прибывающих и отбывающих с ККММ.

В ходе исследования были проанализированы работы, описывающие как различные модели пешеходных потоков, так и модели функционирования транспортных объектов. Поведение пешехода внутри потока базируется на:

- радиусе личного пространства пешехода;
- векторе скорости движения пешехода.

Выделяют 3 радиуса зоны личного пространства пешехода, от которых зависит его скорость движения [10] [5] [11]. В каждый момент времени участник пешеходного потока имеет три альтернативы по отношению к выбору абсолютного значения своей новой скорости: сохранить текущую скорость, увеличить ее или уменьшить при большем или меньшем радиусе личного пространства соответственно. При возникновении «давки» радиус личного пространства человека сильно уменьшается, что в состоянии спровоцировать возникновение паники. В следствии этого он стремится расширить свое личное пространство, что приводит к возникновению эффекта «турбулентности» толпы. В работе [11] представлена модель, позволяющая исследовать динамику перемещения агентов с учетом «эффекта толпы» при различных сценариях, в частности, в условиях экстремальных ситуаций при наличии эффектов «давки» и «турбулентности». Для того, чтобы не допустить эффект «турбулентности» необходимо поддерживать как можно больший радиус личного пространства вокруг пешехода.

Особый интерес к моделированию движения пешеходных потоков появился в конце 80-х – начале 90-х годов прошлого века, когда в результате изучения последствий различных технологических катастроф и аварий были выявлены конструктивные недостатки в объектах инфраструктуры [90] [123]. По стандартам эти конструкции удовлетворяли требованиям проверок, однако при нестандартных режимах функционирования выявлялись недостатки, приводившие к авариям (анализ представлен в Главе 1). В этот момент стало понятно, что необходимо моделировать пешеходные потоки, передвигающиеся внутри объекта

инфраструктуры, и рассматривать их поведение как в обычных, так и в критических ситуациях.

На сегодняшний день на практике применяются модели, множество которых представлено на Рисунке 4.1 [42].

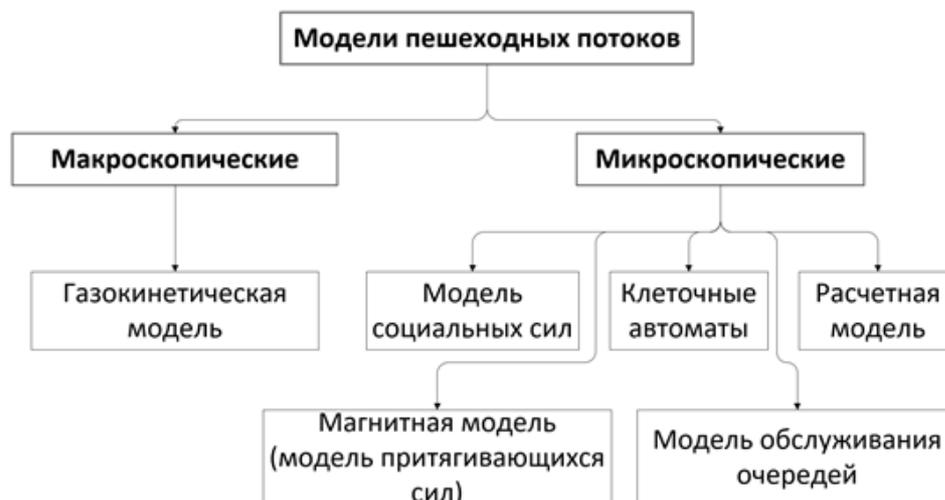


Рисунок 4.1 – Множество моделей пешеходных потоков

Модели пешеходных потоков разделяют на макроскопические, в которых рассматривается движение потока в целом, не выделяя в нем отдельных участников, и микроскопические, где поведение каждого пешехода моделируется в отдельности [45].

Газокинетическая модель основана на том, что у пешеходной динамики есть некоторые очевидные общие черты с жидкостями, например, процесс преодоления препятствий пешеходным потоком можно сравнить с обтеканием жидкостью препятствия. Такая модель является идеализированной и не может применяться при анализе функционирования транспортной инфраструктуры, так как не рассматривается взаимодействие участников пешеходного потока, которые могут иметь различные характеристики [127]. Кроме того, рассматривалось физическое моделирование и моделирование электрических систем [128] [129] [130] [131].

Магнитная модель или модель притягивающихся сил является микроскопической непрерывной моделью [132]. В ней участники пешеходного потока и препятствия на их пути несут положительный заряд, а в месте куда стремятся пешеходы сконцентрирован отрицательный заряд. При этом на каждого

пешехода воздействуют две силы: сила, аналогичная силе взаимодействия разноименных электрических зарядов, определяемой законом Кулона, и сила, действующая на пешеходов с целью предотвращения столкновений с другими пешеходами или препятствиями.

В модели обслуживания очередей движение участников пешеходного потока описывается функцией плотности вероятности. После появления в модели они обслуживаются в системах массового обслуживания (СМО) и встают в очередь [106] [133] [134] [135].

Клеточные автоматы [7] [8] [136] представляют рассматриваемое пространство в виде сетки, в каждой ячейки которой может поместиться один представитель пешеходного потока, а движение моделируется переходами между клетками по заданным правилам в зависимости от модели.

Модель социальных сил основывается на Ньютонской механике [42], а побуждения и влияние на участников пешеходного потока описываются различными силами. Их сумма описывает перемещение и направление движения пешехода. Работы, с помощью которых получены результаты, нашедшие практическое применение, основаны именно на математическом аппарате модели социальных сил [132] [4] [33] [41] [137].

Расчетные модели опираются на статистические данные, полученные по результатам практических экспериментов. На их основе составляются таблицы зависимости параметров эксперимента, пешеходного потока и размеров помещения. В качестве примера модели можно рассмотреть ГОСТ 12.1.004-91 [138].

На Рисунке 4.2 представлены графические иллюстрации рассмотренных моделей.



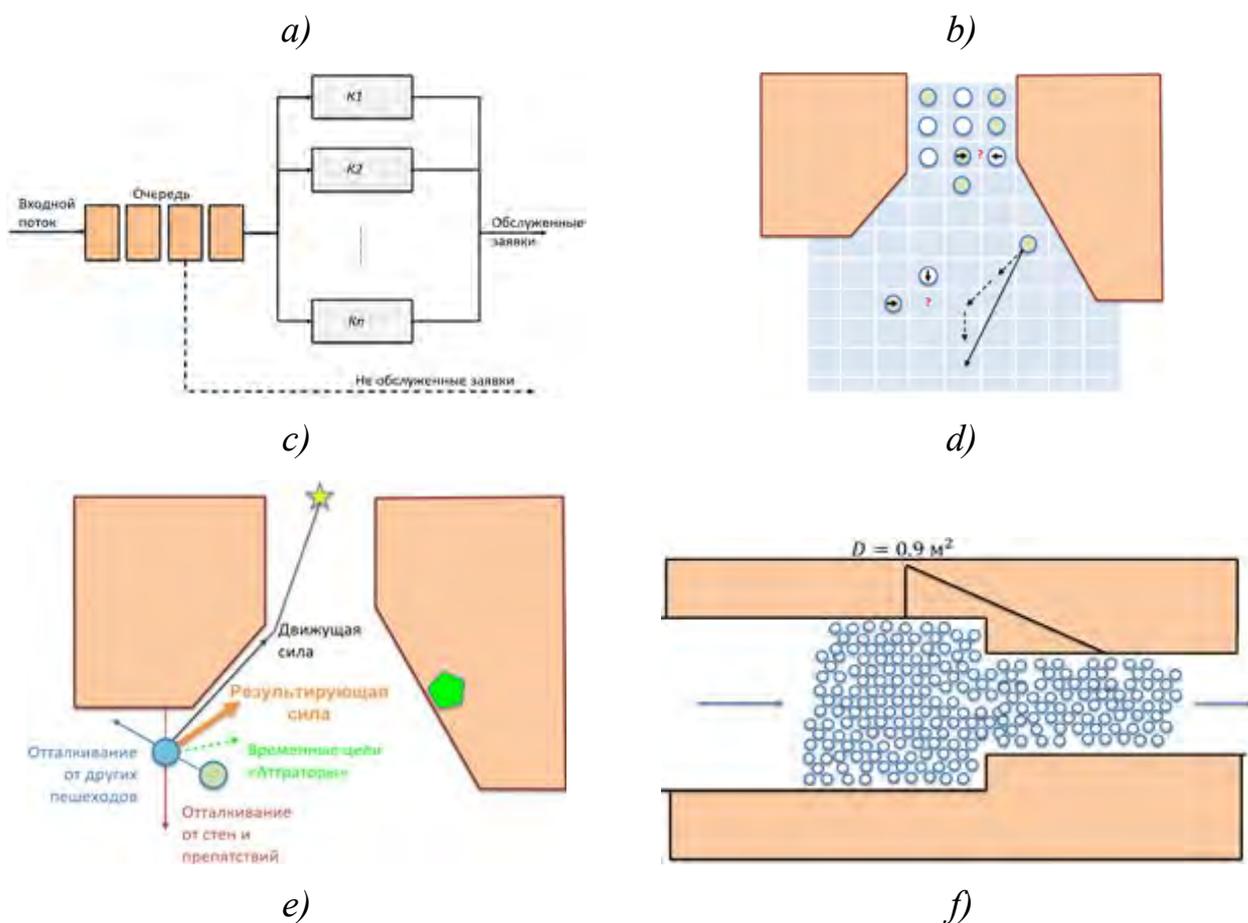


Рисунок 4.2 – Модели пешеходных потоков

a) газокINETическая модель; b) модель притягивающих сил; c) модель обслуживания очередей; d) клеточные автоматы; e) модель социальных сил; f) расчетная модель

Модель пешеходного потока ложится в основу реализации моделей пешеходных маршрутов и пассажиропотоков в подсистеме моделирования АСРП, структура которой разработана в Главе 2.

Преимущества и недостатки рассмотренных моделей пешеходных потоков представлены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Преимущества и недостатки моделей пешеходных потоков

Модель пешеходного потока	Преимущества	Недостатки
ГазокINETическая модель	<ul style="list-style-type: none"> – простота реализации; – высокая скорость работы; – возможность проверки на масштабной модели. 	<ul style="list-style-type: none"> – низкая детализация модели, так как не рассматривается взаимодействие участников

		пешеходного потока, только поток в целом; – проблемы с интерпретацией результатов при низкой плотности пешеходного потока.
Магнитная модель	– простота реализации; – высокая скорость работы.	– невозможно индивидуализировать участника пешеходного потока; – невозможно задать иную линию поведения, учитывая такие события как давку, панику, чрезвычайные ситуации и т.д.
Модель обслуживания очередей	– простота реализации; – высокая скорость работы.	– используется только при исследовании СМО.
Модель клеточных автоматов	– простота реализации; – высокая скорость работы; – высокая степень калибровки.	– невозможно индивидуализировать участника пешеходного потока; – необходимо иметь обширные статистические данные.
Модель социальных сил	– возможность индивидуализации участников пешеходного потока; – реалистичные правила и логика движения; – возможность моделирования при давке, панике, чрезвычайных ситуациях и т.д.; – модели, с помощью которых получены результаты, нашедшие практическое применение, основаны на данном математическом аппарате.	– необходимо наличие больших вычислительных ресурсов для работы модели; – низкая скорость работы в больших моделях.
Расчетная модель	– простота реализации;	– зависимость от рассчитанных величин;

		– низкая точность моделирования;
--	--	----------------------------------

Анализ данных Таблицы 4.1 показал, что для решения поставленной задачи наилучшим образом подходит модель социальных сил. Учитывая это, необходимо выбрать систему имитационного моделирования, компоненты которой лягут в основу подсистем моделирования, оценки результатов и визуализации АСРП.

Для реализации процесса, представленного блоком А21 «Выбор системы имитационного моделирования» функциональной модели процесса планирования ККММ (Глава 2), рассмотрены современные программные комплексы, ориентированные как на построение моделей пешеходных потоков, так и моделей объектов транспортной инфраструктуры. Выбор осуществлялся по следующим критериям:

- логический аппарат, лежащий в основе системы (построение модели);
- гибкость системы (персонализация элементов, методов, правил и т.д.);
- возможность комбинирования различных подходов моделирования;
- аналитические возможности системы;
- графические возможности системы;
- информационная поддержка системы;
- производительность системы;
- доступность системы.

Характеристики стандартных систем моделирования [139] [140] [141] [142] [143] представлены в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Характеристика систем имитационного моделирования

Параметр	Стандартные системы моделирования			
	<i>AnyLogic</i>	<i>Arena</i>	<i>Simulink</i>	<i>GPSS-World</i>
Основная область применения	Инструмент для многоподходного имитационного моделирования. Предназначен для построения прогнозов, стратегического планирования, моделирования производств, бизнес-процессов, управления проектами и персоналом.	Система моделирования, позволяющая создавать динамические модели разнородных процессов и систем. Преимущественно используется при моделировании бизнес-процессов, складов в логистике, медицинских исследованиях.	Среда имитационного моделирования, позволяющая строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные. Преимущественно используется для обработки сигналов, моделирования систем управления, финансовых расчетов, производства.	Система моделирования общего назначения, преимущественно используется в образовательных целях. Предназначена для исследования абстрактных объектов, перемещающихся между статическими элементами, в частности СО.
Построение модели	Потоковые и <i>UML</i> диаграммы	Блоки моделирования (модули) и операции (сущности)	Блок-диаграммы в виде направленных графов	Последовательность логических операторов
Язык программирования	<i>AnyLogic (Java)</i>	<i>Siman</i>	<i>MatLab (C)</i>	<i>GPSS</i>
Гибкость системы	+	+	+	-
Комбинирование подходов моделирования	+	+	+	+
Аналитические возможности	– выполнение экспериментов;	– выполнение экспериментов;	– выполнение экспериментов;	– выполнение экспериментов;

	<ul style="list-style-type: none"> – оптимизация; – графики и диаграммы; – интеграция с внешними данными; – анализ чувствительности; – метод Монте-Карло; – сценарный анализ. 	<ul style="list-style-type: none"> – оптимизация; – графики и диаграммы; – интеграция с внешними данными; – анализ чувствительности; – метод Монте-Карло; – сценарный анализ. 	<ul style="list-style-type: none"> – оптимизация; – графики и диаграммы; – интеграция с внешними данными; – анализ чувствительности; – метод Монте-Карло; – сценарный анализ. 	<ul style="list-style-type: none"> – оптимизация; – графики и диаграммы; – интеграция с внешними данными; – анализ чувствительности; – факторный анализ (<i>ANOVA</i>).
Графические возможности	<ul style="list-style-type: none"> – анимация в реальном времени (<i>2D/3D</i>); – встроенная библиотека графических объектов; – взаимодействие с анимацией; – импорт из <i>CAD</i>-инструментов. 	<ul style="list-style-type: none"> – анимационная система <i>Cinema Animation</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> – дополнительный модуль <i>Simulink 3D Animation</i> – анимация в реальном времени (<i>2D/3D</i>); – взаимодействие с анимацией; – импорт из <i>CAD</i>-инструментов. 	<ul style="list-style-type: none"> – блок-схемы; – статичные изображения.
Информационная поддержка	<ul style="list-style-type: none"> – руководство пользователя; – учебные пособия; – обучающие курсы; – тренинги на сайте; – информационный портал; 	<ul style="list-style-type: none"> – руководство пользователя; – учебные пособия; – обучающие курсы; – тренинги на сайте; – форум. 	<ul style="list-style-type: none"> – руководство пользователя; – учебные пособия; – обучающие курсы; – тренинги на сайте; – форум. 	<ul style="list-style-type: none"> – руководство пользователя; – учебные пособия; – форум.

	<ul style="list-style-type: none"> – форум; – библиотека академических статей; – открытая библиотека моделей. 			
<p>Доступность системы</p> <p><i>(лицензионная политика разработчиков может измениться, информация о ценах представлена справочно)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – 355900 руб. за 1 профессиональную лицензию – 21500 руб. за 1 университетскую лицензию; – пробные лицензии (60 дней); – бесплатная лицензия (студенческая). 	<ul style="list-style-type: none"> – от 1000\$ до 20000\$ за 1 профессиональную лицензию (в зависимости от доступных модулей); – от 100\$ за 1 университетскую лицензию; – пробные лицензии (30 дней). 	<ul style="list-style-type: none"> – от 6000 руб. (в зависимости от доступных модулей); – пробные лицензии (30 дней). 	Бесплатно.

Помимо стандартных систем моделирования общего назначения существуют специализированные системы моделирования, разработанные с использованием стандартных программных средств для решения узкого круга задач. Например, в работе [49] рассматриваются принципы построения, основные достоинства и свойства многофункциональных комплексных моделей систем управления. Эффективность этих моделей заключается в возможности сравнения и выбора различных технических и технологических решений на стадии формирования технического задания с целью выбора лучшего решения на базе проведения имитационных экспериментов. Эти модели являются основой различных средств автоматизации управления движением поездов метрополитена:

- автоматизированная система оперативного диспетчерского управления движением поездов [60] [144] [145];
- тренажер поездного диспетчера линии метрополитена [56] [146];
- автоматизированной системы энергооптимальных тяговых расчетов [57] [58] [147] [148];
- автоматизированной системы построения плановых графиков движения пассажирских поездов [73] [149] [150] [151] [152] [153] [154];
- автоматизированной системы оценки эффективности использования рекуперативного торможения на электроподвижном составе метрополитена и накопителей энергии [58] [59] и др.

Учитывая то, что в зависимости от модели зоны разграничения ККММ необходимо использовать различные подходы моделирования (например, моделировать движение поездов с помощью дискретно-событийного подхода, а модель пешеходного потока с помощью агентного моделирования), расширенный функционал и множество аналитических инструментов, автором сделан вывод о том, что наиболее подходящей средой моделирования для решения поставленной задачи является программный продукт *AnyLogic*. Модель пешеходного потока в этой системе основывается на модели социальных сил, которая наилучшим образом подходит для решения поставленной задачи.

Кроме того, работы [137], результаты которых нашли практическое применение, реализованы с помощью *AnyLogic*. Лицензионная политика разработчика единственная среди рассмотренных систем моделирования позволяет использовать бессрочную студенческую версию безвозмездно, а при проведении углубленных исследований воспользоваться временной усовершенствованной лицензией.

AnyLogic является одной из самых гибких и относительно доступных в использовании систем имитационного моделирования, которая поддерживает на единой платформе наиболее прогрессивные подходы к имитационному моделированию. В данной системе реализован базовый язык непрерывного моделирования на основе языка программирования *Java*. Моделируемая система графически представлена *UML*-диаграммами, что позволяет оптимизировать ее структуру.

В качестве основного инструмента разработки использовалась пешеходная библиотека *Pedestrian Library*. В ней реализована возможность моделирования пешеходных потоков в «физической» окружающей среде (пространстве). Благодаря визуализации, возможно проанализировать взаимодействие пешеходов с окружающими их объектами инфраструктуры (стены, эскалаторы, турникеты и т.д.), возможными столкновениями с препятствиями и другими пешеходами.

Участники пешеходного потока имеют индивидуальные свойства (атрибуты), предпочтения и состояния, передвигаются согласно заданным правилам – в основе заложена модель социальных сил. Соответственно при создании моделей возможно учесть различные модели поведения клиентских групп болельщиков, их возможное взаимодействие, персональную скорость передвижения, ее зависимость от числа пассажиров, рассматривать поток болельщиков неоднородным.

В Приложении А представлено описание элементов, задействованных при разработке моделей объектов инфраструктуры, логики движения участников пешеходного потока, пешеходных маршрутов движения, выборе критериев качества и при анализе результатов моделирования в подсистемах оценки и

визуализации АСРП в блоках А22-А24, А31-33 функциональной модели процесса планирования ККММ, представленной в Главе 2 на Рисунках 2.5-2.6.

Модели, разработанные с помощью пешеходной библиотеки, поддерживают разнообразные элементы статистики. Возможно создать графики интенсивности пассажиропотоков в рассматриваемых областях модели, структуры пассажиропотока, графики загруженности систем обслуживания, диаграммы распределения и графики плотности пассажиропотоков в рассматриваемых областях модели, диаграммы распределения значений времен нахождения агентов в модели для каждой клиентской группы, статистики плотности движения в рассматриваемых областях модели.

Наличие соответствующей информации поможет оценить качество работы СМО с ограничениями по загруженности, определить длину простаивания в рассматриваемых областях модели, обнаружить потенциальные проблемы, связанные с внутренней геометрией объекта или пешеходных коридоров, определить целевые значения ключевых показателей (скорость движения, время в пути и т.д.), сформулировать цель управления системой, критерии достижения цели и ограничения на управление системой.

Для создания наиболее реалистичной модели, сбора статистики, работы с внешними данными, создания навигации, элементов управления, и т.д. необходимо воспользоваться функциями вероятностных распределений, произвести вычисления выражений и проверку условий, анализирующих значения свойств различных объектов, использовать нестандартную структуру и источники данных, разработать соответствующие алгоритмы. Все это возможно при использовании внутреннего языка сценариев для *AnyLogic*, основанного на *Java* и соответствующих элементов. Описание дополнительных средств моделирования, используемых в подсистемах анализа и визуализации АСРП представлено в Приложении А.

4.2. Построение имитационной модели зон разграничения при прибытии на крупномасштабное культурно-массовое мероприятие и проведение экспериментов

Математические модели, построенные в Главе 3, проанализированы с помощью средства имитационного моделирования *AnyLogic*. Согласно Таблице 3.1 построены имитационные модели зон разграничения «Местная транспортная инфраструктура» и «Район мероприятия» (зона последней мили) перед началом и после окончания ККММ. В качестве объектов моделирования рассмотрены стадион «Спартак» - перед началом мероприятия и стадион «Лужники» - по окончании мероприятия.

Разработанные имитационные модели зон разграничения являются динамическими, работают как в реальном, так и в модельном времени. В моделях используется дискретное равномерное распределение при определении значений скоростей агентов, выборе систем обслуживания и времени обслуживания системами. При моделировании объектов инфраструктуры учтен их реальный размер и характеристики.

Перед проведением имитационных экспериментов по исследованию зон разграничения при прибытии на ККММ реализуем процессы А13 «Определение задействованных зон разграничения» и А14 «Определение объектов инфраструктуры, включая определение характеристик обслуживания участников пешеходного потока» функциональной модели планирования ККММ.

Стадион «Спартак» построен в 2014 году специально к ЧМ 2018 и принял 5 матчей турнира. Он расположен на северо-западе Москвы в районе бывшего Тушинского аэродрома, что можно видеть на Рисунке 4.3.

Из-за природного ландшафта проход к арене возможен только со стороны Волоколамского шоссе (северная сторона). Исходя из этого посетители прибывают и убывают с мероприятия только в одном направлении, что создает повышенную нагрузку на транспортную инфраструктуру. На территории вокруг стадиона (зона разграничения «Район мероприятия») расположена станция метрополитена

«Спартак» (местная транспортная инфраструктура), 3 входные группы и административные здания. Перед западной входной группой разбит сквер и стадионная площадь, куда прибывает подавляющее большинство болельщиков. Характеристика стадиона представлена в Таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Характеристика стадиона «Спартак»

Параметр	Значение
Вместимость (чел.)	44 190
Количество трибун (ед.)	4
Вместимость трибуны (чел.)	<i>A</i> (Западная) – 4980, <i>B</i> (Северная) – 11800, <i>C</i> (Восточная) – 15610, <i>D</i> (Южная) – 11800.
Количество турникетов (ед.)	150
Количество входных групп (ед.)	3
Вместимость парковки (ед.)	7 500
Полное время выхода (мин.) / время эвакуации (мин.)	15-20 / 8-10

В качестве внешней транспортной инфраструктуры следует рассматривать Таганско-Краснопресненскую линию Московского метрополитена, на которой расположен стадион. Она считается одной из самых загруженных [155], среднесуточный пассажиропоток составляет около 1,5 миллиона человек. В непосредственной близости от комплекса находится станция метрополитена «Тушинская», железнодорожная станция «Тушино» (Рижская ж/д) и автобусные маршруты №№ 88, 210, 266, 456, 614, 930. Схема транспортной инфраструктуры в районе арены представлена на Рисунке 4.3.

Пассажиропоток в разработанной модели (имитационная модель №1), рассматривается как неоднородный и содержит в себе 6 клиентских групп болельщиков, что позволяет реализовать процессы в блоках A12 «Определение состава и характеристик клиентских групп ККММ» и A23 «Разработка логики движения пешеходных маршрутов» функциональной модели.

Для отражения различных моделей поведения представителей клиентских групп, опишем каждую из них в виде кортежа:

$$g_i = (M; T; S; V_o; V; G; R), i = 1 \dots N_g \quad (4.1)$$

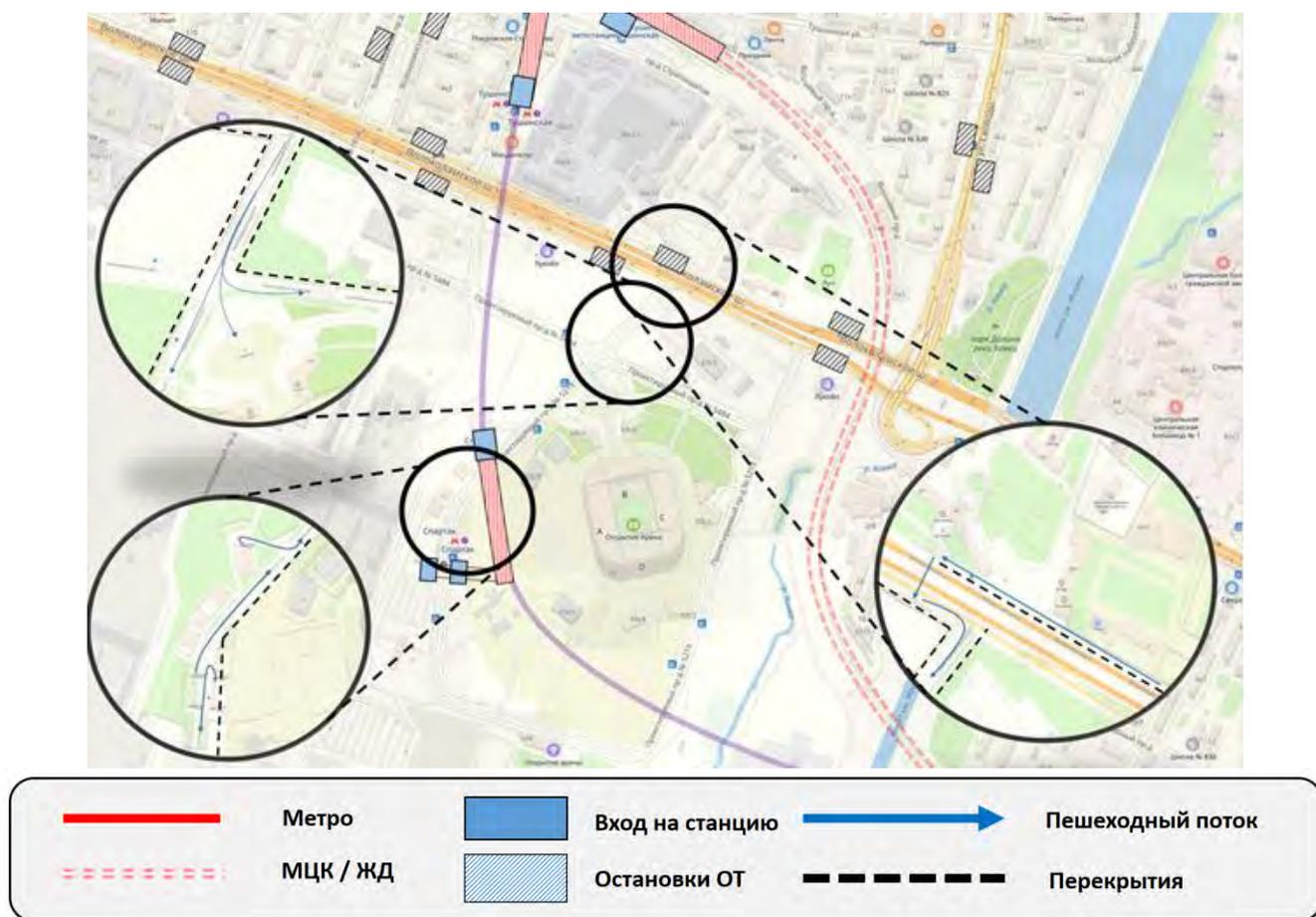


Рисунок 4.3 – Схема транспортной инфраструктуры и оцепления в районе стадиона «Спартак»

где M – количество представителей клиентской группы. Значения данного параметра изменяются в зависимости от каждого конкретного мероприятия. Можно посчитать предельные значения для каждой клиентской группы, зная значения параметра T ;

T – трибуна стадиона, к которой следует болельщик. Значения данного показателя зависят от конкретной площадки мероприятия, вместимость каждой трибуны определена генеральным планом стадиона. Например, активные болельщики домашней команды g_3 всегда располагаются на одной из трибун (Западной (З), Восточной (В), Северной (С) или Южной (Ю)) за воротами, в данном случае Северной, болельщики g_4 – на части противоположной трибуны (Южной);

S – геометрический размер представителя клиентской группы; Принято решение, что значение данного параметра для клиентских групп g_3, g_4 больше, чем

для остальных болельщиков. Это сделано для того, чтобы подчеркнуть иную модель поведения в толпе, часто связанную с повышенной агрессивностью;

V – скорость движения болельщика. Обозначается скорость движения болельщика на свободном пространстве. Принято решение о том, что скорость болельщиков клиентских групп g_3, g_4 выше скоростей остальных болельщиков. Это сделано для того, чтобы подчеркнуть иную модель поведения в толпе, часто связанную с повышенной агрессивностью. В модели из-за высокой плотности пассажиропотока при выходе на станцию задается начальная скорость, отличная от нормальной скорости. При попадании на свободное пространство скорость движения увеличивается;

G – склонность агента к движению в группе. Болельщики клиентских групп g_3, g_4 в основном перемещаются группами по несколько человек.

R – взаимодействия с другими агентами [71] [101]. Параметр отражает возможность проявления агрессии к другим представителям пешеходного потока.

В Таблице 4.4 представлена характеристика клиентских групп болельщиков. Параметр M взят для стадиона «Спартак», значения остальных параметров получены с помощью натуральных экспериментов, выполненных в ходе исследования.

Таблица 4.4– Характеристики клиентских групп $g_i = (M, T, S, V, G, R)$

Клиентская группа	Значения кортежа
Болельщики домашней команды, (g_1)	(17000; 3/В; 0,6; 0,9/1; 0; 0)
Болельщики гостевой команды, (g_2)	(10000; В; 0,6; 0,9/1; 0; 0)
Активные болельщики домашней команды, (g_3)	(10000; С; 0,75; 0,9/1,25; 1; 1(g_4))
Активные болельщики гостевой команды, (g_4)	(5000; Ю; 0,75; 0,9/1,25; 1; 1(g_3))
Нейтральные зрители, (g_5)	(2000; 3/В; 0,6; 0,7/1,0; 0; 0)
Официальные лица, (g_6)	(1000; А; 0,6; 0,7/1,0; 0; 0)

Отдельное внимание стоит обратить на атрибуты G и R , которые принимают только 2 возможных значения «Истина» (= 1) и «Ложь» (= 0), т.е. являются логическими атрибутами. Перемещаясь в группах и имея большую скорость движения (атрибут V), болельщики клиентских групп g_3, g_4 пронизывают пешеходный поток насквозь, что влияет на общие характеристики потока. При

возникновении конфликтных ситуаций или беспорядков этот факт следует учитывать правоохранительным органам. Находясь в группе, нарушители становятся агрессивными и могут сопротивляться задержаниям.

Значение 1 атрибута R говорит о вероятном проявлении агрессии к представителям соответствующей клиентской группы, указанной в скобках. При движении в одном пешеходном потоке или пересечении маршрутов движения клиентских групп болельщиков g_3, g_4 высоко вероятны конфликтные ситуации. Так как болельщики этих клиентских групп перемещаются в группах, единичные конфликты тут же перерастут в массовые беспорядки. Исходя из этого, обязательными условиями при планировании ККММ являются разведение пешеходных маршрутов соответствующих клиентских групп и невозможность их нахождения на соседствующих трибунах [156].

В имитационной модели различия в поведении представителей клиентских групп, а, следовательно, и параметров соответствующих кортежей, отражается путем изменения значений атрибутов соответствующих агентов. Представители клиентских групп изображены в виде кругов соответствующего диаметра разных цветов, что нашло отражение на Рисунке 4.4.

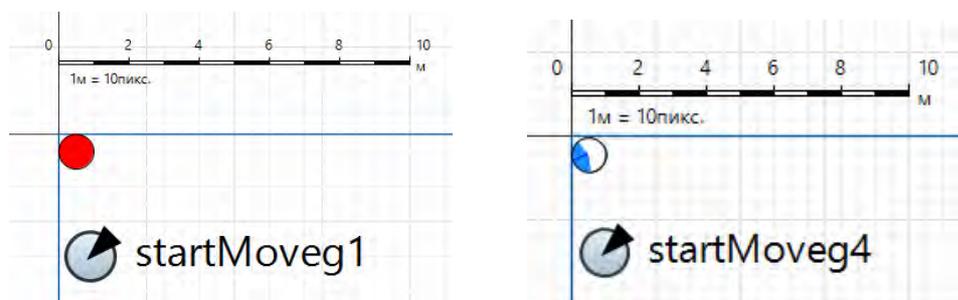


Рисунок 4.4 – Пример изображения представителей клиентских групп

Представители клиентских групп имеют различные модели поведения, описанные в Разделе 1.3, и, соответственно, различный атрибутивный состав. В модели задаются комфортная и начальная скорости движения, диапазоны значений и закон распределения, склонность к перемещению в группе. Диалоговое окно меню параметров пешехода, относящегося к клиентской группе g_2 (болельщики гостевой команды), представлено на Рисунке 4.5.

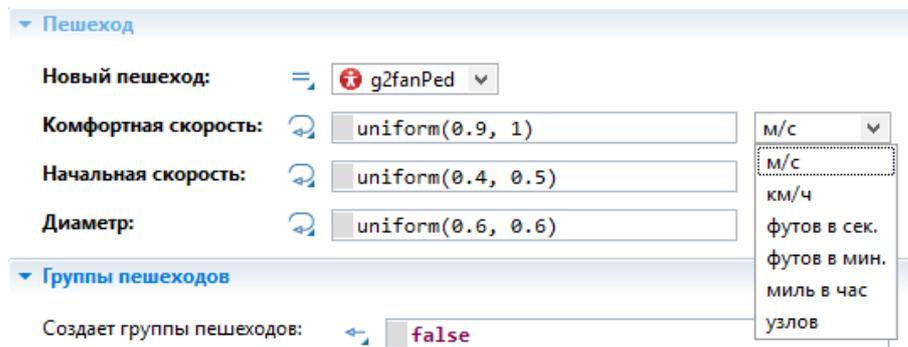


Рисунок 4.5 – Меню параметров пешехода

Логика работы имитационной модели №1, разработанной в ходе выполнения процессов в блоках А22 «Разработка модели объектов инфраструктуры» и А23 «Разработка логики движения и пешеходных маршрутов» представлена на Рисунке 4.6. В верхней части рисунка представлена логика модели при прибытии клиентских групп болельщиков на станцию «Спартак» (местная транспортная инфраструктура), в нижней при движении в зоне разграничения «Район мероприятия» после выхода из метро с учетом прибытия зрителей пешком от Волоколамского шоссе. Различие этих моделей заключается в том, что в первой происходит смешивание клиентских групп в соответствии с моделью, разработанной в п. 3.2, а во второй – разделение в соответствии с моделью, разработанной в п. 3.3.

В Приложении В приведено описание объектов разработанной модели согласно блоку А22 функциональной модели планирования ККММ.

Реализуем блок А31 «Моделирование ККММ и проведение имитационных экспериментов» функциональной модели планирования ККММ. По результатам натурных наблюдений болельщики начинают прибывать на стадион в среднем за 2 часа до начала матча [157]. Из-за географического расположения стадиона большинство добирается с помощью метрополитена до станции «Спартак», преимущественно на поездах, следующих из центра. Моделирование появления таких болельщиков определяется плановым графиком движения пассажирских поездов метрополитена (ПГД ППМ) Таганско-Краснопресненской линии. Остальные болельщики попадают на площадь перед стадионом, приходя со стороны Волоколамского шоссе.

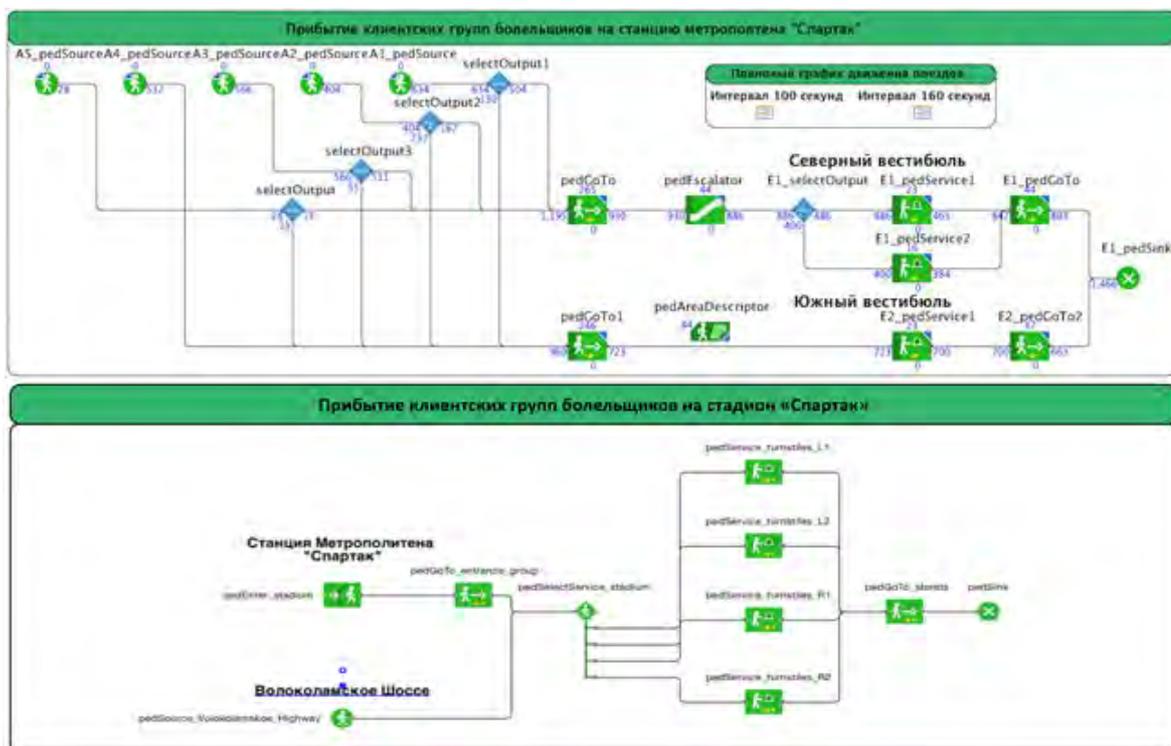


Рисунок 4.6 – Логическая структура работы имитационной модели №1.

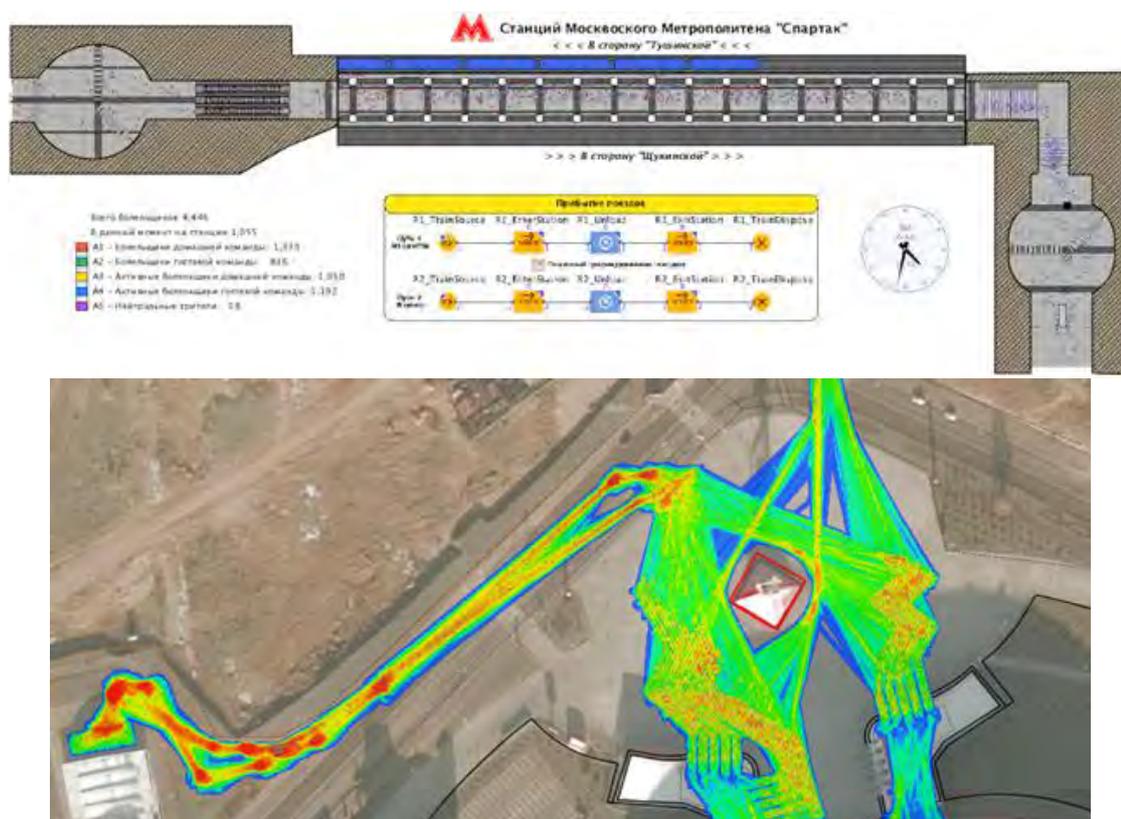
Моделирование начинается в 16:00 модельного времени, так как доступ на стадион открывается за 2 часа до начала мероприятия (18:00) и соответственно именно к этому времени прибывают первые болельщики [101]. Время моделирования составляет 2 часа 30 минут. Фрагмент анимации имитационной модели №1 представлен на Рисунке 4.7.

Рассмотрим процесс, исполняемый подсистемой моделирования АСРП (блок А3). В первый час на стадион прибывает большинство активных болельщиков гостевой команды (g_4). Они делают это заранее, так как им необходимо подготовить шоу-программу (перформанс) и согласовать ее с правоохранительными органами. Пассажиропоток составляет примерно 15 000 человек/час. Пик нагрузки приходится на промежуток с 17:30 до 17:50. В этот момент пассажиропоток характеризуется крайне высокой плотностью, станция работает на пределе возможностей. Некоторые болельщики опаздывают к началу матча, поэтому моделирование происходит до 18:30.

С 2016 года Таганско-Краснопресненскую линию метрополитена обслуживают составы, состоящие из 8-и вагонов типа «81-765/766/767 «Москва». Номинальная и максимальная вместимость определяются по стандарту ГОСТ Р

50850-96 «Вагоны метрополитена. Общие технические условия», согласно которому в расчет берется количество сидящих пассажиров и стоящих пассажиров из расчета 5, 8 или 10 человек/м² свободной от сидений площади соответственно, за исключением участков шириной 100 мм от края сидения [158]. Исходя из этого пассажировместимость вагона данного типа равна 181 или 322 человек при плотности 5 человек/м² и 10 человек/м² соответственно.

Динамика прибытия болельщиков в модели задается в табличном виде совместно с расписанием прибытия поездов на станцию (Приложение С). Из Приложения С видно, что даже при пиковых нагрузках на станцию при интервале движения поездов в 100 секунд доля болельщиков от максимальной вместимости поезда не превышает 64% (при плотности 5 человек/м²). В данной модели не учитывается фоновый пассажиропоток до станции «Спартак», так как вблизи стадиона на данный момент отсутствуют иные точки притяжения.



Рисунке 4.7 – Фрагмент анимации имитационной модели №1 (подсистема моделирования, подсистема визуализации АСРП)

Сбор соответствующей статистики о клиентских группах болельщиков в данной модели осуществлялся, опираясь на натурные эксперименты, экспертные

оценки, СКУД стадиона, данные *FIFA*, операционные планы управления перевозками на период проведения ЧМ 2018 в городах участниках и концепцию транспортного обеспечения ЧМ 2018 [102] [103]. Например, опираясь на данные со СКУД соответствующей трибуны можно с высокой точностью определить времена прибытия на стадион болельщиков клиентских групп g_1, g_2, g_3, g_4, g_6 . Соответственно, зная время в пути от станции до стадиона, а также значения времен обслуживания болельщиков в системах обслуживания можно сделать вывод о том, сколько болельщиков той или иной клиентской группы прибыло на соответствующем поезде.

С использованием построенной модели проведены эксперименты, имитирующие различные события, которые могут происходить на станции метрополитена и в зоне последней мили стадиона, т.е. реализующие процессы, исполняемые в блоках А24 «Выбор критериев качества / точек проведения измерений» и А31 «Моделирование ККММ и проведение имитационных экспериментов» функциональной модели планирования ККММ [159].

Для разработки подсистемы оценки данных АСРП и процесса А32 «Анализ результатов моделирования» использованы инструменты описания статистики общей и пешеходной библиотеки. Автором разработаны блоки, описывающие графики интенсивности пассажиропотоков у каждого из выходов, структуры изменяющегося во времени пассажиропотока, графики загруженности турникетов [160], диаграммы распределения и графики плотности пассажиропотоков, диаграммы распределения значений времен нахождения агентов в модели для каждой клиентской группы. На Рисунке 4.8 представлена лицевая панель АСРП, объединяющая разработанные блоки. График «Интенсивность пассажиропотока» отображает количество пешеходов, пересекающих заданную линию в заданном направлении на каждом из выходов со станции в единицу времени. График «Плотность пассажиропотока» отображает плотность пассажиропотока в области перед выходами (граничащими с заданными точками). Аппроксимация кривых из Рисунка 4.8 с использованием линейного усредняющего фильтра представлена в Приложении D.

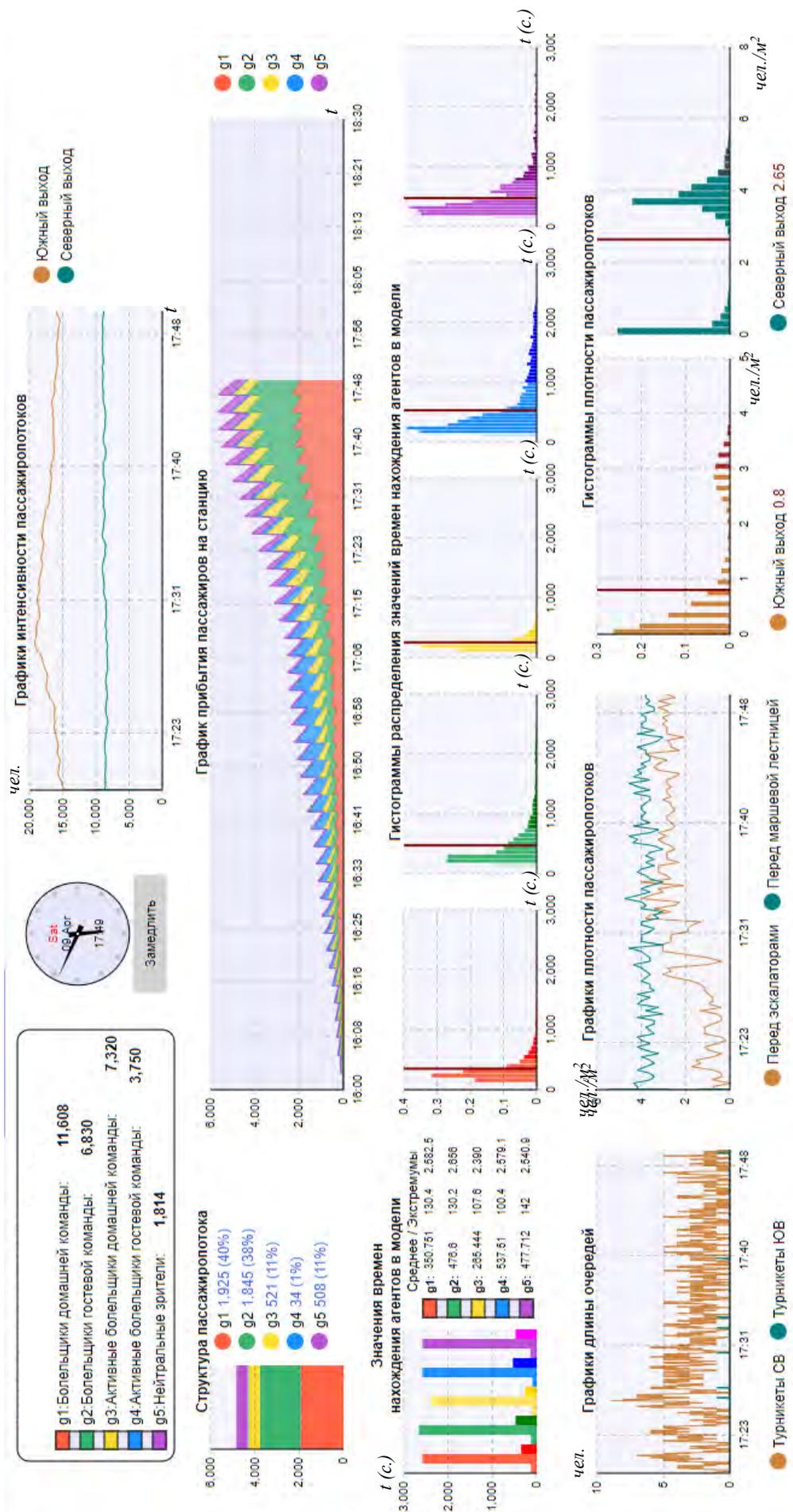


Рисунок 4.8 – Визуализация результатов работы подсистемы оценки данных АСРП (160 секунд)

В ходе реализации процессов, нашедших отражение в блоках А32-А33 функциональной модели планирования ККММ, определено влияние изменений параметров реальных объектов инфраструктуры в модели на значения критериев качества обслуживания ККММ, определенных в методике автоматизированного планирования ККММ, разработанной в Главе 2 диссертации.

Рассмотрим имитационные эксперименты и Таблицу 2.4, где описаны мероприятия по достижению критериев качества мероприятия.

Эксперимент 1.1 – Сравнение интервалов в движении поездов.

В качестве одной из рекомендаций по уменьшению плотности пешеходного потока внутри транспортной инфраструктуры перед началом ККММ предлагается мероприятие Ω_2 «Оптимизация расписания движения транспорта, вывод на линию дополнительных единиц транспорта». Рассмотрим соответствующий эксперимент.

Проведено сравнение плановых графиков движения поездов в рабочие и выходные дни для определения оптимального с точки зрения повышения комфорта посетителей мероприятия (интервал 100 или 160 секунд в движении поездов).

Результаты моделирования показали, что при обоих плановых графиках станция функционирует в нормальном режиме даже с учетом повышенной нагрузки. Можно отметить увеличение плотности пассажиропотоков перед каждым из выходов в интервале с 17:30 до 17:50. Структура пассажиропотока при различных интервалах движения представлена на Рисунке 4.9, где цветом отражены различные клиентские группы.

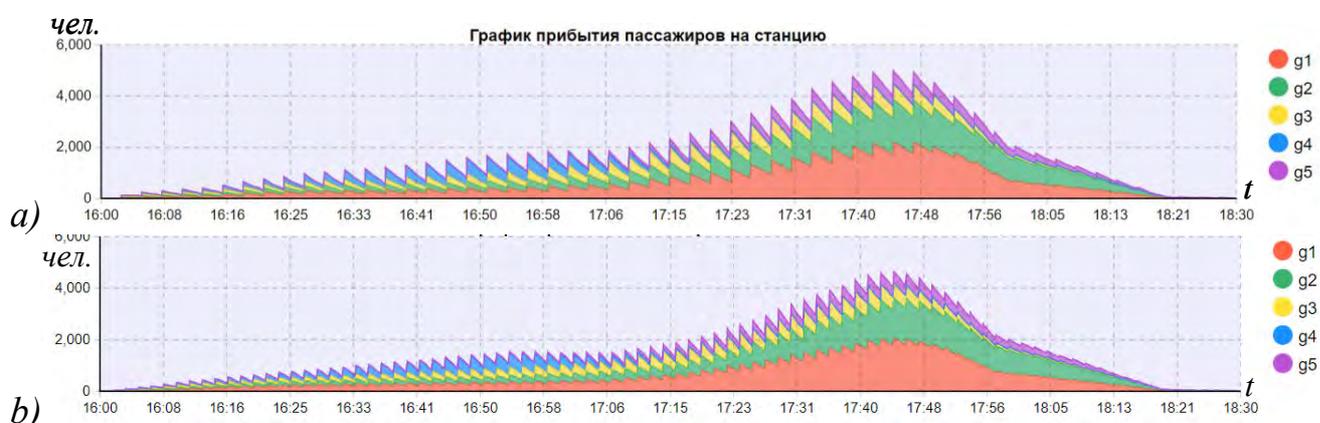


Рисунок 4.9 – Общий график пассажиропотока.

a) интервал 160 секунд b) интервал 100 секунд

Для снижения нагрузки на станцию метрополитена необходимо обеспечить прибытие зрителей на мероприятие, используя максимальное количество видов общественного транспорта. В нашем случае это позволит распределить пешеходный поток на вход со стороны Волоколамского шоссе.

Эксперимент 1.2 – Управление пешеходными потоками.

Для проведения эксперимента 1.2 смоделирована организация ограниченного доступа к выходам со станции для предотвращения давки у эскалаторов и маршевой лестницы путем добавления барьеров безопасности между 3-мя первыми и последними колоннами на платформе и организация пешеходных коридоров у выходов с платформы (рисунок 4.10) – это соответствует рекомендации Ω_7 .

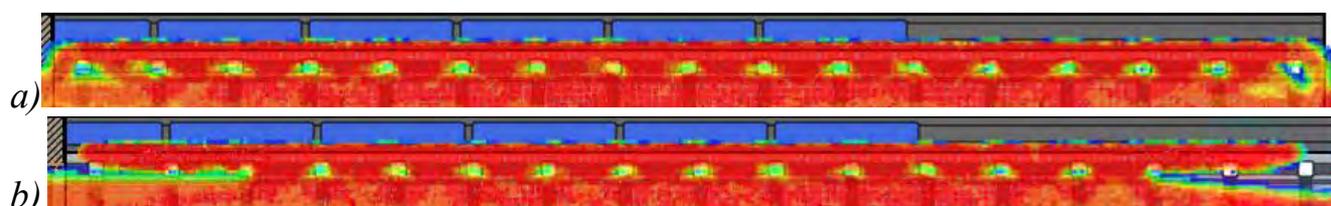


Рисунок 4.10 – Фрагмент моделирования эксперимента 1.2

a) без барьеров b) с барьерами

По результатам эксперимента 1.2 станция функционирует в нормальном режиме. Присутствует уменьшение плотности пассажиропотоков перед каждым из выходов в интервале с 17:30 до 17:50 по сравнению с экспериментом 1.1.

Эксперимент 1.3 – Поломка эскалаторов.

Для выявления критических режимов работы станции при ограничении доступа к Северному выходу смоделирована ситуация, когда на подъем работают 2 или 1 эскалатор из 3-х. Фрагмент моделирования представлен на Рисунке 4.11.

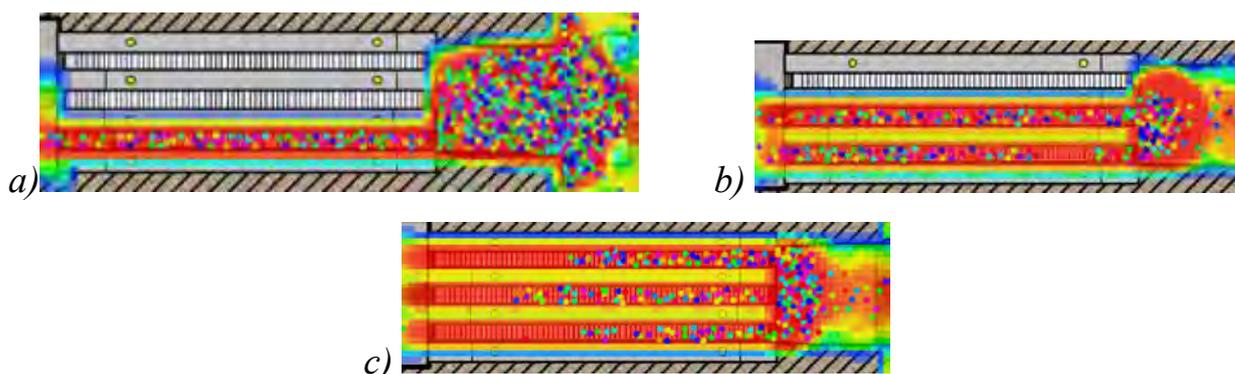


Рисунок 4.11 – Фрагмент моделирования эксперимента 1.3

- a) работает 1 из 3-х эскалаторов b) работает 2 из 3-х эскалаторов
c) работают 3 эскалатора

По прошествии 30-40 минут моделирования пассажиры вставали в очередь уже на платформе, что сделало невозможным функционирование станции в штатном режиме. Это хорошо видно на Рисунке 4.10 (а). В этом случае для предотвращения давки необходимо направить основной поток через Южный выход и увеличить интервал в движении поездов метрополитена, что соответствует мероприятиям Ω_1 и Ω_2 , указанным в методике автоматизированного планирования ККММ.

Эксперимент 1.4 – Поломка турникетов

Для выявления критических режимов работы станции при ограничении доступа к Северному и Южному выходу была смоделирована ситуация, когда произошла поломка нескольких произвольных турникетов либо выход из строя целой входной группы турникетов (Рисунок 4.12).

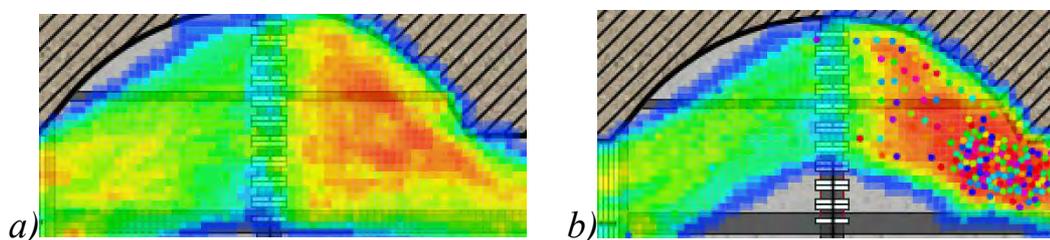


Рисунок 4.12 – Фрагмент моделирования эксперимента 1.4

- a) без поломок b) с поломкой

На Рисунке 4.12 видно, что поломка на выходной группе турникетов Южного выхода вызывает давку, пассажиры не успевают пройти через вестибюль до момента прибытия следующего состава. Для предотвращения давки, а также для уменьшения общего времени нахождения пассажиров на станции необходимо организовать работу станции на время перед началом ККММ на выход и отключить турникеты, что соответствует мероприятиям Ω_1 и Ω_2 .

В имитационной модели различия в характеристиках систем обслуживания отражаются путем изменения значений атрибутов соответствующих элементов

(например, продолжительность обслуживания и интервал времени между двумя обслуживаниями) и определения правил выбора очереди пешеходом. Диалоговое окно меню параметров системы обслуживания представлено на Рисунке 4.13.

Имя: Отображать имя
 Исключить
Сервисы:
Выбирается очередь:
Время задержки:
Задержка на восстановление:
Проходить в обратном направлении:

Рисунок 4.13 – Меню параметров системы обслуживания

Эксперимент 1.5 – Ремонт на маршевой лестнице

Для выявления критических режимов работы станции при ограничении доступа к южному выходу была смоделирована ситуация, когда на лестницу добавлен посторонний объект (препятствие), который уменьшил пропускную способность. Средняя скорость движения сократилась на 20%, плотность пассажиропотока увеличилась. Рисунок 4.14.

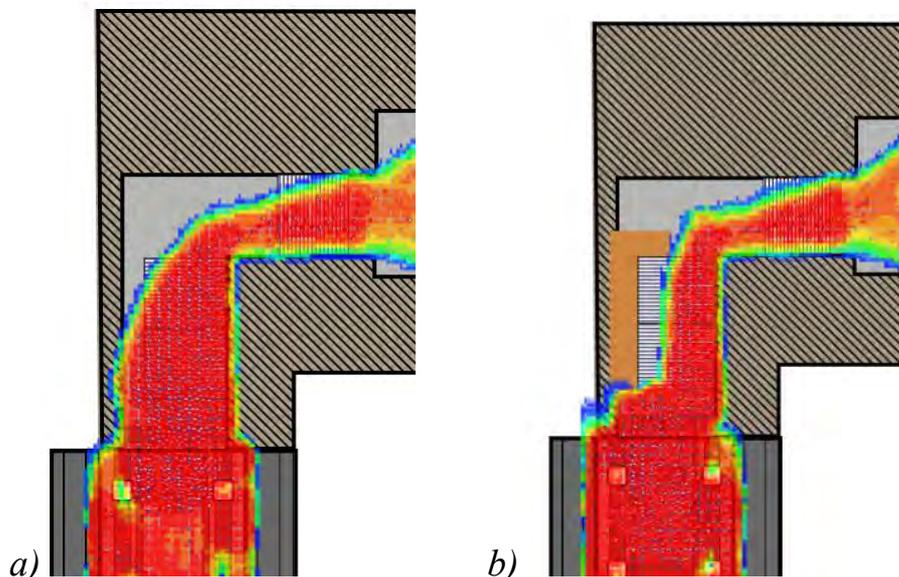


Рисунок 4.14 – Фрагмент моделирования эксперимента 1.5

a) обычное функционирование b) ремонт на маршевой лестнице

Эксперимент 1.6 – Профилактика избыточных перемещений со одного конца станции на другой

Анализируя значения времен нахождения пассажиров на станции, можно

сказать, что процесс распределения этих времен нестационарен. Гистограммы распределения времен нахождения пассажиров на станции имеют разную степень асимметрии. Наиболее симметричное распределение получается для активных болельщиков гостевой команды g_4 , которые приезжают на стадион заранее. Наибольшее среднее значение времени нахождения пассажиров на станции получено для нейтральных болельщиков g_5 , которые, как правило, обладают наименьшим опытом посещения подобных мероприятий. Они представлены на Рисунке 4.9. Однако, с увеличением пассажиропотока и возникновением очередей увеличивается и время нахождения пассажира на станции.

Для уменьшения времени нахождения пассажиров на платформе необходимо управлять пешеходными потоками. Следует ограничить перемещения из одного конца станции в другой путем принудительного направления пассажиров к одному из выходов в зависимости от местонахождения в прибывшем поезде. Однако перекрытие станции в середине платформы требует привлечения сотрудников правоохранительных органов и влечет неудобства для пассажиров (рекомендация Ω_9).

При возможности применения альтернативного варианта более рациональной мерой является указание на билете предпочтительного выхода со станции и вагона поезда в зависимости от того на какую трибуну продан билет, а также расстановка дополнительной навигации на станции, что соответствует рекомендациям Ω_7 и Ω_8 .

Эксперимент 1.7 – Поломка турникетов на входной группе стадиона

Моделирование ограниченного доступа к стадиону (отключение одной из турникетных групп) привело к повышенной нагрузке на задействованные группы, в следствии чего образовались очереди на вход. С ростом интенсивности прибытия зрителей образовывается давка.

Для решения этой проблемы необходим комплекс мероприятий. В первую очередь рассмотрим маршруты зрителей до входных групп. Используемая модель социальных сил пешеходного потока, основывается в том числе на том, что пешеход старается выбрать самый короткий путь к своей цели [42], в

рассматриваемом случае до турникетов входной группы. Из результатов моделирования видно, что с течением времени зрители начинают прибывать к турникетам быстрее, чем обрабатываются заявки на обслуживание предыдущих посетителей.

Для снижения нагрузки на входные группы необходимо изменить конфигурацию пешеходных дорожек и временных пешеходных коридоров, сделав маршрут искусственно длинней (мероприятие Ω_7), организовать дополнительные точки притяжения на площади перед входом на стадион (зоны отдыха, ожидания, площадки досуга – рекомендация Ω_5), тем самым уменьшить интенсивность пассажиропотока, обеспечить наличие обученного персонала возле турникетов и зон досмотра для уменьшения времени обслуживания в системах обслуживания (мероприятие Ω_9) и, по возможности применить специальный режим работы СКУД (рекомендация Ω_3).

Эксперимент 1.8 – Управление пешеходными потоками в зоне последней мили

Для предотвращения конфликтных ситуаций при проходе на стадион необходимо свести к минимуму пересечение маршрутов пешеходных потоков клиентских групп g_3 и g_4 [156]. Поскольку активным болельщикам гостевой команды выделяется отдельная трибуна (в нашем случае, Южная) предлагается организовать отдельный пешеходный коридор до нее в обход стадиона – мероприятия Ω_7 .

Чтобы обеспечить комфортную скорость пешеходного потока и время прибытия на трибуну, необходимо, по возможности, спрямить маршрут движения и минимизировать перепады высот, расставить соответствующую дополнительную навигацию и специализированный персонал, что совпадает с рекомендациями Ω_6 , Ω_8 и Ω_9 соответственно.

4.3. Построение имитационной модели зон разграничения по окончании крупномасштабного культурно-массового мероприятия и проведение экспериментов

Аналогично предыдущему Разделу перед проведением имитационных экспериментов по исследованию зон разграничения по окончании ККММ реализуем процессы А13 «Определение задействованных зон разграничения» и А14 «Определение объектов инфраструктуры, включая определение характеристик обслуживания участников пешеходного потока» функциональной модели планирования ККММ.

Стадион «Лужники» (Большая спортивная арена Олимпийского комплекса «Лужники») – самый вместительный стадион в Российской Федерации, расположенный неподалёку от Воробьёвых гор в Москве. Он был специально реконструирован к ЧМ и принял 7 матчей, в том числе матч открытия. Характеристики обновленного стадиона представлены в Таблице 4.5.

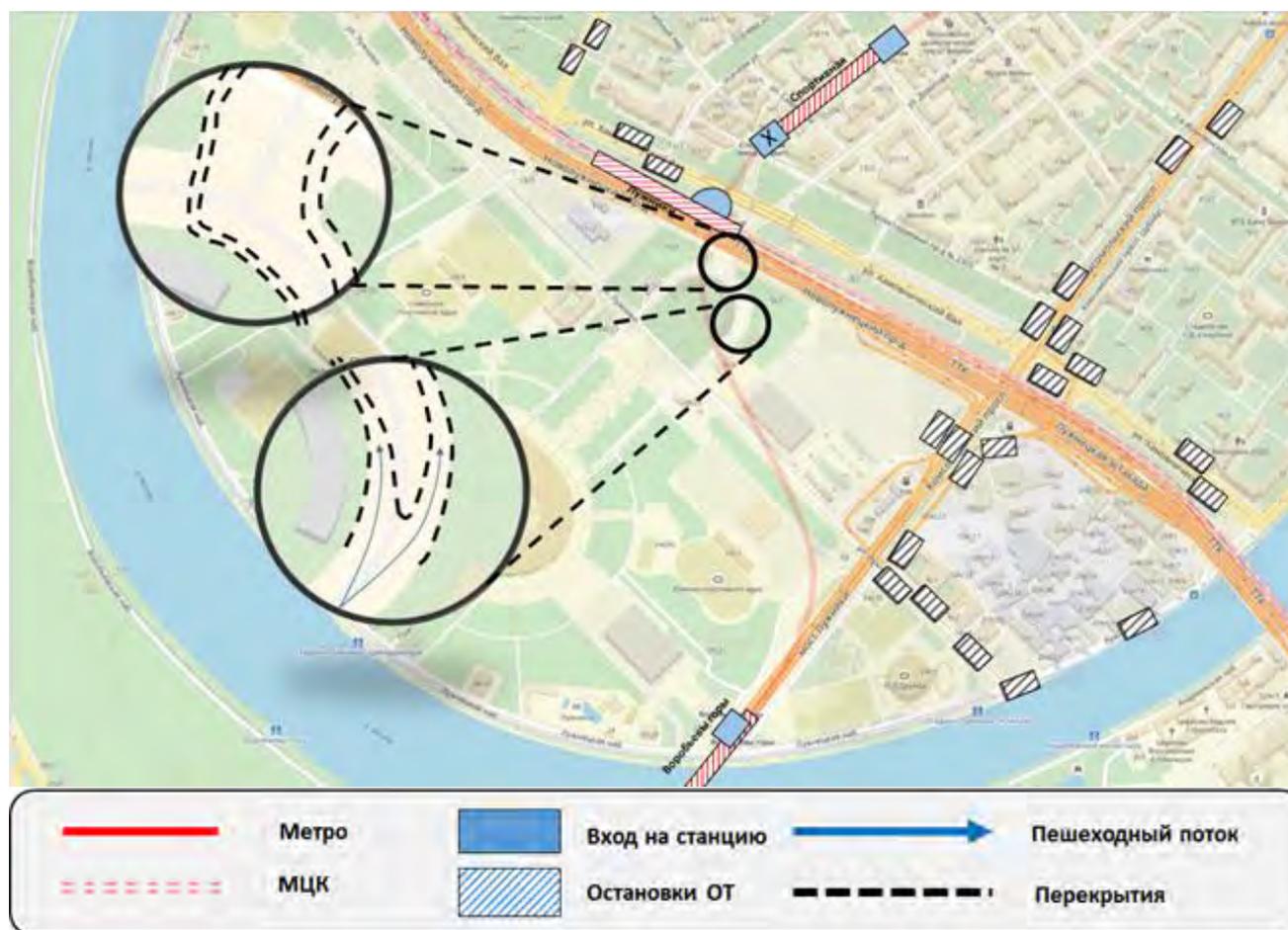
Таблица 4.5 – Характеристики стадиона «Лужники»

Параметр	Значение
Вместимость (чел.)	77450
Количество трибун (ед.)	4
Количество ярусов (ед.)	2
Количество входных групп (ед.)	2
Полное время выхода всех зрителей со стадиона / время эвакуации всех зрителей со стадиона (мин.)	15-8

Спортивный комплекс находится на юго-западе Москвы. Он естественным образом вписан в природный ландшафт города и окружен Москвой-рекою с 3-х сторон. Исходя из этого посетители прибывают и убывают с мероприятия только в основном в одном направлении (северо-восток), что создает повышенную нагрузку на транспортную инфраструктуру.

Вблизи стадиона расположены станции «Спортивная» и «Воробьевы горы» Сокольнической ветки метрополитена, станция «Лужники» Московского центрального кольца (МЦК) и автобусные маршруты №№ М3, 64, 255, С12, 806, А,

т79. Схема транспортной инфраструктуры в районе спорткомплекса представлена на Рисунке 4.15.



По окончании ККММ все представители клиентских групп покидают стадион одновременно, в отличие от прибытия на ККММ. Из-за вышеперечисленных особенностей Комплекса пешеходный поток на выходе с трибун перемешивается и его практически невозможно развести – следовательно принято решение о том, что в имитационной модели зон разграничения по окончании ККММ (имитационная модель №2) пешеходный поток считается однородным, что учитывается в процессах, относящихся к блокам А12, А23 функциональной модели.

В качестве исходного события для моделирования при реализации процесса А3 рассматривается организация выхода с территории комплекса по окончании

ККММ на примере футбольного матча между сборными России и Аргентины, прошедшего 11.11.2017 – блок А31 функциональной модели планирования ККММ.

Сразу после матча возле стадиона возникли большие очереди на выход. Скорость движения пешеходного потока не превышала 2 км/ч. Во избежание образования давки части болельщиков пришлось оставаться внутри «чаши» стадиона более 40 минут [161]. Были проанализированы причины возникновения данной ситуации для предотвращения ее во время матчей ЧМ. Эти причины можно разделить на объективные (причины, независящие от организаторов мероприятия) и субъективные (причины, которые организаторы могли предотвратить).

Рассматривая объективные причины, в первую очередь, стоит обратить внимание на погодные условия. Существует практика дозирования пешеходных потоков после окончания матча путем привлечения болельщиков различными развлекательными мероприятиями на территории рядом со стадионом. В день проведения матча погодные условия (+4° С, дождь) [162] не располагали к активностям на открытом воздухе, поэтому весь поток болельщиков сразу направился к выходу с территории комплекса.

Отдельное внимание стоит уделить функционированию местной транспортной инфраструктуры. Из-за ремонта был закрыт основной и ближайший к стадиону вход на станцию «Спортивная», в следствии чего болельщикам пришлось идти в обход ко второму входу по улице Доватора. К матчам Чемпионата Мира ремонт вестибюля был завершен [163].

К произошедшей ситуации привели не только вышеперечисленные причины, но и действия организаторов и правоохранительных органов. В день мероприятия в Хамовническом районе, который значительно превышает территорию, показанную на Рисунке 4.12, было ограничено автомобильное движение. С 00-00 большинство улиц было перекрыто для проезда личного автотранспорта [164]. Исключение составляли обладатели специализированных пропусков на территорию стадиона, а также жители, проживающие в этом районе. По этой причине подавляющее большинство зрителей приехало на метро.

По окончании мероприятия все пешеходные потоки были направлены через

единственный коридор к станциям «Спортивная» и «Лужники», соседняя станция «Воробьевы горы» была закрыта на вход. Также отсутствовали ранее заявленные компенсационные автобусные маршруты.

Самым значимым фактором, приведшим к возникновению давки, являлась организация пешеходных потоков. В районе входных групп пешеходный поток раздваивался: левый – в сторону МЦК, правый – к станции «Спортивная». Ширина коридоров была не более 4-6 метров, что создавало «бутылочное горлышко». Болельщикам в принудительном порядке приходилось идти к метро, выйти из оцепления было невозможно [165]. Схема оцепления представлена на Рисунке 4.12.

На основе полученных данных разработана имитационная модель района мероприятия по окончании футбольного матча на стадионе «Лужники» при способе организации транспортного обеспечения и пешеходных потоков, имевшем место 11.11.2017 г. [107].

Моделирование появления болельщиков, убывающих со стадиона, определяется возможностью выхода из чаши стадиона и начинается в 17:00, сразу по окончании матча. Время моделирования составляет 2 часа 30 минут. Задается комфортная скорость, с которой передвигаются болельщики. В первые 10 минут со стадиона убывают болельщики с нижнего яруса, еще через 30 минут открывается верхний ярус. Исходя из этого, пассажиропоток на выходе из чаши стадиона с 1-й по 10-ю и 40-й по 50-ю минуты определен скоростью 220500 чел./час. Распределение болельщиков между МЦК и метрополитеном определено в соотношении 1/2. При моделировании объектов инфраструктуры учтен их реальный размер и характеристики. Построение модели с превышающим 70000 (количество болельщиков при полном заполнении стадиона) количеством агентов, одновременно действующих в модели, требует значительных вычислительных ресурсов и использования не академической, а коммерческой версии программного обеспечения, которая была недоступна автору. По причине отсутствия в распоряжении автора больших вычислительных ресурсов для работы модели первые варианты показывали неудовлетворительно низкую скорость работы и вычислений. Исходя из этого, было принято решение о том, что один агент

представляет в модели группу из 6 человек (кругов) с соответствующим диаметром, а также пространство между ними для запаса, это учтено в размере круга. Пример изображения представителей клиентских групп в имитационной модели №2 представлен на Рисунке 4.16.

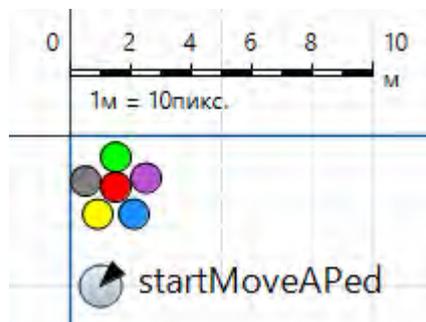
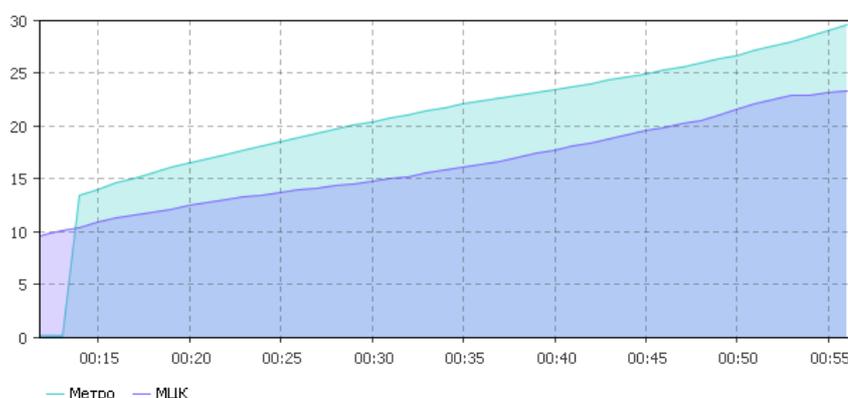


Рисунок 4.16 - Пример изображения представителей клиентских групп

Полученные в ходе моделирования результаты совпадают с тем, что происходило на выходе с территории стадиона «Лужники» к станциям МЦК и метрополитена 11.11.2017 г. [107] [166]. График усреднённого времени хода всех агентов до станций метро и МЦК с 17-00 по текущий момент времени представлен на Рисунке 4.17.



Рисунке 4.17. – Фрагмент статистики при имитации базового сценария

С использованием подсистемы моделирования АСРП были проведены эксперименты, условия функционирования которых задаются в конфигураторе сценариев АСРП. Они имитируют различные сценарии управления пешеходными потоками, величины пассажиропотоков, сценарии работы элементов транспортной инфраструктуры. Для анализа полученных результатов использованы инструменты статистики подсистемы анализа АСРП, описанные в Разделе 4.3.1 и

Приложении А и представленные на Рисунке 4.9.

В данной имитационной модели сбор статистики осуществлялся по результатам натурального эксперимента, а также опираясь на открытые источники, перечисленные выше.

Логика работы имитационной модели №2, реализующий процесс блока А23, представлена на Рисунке 4.18. В Приложении В приведено описание объектов разработанной модели в ходе реализации процесса А22 функциональной модели планирования ККММ.



Рисунок 4.18 – Логическая структура работы имитационной модели №2.

Эксперимент 2.1 – Изменение организации выхода болельщиков с трибун стадиона.

Предположим, что выход со стадиона был одновременно открыт для болельщиков верхнего и нижнего яруса и стадион равномерно опустел за 15 минут (рекомендация Ω_{10}). Скорость пассажиропотока на выходе из чаши стадиона увеличится до 294 000 чел./час. При этом организация движения пешеходных потоков остается прежней. Фрагмент моделирования на Рисунке 4.19 показывает, что все дорожки на выходе из стадиона были бы заполнены уже на 10-й минуте моделирования, что непременно привело бы к коллапсу транспортной системы и огромной давке у выхода из комплекса [107].



Рисунок 4.19 – Фрагмент моделирования эксперимента 2.1

Анализируя эксперимент 2.1 стоит отметить, что свободный выход с трибун 11.11.2017 г. мог привести к образованию давки, в которой могли пострадать люди. При фактической организации выхода организаторами было принято правильное решение о двухэтапном выходе со стадиона. Эксперименты 2.2 – 2.4 также проводятся при двухэтапном выходе зрителей со стадиона.

Эксперимент 2.2 – Изменение организации пешеходных потоков.

В случае 11.11.2017 г. ширина пешеходных коридоров в узких местах составляла не более 3-х метров, что являлось причиной «бутылочного горлышка». К тому же болельщики были направлены только через правый проход от входных групп (левый оставался незадействованным), что видно на Рисунке 4.19. В модель были внесены изменения в организацию пешеходных потоков: поток по левой стороне от входных групп задействован только под пассажиров станции МЦК «Лужники», а поток по правой стороне только под пассажиров до станции метрополитена «Спортивная». Ширина пешеходных коридоров была увеличена до 15 метров в узких местах, что соответствует рекомендации Ω_7 . Результаты эксперимента 2.2 представлены в Таблице 4.6 [107].

Таблица 4.6 – Результаты эксперимента 2.2

Параметр	Станция «Спортивная»	Станция «Лужники»
Количество пассажиров	49 000	24 500
Усредненная скорость движения (км/ч)	3,1	3,4
Усредненное время в пути (мин.)	23	13
Путь (м.)	1200	750
	Нижний ярус	Верхний ярус

Среднее время нахождение в модели (мин.)	19	59 (из них 40 болельщики провели на трибуне)
--	----	--

По результатам эксперимента можно сделать вывод о том, что:

- средняя скорость движения увеличилась на 1.2 км/ч;
- среднее время в пути до станций «Лужники» и «Спортивная» сократилось на 10 и 8 минут соответственно;
- усредненное времени в пути до объектов местной транспортной инфраструктуры снизилось на 30%;
- верхний ярус стадиона возможно выпустить на 15 минут раньше;
- максимальное время нахождения агентов в модели составило 35 минут.

Анализируя усредненные времена в пути до объектов местной транспортной инфраструктуры, можно заметить, что основное влияние на сокращение величины этого показателя оказала реорганизация пешеходных потоков. Как показал эксперимент 2.2, увеличение ширины пешеходных коридоров ощутимо снизило замедление болельщиков, а разведение 2-х пешеходных потоков (использование левого и правого прохода к соответствующей станции) позволило уменьшить взаимодействие болельщиков друг с другом, поскольку они выбирали соответствующий проход на площади перед территорией комплекса, вместимость которой позволяет комфортно находиться на ней большому числу людей. Данная модель организации пешеходных потоков может функционировать эффективней, если сразу после выхода с трибуны болельщики будут оповещены о направлении соответствующего коридора, что позволит им заранее спланировать свой маршрут, держаться левой или правой стороны еще на территории комплекса и уменьшить взаимодействие друг другом в ограниченном пространстве т.е. реализовать рекомендации Ω_7 , Ω_8 , Ω_9 .

Эксперимент 2.3 – Открытие станции «Воробьевы горы»

По причинам безопасности по окончании матча станция метрополитена «Воробьевы горы» не функционировала на вход, проход к ней был перекрыт. Правоохранительные органы предприняли данные меры для того, чтобы

предотвратить ситуацию, при которой часть болельщиков воспользуются этой станцией, в следствии чего поезда, приходящие на станцию «Спортивная», будут уже заполнены. В ходе эксперимента были внесены изменения в режим работы местной транспортной инфраструктуры: станция «Воробьевы горы» открыта на вход, к ней перенаправлен поток болельщиков, которым необходимо попасть на юг (к станции «Саларьево»). Для предотвращения ситуации с переполненными поездами, прибывающими на станцию «Спортивная», необходимо ограничить посадку на поезда в сторону центра на станции «Воробьевы горы», т.е. реализовать рекомендации Ω_1 , Ω_2 , Ω_4 . Допустим, что данной станцией воспользуются 10% болельщиков. Результаты эксперимента 2.3 представлены в Таблице 4.7 [107].

Таблица 4.7 – Результаты эксперимента 2.3

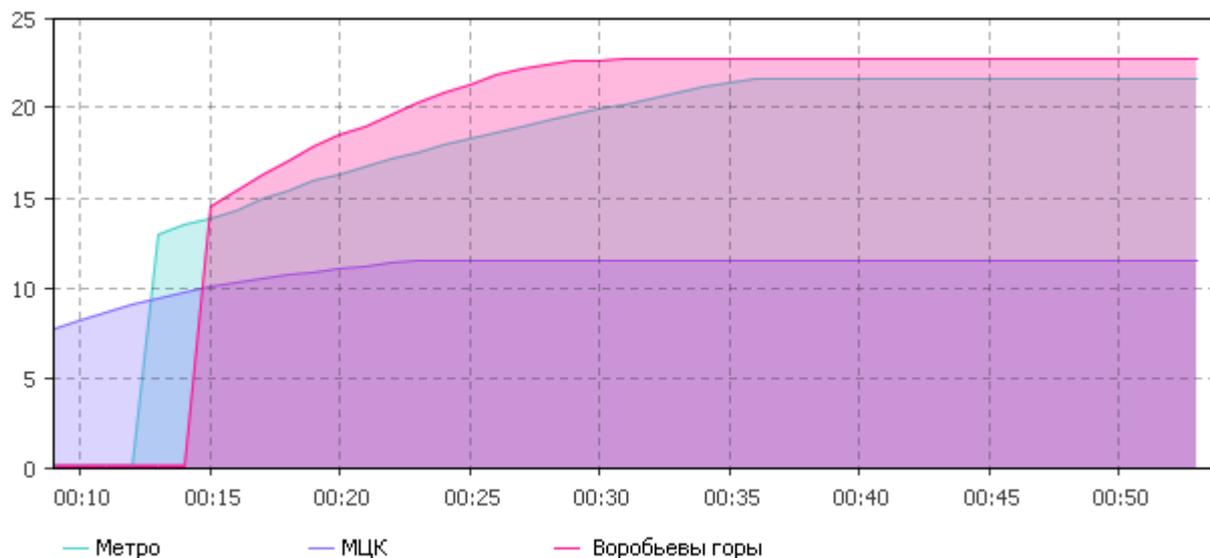
Параметр	Станция «Спортивная»	Станция «Лужники»	Станция «Воробьевы горы»
Количество пассажиров	44 100	22050	7350
Усредненная скорость движения (км/ч)	3,4	3,9	3,2
Усредненное время в пути (мин.)	21	11,5	23
Путь (м.)	1200	750	1250
	Нижний ярус	Верхний ярус	
Среднее время нахождение в модели (мин.)	18	58 (из них 40 минут болельщики провели на трибуне)	

По результатам эксперимента можно сделать вывод о том, что по сравнению с экспериментом 2.2:

- средняя скорости движения увеличилась на 0.6 км/ч;
- среднее время в пути до станций МЦК «Лужники» и метрополитена «Спортивная» сократилось на 1,5 и 2 минут соответственно;
- усредненное времени в пути до объектов местной транспортной инфраструктуры снизилось на 6%;
- верхний ярус стадиона возможно выпустить на 17 минут раньше (по сравнению с экспериментом 2.1);

– максимальное время нахождения агентов в модели составило 32 минуты.

Зависимость среднего времени в пути до станций «Спортивная», «Воробьевы горы» и «Лужники» от времени моделирования представлена на Рисунке 4.20.



Рисунке 4.20. – Фрагмент статистики при эксперименте 2.3

Эксперимент 2.4 – Организация свободного доступа к улично-дорожной сети (УДС).

Как было написано выше, по окончании мероприятия все пешеходные потоки в принудительном порядке были направлены к станциям метрополитена «Спортивная» и МЦК «Лужники». Выйти из оцепления было невозможно, вследствие чего болельщики не могли воспользоваться наземным общественным транспортом. Внесем изменения в режим работы транспортной инфраструктуры: обеспечим болельщикам доступ к остановкам наземного общественного транспорта, организуем дополнительные компенсационные автобусные маршруты, а также отменим часть ограничений проезда на личном автотранспорте в день мероприятия. Предположим, что 5% болельщиков воспользуются наземным общественным транспортом (НОТ), а еще 5% личным автотранспортом. Результаты эксперимента 2.4 представлены в Таблице 4.8 [107].

Таблица 4.8 – Результаты эксперимента 2.4

Параметр	Станция «Спортивная»	Станция «Лужники»	Станция «Воробьевы	Наземный общественный
----------	----------------------	-------------------	--------------------	-----------------------

			горы»	и личный транспорт
Количество пассажиров	39 690	19 845	7 350	6 615
Усредненная скорость движения (км/ч)	3,6	3,9	3,2	2,6
Усредненное время в пути (мин.)	20	11,5	23	19,5
Путь (м.)	1200	750	1250	700-1000
	Нижний ярус		Верхний ярус	
Среднее время нахождение в модели (мин.)	17,7		57,7 (из них 40 минут болельщики провели на трибуне)	

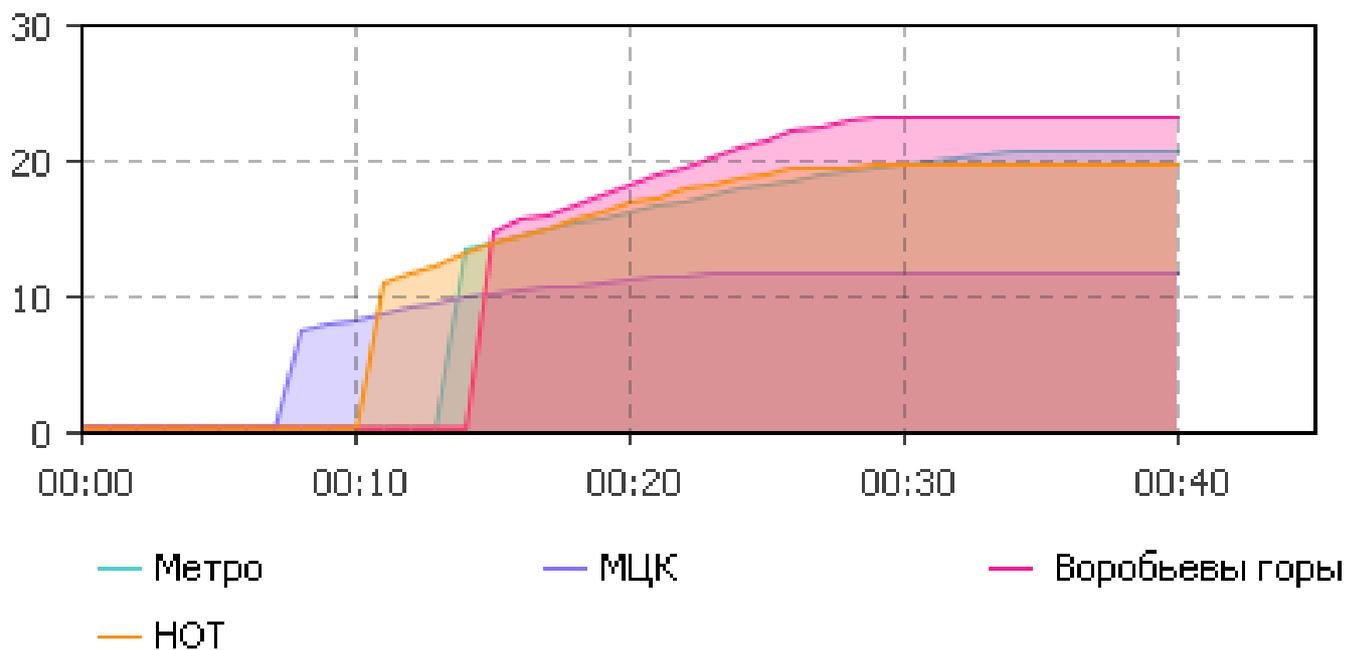
По результатам эксперимента можно сделать вывод о том, что по сравнению с экспериментом 2.3:

- средняя скорости движения увеличилась на 0,4 км/ч;
- усредненное времени в пути до объектов местной транспортной инфраструктуры снизилось на 5%;
- максимальное время нахождения агентов в модели составило 31 минуту.

График среднего времени в пути до станций метрополитена «Спортивная», «Воробьевы горы» и МЦК «Лужники» представлен на Рисунке 4.18. Фрагмент моделирования эксперимента 2.5 представлен на Рисунке 4.21.

Обеспечение свободного доступа ко всем объектам транспортной инфраструктуры и УДС (станция «Воробьевы горы», наземный общественный и личный транспорт) в экспериментах 2.3-2.4 несущественно увеличило скорость движения пешеходного потока. Однако, данные меры обеспечивают альтернативу 2-м основным направлениям (станции «Спортивная» и «Лужники»), что в свою очередь положительно влияет на эмоциональное состояние болельщиков, которым удобней воспользоваться этими объектами транспортной инфраструктуры. Это уменьшает вероятность возникновения конфликтных ситуаций, которые при большом скоплении людей могут привести к давке или беспорядкам. Приведенные

меры соответствуют рекомендациям $\Omega_2, \Omega_4, \Omega_{10}$ и позволяют реализовать не только критерии $\Psi_1 - \Psi_4$, но и Ψ_5 .



Рисунке 4.21 – Фрагмент статистики при эксперименте 2.4



Рисунок 4.22 – Фрагмент моделирования эксперимента 2.4

Эксперимент 2.5 – Организация свободного выхода с обоих ярусов со стадиона при учете вышеперечисленных мер [107].

Был смоделирован сценарий, при котором были учтены все вышеописанные меры и открыт свободный выход со стадиона. Арена равномерно опустеет за 15

минут, скорость пассажиропотока равна 294 000 чел./час. Результаты эксперимента 2.5 представлены в Таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Результаты эксперимента 2.5

Параметр	Станция «Спортивная»	Станция «Лужники»	Станция «Воробьевы горы»	Наземный общественный и личный транспорт
Количество пассажиров	37 485	22050	7 350	6 615
Усредненная скорость движения (км/ч)	3,0	3,5	2,9	2,4
Усредненное время в пути (мин.)	24	13	26	22
Путь (м.)	1200	750	1250	700-1000

По результатам эксперимента можно сделать вывод о том, что по сравнению с экспериментом 2.1:

- среднее время нахождения в модели сократилось на 17 минут и составило 20,5 минут;
- возможно организовать одновременный выход со стадиона для болельщиков с нижнего и верхнего ярусов;
- средняя скорость движения увеличилась на 2.2 км/ч.

Рассмотрев эксперимент 2.5, можно отметить существенное улучшение всех показателей, однако эти результаты можно с трудом признать удовлетворительным из-за закрытого на реконструкцию ближайшего к стадиону входа на станцию «Спортивная». Северный вестибюль расположен почти на полкилометра дальше, что существенно увеличивает время в пути, которое перестает быть комфортным для болельщиков. Поэтому, даже с учетом предложенных мер, некоторая часть болельщиков все равно осталась бы не удовлетворена продолжительностью своего маршрута.

Результаты эксперимента 2.5 полностью подтвердились при проведении следующего футбольного матча со сборной Бразилии 23.03.2018 г. Разработанная имитационная модель №2 максимально приближена к реальному

функционированию комплекса. Предложенные рекомендации ($\Omega_1, \Omega_2, \Omega_4, \Omega_7, \Omega_8, \Omega_9, \Omega_{10}$) для организации пешеходных потоков и транспортного обеспечения полностью показали свою работоспособность.

Эксперимент 2.6 – Организация выхода со стадиона после матча ЧМ [107].

Летом 2018 года стадион «Лужники» принимал игры Чемпионата мира. Вокруг игр был большой ажиотаж, стадион полностью заполнялся на каждом матче. К этому времени был открыт основной выход станции «Спортивная», который ближе к стадиону на 400 метров. Отдельно стоит отметить, что во время матчей ЧМ 2018 организованные группы иностранных болельщиков приезжали на автобусах и останавливались внутри основного периметра стадиона – по окончании матча они не воспользовались городской транспортной инфраструктурой.

Допустим, что общественным транспортом воспользовалось 70 000 человек и стадион равномерно опустел за 15 минут. Формат мероприятия способствует организации множества концертно-развлекательных площадок (зоны притяжения), которые пользовались большим вниманием у болельщиков. По этой причине в эксперименте задан пассажиропоток 140 000 чел./час. Результаты эксперимента 2.6 представлены в Таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Результаты эксперимента 2.6

Параметр	Станция «Спортивная»	Станция «Лужники»	Станция «Воробьевы горы»	Наземный общественный и личный транспорт
Количество пассажиров	32 700	22050	7 350	3 300
Усредненная скорость движения (км/ч)	3,2	3,5	2,9	2,4
Усредненное время в пути (мин.)	15	13	26	22
Путь (м.)	800	750	1250	700-1000

Наличие «зон притяжений» позволит равномерно распределить пассажиропоток в течении часа и избежать кратковременной пиковой нагрузки, как в случае 11.11.2017 г. – рекомендация Ω_5 . Среднее время в пути составило 16 минут, что является комфортным показателем для болельщиков. С большой вероятностью можно сказать, что продолжительному нахождению на улице способствовали благоприятные погодные условия.

Значения средних времен в пути до объектов инфраструктуры и средних скоростей движения пешеходов, полученные после проведения экспериментов 2.1-2.6, сведены в Таблицу 4.11. График изменения значений времени в пути до станции «Спортивная» представлен на Рисунке 4.20.



Рисунок 4.23 – График изменения значений времени в пути до станции «Спортивная».

Таблица 4.11 – Сводные значения результатов экспериментов 2.1 – 2.6

Объект инфраструктуры	Критерий качества	Трибуна стадиона	Сценарий 11.11.2017	Эксп. 1	Эксп. 2	Эксп. 3	Эксп. 4	Эксп. 5	Эксп. 6
Станция «Спортивная»	Время в пути (мин)	Ярус 1	30	Давка, начиная с 12 минуты. Моделирование прекращено.	23	21	20	24	15
		Ярус 2	70		63	61	60		
	Скорость движения (км\ч)	Ярус 1, 2	2,3		3,1	3,4	3,6	3,0	3,2
Станция «Лужники»	Время в пути (мин)	Ярус 1	23		13	11,5	11,5	13	13
		Ярус 2	63		53	51,5	51,5		
	Скорость движения (км\ч)	Ярус 1, 2	2,0		3,4	3,9	3,9	3,5	3,5
Станция «Воробьевы Горы»	Время в пути (мин)	Ярус 1	-	-	-	23	23	26	26
		Ярус 2	-	-	-	63	63		
	Скорость движения (км\ч)	Ярус 1, 2	-	-	-	3,2	3,2	2,9	2,9
УДС	Время в пути (мин)	Ярус 1	-	-	-	-	19,5	22	22
		Ярус 2	-	-	-	-	59,5		
	Скорость движения (км\ч)	Ярус 1, 2	-	-	-	-	2,6	2,4	2,4

Эксперимент 2.7 – Управление местной транспортной инфраструктурой по окончании ККММ.

Эффективное функционирование транспортной инфраструктуры по окончании ККММ требует применения специализированных мер. В первую очередь следует обеспечить специализированный режим работы только на вход – мероприятие Ω_1 .

Согласно Таблице 3.1 особое внимание уделяется наполняемости накопителей объекта транспортной инфраструктуры, в нашем случае станции (вестибюли, холлы, платформа). Во избежание их переполнения составляется специальный график движения ППМ, на линию выводятся дополнительные составы. Это соответствует рекомендации Ω_2 .

Для распределения нагрузки на объекты транспортной инфраструктуры необходимо обеспечить максимальное количество доступных видов общественного транспорта – рекомендация Ω_4 .

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.

Таким образом, гипотеза, выдвинутая в разделе 2.3 и проиллюстрированная Таблицами 2.4-2.6, подтверждена результатами имитационного моделирования. В ходе имитационных экспериментов показано, что варьирование значений факторов, определённых в Таблицах 2.4-2.6 как влияющие на значения выбранных критериев качества регулирования пассажиропотока при проведении ККММ, позволяет достичь целевых значений критериев качества. Таблица 4.12 иллюстрирует полученные соответствия.

Таблица 4.12 – Таблица соответствия мероприятий экспериментов

	Перед началом ККММ		После окончания ККММ	
	Мероприятия	Результат	Мероприятия	Результат
Транспортная инфраструктура	$\Omega_1, \Omega_2, \Omega_7, \Omega_8, \Omega_9$	Уменьшение плотности пешеходного потока	$\Omega_1, \Omega_3, \Omega_9$	Повышение качества обслуживания системах обслуживания
		Увеличение скорости движения пешеходного потока	$\Omega_4, \Omega_8, \Omega_9$	Уменьшение плотности пешеходного потока
	$\Omega_1, \Omega_3, \Omega_9$	Повышение качества обслуживания системах обслуживания		
Район ККММ	$\Omega_5, \Omega_6, \Omega_7, \Omega_8$	Увеличение скорости движения пешеходного потока	$\Omega_2, \Omega_4, \Omega_7, \Omega_8, \Omega_9, \Omega_{10}$	Увеличение скорости движения пешеходного потока
		Повышение безопасности и комфорта		Уменьшение плотности пешеходного потока
	Ω_3, Ω_9	Повышение качества обслуживания системах обслуживания	-	Повышение качества обслуживания системах обслуживания

Основные выводы и результаты по Главе 4

1. Реализована спроектированная структура и математическое обеспечение АСРП, позволяющие реализовать эффективное автоматизированное регулирование пассажиропотоков при проведении ККММ в соответствии с разработанной функциональной моделью планирования ККММ.

2. Разработаны имитационные модели функционирования зон разграничения при проведении ККММ, учитывающие в отличие от известных, неоднородность пешеходного потока, различия в критериях оценки качества функционирования систем обслуживания в различных зонах разграничения. Модели позволяют решать задачи безопасного планирования функционирования местной транспортной инфраструктуры и пешеходного потока в зоне последней мили по окончании ККММ.

3. Подтверждена гипотеза о множестве рекомендаций и требований Ω , позволяющих повысить качество обслуживания участников пешеходного потока и увеличить эффективность функционирования объектов транспортной инфраструктуры при проведении ККММ.

4. Сформулированы рекомендации по организации режима работы объектов транспортной инфраструктуры. При проверке результатов имитационных экспериментов эффективность выдвинутой гипотезы полностью подтвердилась на натурном эксперименте, включая матчи Чемпионата Мира по футболу 2018 года.

5. Качественным соотношениям, сформулированным при формировании множеств требований и рекомендаций по достижению целевых значений критериев качества, поставлены в соответствие количественные соотношения, доказывающие правильность выдвинутых предположений.

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 имитационных 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 значениям критерия качества «Время движения в пути до цели назначения представителей клиентских групп пешеходного потока»

6. Сходимость результатов имитационных и натуральных 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.

Список литературы

1. World Health Organization, Communicable disease alert and response for mass gatherings: key considerations // Geneva WHO. – 2008. – P. 32–33.
2. World Health Organization, Public Health for Mass Gatherings: Key Considerations // World Health Organization. – 2015.
3. Приказ Росстата от 08 сентября 2015 N 464 (ред. от 14 октября 2015) «Об утверждении статистического инструментария для организации Министерством культуры Российской Федерации федерального статистического наблюдения за деятельностью учреждений культуры» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_187635/
4. Абросимов, В. К. Имитационное моделирование организации массовых мероприятий (на примере XXII зимних Олимпийских игр) [Текст] / В. К. Абросимов, В. В. Лебедько // Бизнес-информатика. – 2013. – № 1(23). – С. 19-27.
5. Акопов, А. С. Агентная модель поведения толпы при чрезвычайных ситуациях [Текст] / А. С. Акопов, Л. А. Бекларян // Автоматика и телематика. – 2015. – № 10. – С. 131-141.
6. Акопов, А. С. Моделирование поведения толпы на основе интеллектуальной динамики взаимодействующих агентов [Текст] / А. С. Акопов, Л. А. Бекларян // Бизнес-информатика. – 2015. – № 1(31). – С. 69-77.
7. Аристов, А. О. Квазиклеточные сети и их приложения в задачах моделирования посетителей объектов массового пребывания людей [Текст] / А. О. Аристов // Компьютерные исследование и моделирование. – 2014. – Vol. 6. – № 2. – С. 285-294.
8. Аристов, А.О. Особенности моделирования потоковых систем на основе квазиклеточных сетей с использованием структурной методологии проектирования [Текст] / А. О. Аристов // Информационные технологии. – 2014. – № 6. – С. 43-51.

9. Аристов, А. О. Структурно-параметрический синтези анализ моделей потоквых систем промышленно-логистического назначения на основе квазиклеточных сетей [Текст]: автореферат дисс. док. технических наук: 05.13.01 / Аристов Антон Олегович. – Москва: Московский институт стали и сплавов, 2018. – 44 с.
10. Бекларян, А. Л. Исследование агентной модели поведения толпы при чрезвычайной ситуации [Текст] / А. Л. Бекларян // Управление в социально экономических системах. – 2012. – С. 1-32.
11. Бекларян, А. Л. Фронт выхода в модели поведения толпы при чрезвычайных ситуациях [Текст] / А. Л. Бекларян // Вестник ТГУ. – 2015. – Vol. 20. – № 5. – С. 1056-1065.
12. Вакуленко, С. П. Планировочная структура транспортно-пересадочных узлов [Текст] / С. П. Вакуленко, Н. Ю. Евреенова // Мир транспорта. – 2012. – № 5. – С. 100-104.
13. Вакуленко, С. П. О классификации транспортно-пересадочных узлов [Текст] / С. П. Вакуленко, Н. Ю. Евреенова // Мир транспорта. – 2011. – № 5. – С. 130-133.
14. Вакуленко, С. П. Моделирование пассажиропотоков в ТПУ [Текст] / С. П. Вакуленко, В. В. Доенин, Н. Ю. Евреенова // Мир транспорта. – 2014. – № 4. – С. 124-131.
15. Вакуленко, С. П. Проблема организации единой транспортной системы [Текст] / С. П. Вакуленко, П. А. Козлов, В. С. Колокольников // Вестник РГУПС. – 2014. – № 3. – С. 96-101.
16. Вакуленко, С. П. Логистика пассажирских перевозок: особенности и основные понятия [Текст] / С. П. Вакуленко, Е .В. Копылова // Мир транспорта. – 2015. – Vol. 13. – № 3. – С. 32-36.
17. Вакуленко, С. П. Развитие транспортной сети на уровне Московского региона [Текст] / С. П. Вакуленко, Н. В. Медведев, П. М. Токарев, С. С. Хасенов // Механизация строительства. – 2014. – № 4(838). – С. 8-11.

18. Пазойский, Ю. О. Пассажирские перевозки на железнодорожном транспорте (примеры, задачи, модели, методы и решения) [Текст] / Ю. О. Пазойский, В. Г. Шубко, С. П. Вакуленко // М. – 2016. – 364 с.
19. Пазойский, Ю. О. Организация пригородных железнодорожных перевозок [Текст] / Ю. О. Пазойский, С. П. Вакуленко, П. В. Голубев, А. В. Колин, Е. В. Копылова, Е. Б. Куликова, М. Б. Савельев, В. Н. Шмаль // М. – 2015. – 272 с.
20. Пазойский, Ю. О. Проектирование инфраструктуры железнодорожного транспорта (станции, железнодорожные и транспортные узлы) [Текст] / Ю. О. Пазойский, С. П. Вакуленко, Н. В. Правдин, А. К. Головнич, О. Н. Числов, В. И. Сенько, С. А. Бессоненко, Б. Ф. Андреев, Т. А. Власюк, П. В. Голубев, Т. И. Каширцева // М. – 2012. – 1086 с.
21. Пазойский, Ю. О. Организация массового вывоза пассажиров при ограниченном ресурсе вагонного парка [Текст] / Ю. О. Пазойский, С. П. Вакуленко, М. П. Акулов // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2006. – № 5. – С. 4-6.
22. Доенин, В. В. Моделирование транспортных процессов и систем [Текст] / В. В. Доенин // М.: Изд. «Компания Спутник+», 2012. – 288 с.
23. Доенин, В. В. Логико-разностные модели движения транспортных объектов [Текст] / В. В. Доенин, Лай Мань Зунг, Е. В. Ляпунова // Естественные и технические науки. – 2012. – № 2. – С. 474-480.
24. Доенин, В. В. Возможности применения трехмерного компьютерного моделирования для решения проблем на транспортно-пересадочных узлах [Текст] / В. В. Доенин, И. С. Разживайкин // Труды международной научно-технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование систем». – 2017. – С. 157-163.
25. Доенин, В. В. Логико-разностные модели транспортных процессов [Текст] / В. В. Доенин // М.: Изд. «Компания Спутник+», 2008. – 276 с.
26. Доенин В. В. Модели параллельных процессов в распределённых системах [Текст] / В. В. Доенин // М.: Изд. «Компания Спутник+», 2007. – 344 с.

27. Доенин, В. В. Введение в абстрактную теорию транспортных процессов и систем. [Текст] / В. В. Доенин // М.: Изд. «АЛВИАН», 2005. – 338 с.
28. Доенин, В. В. Интеллектуальные транспортные потоки [Текст] / В. В. Доенин // М.: Изд. «Компания Спутник+», 2007. – 308 с.
29. Доенин, В. В. Логика транспортных процессов [Текст] / В. В. Доенин // М.: Изд. «Компания Спутник+» 2008. – 280 с.
30. Доенин, В. В. Динамическая логистика транспортных процессов [Текст] / В. В. Доенин // М.: Изд. «Компания Спутник+», 2010. – 248 с.
31. Доенин, В. В. Основы абстрактной теории транспортных процессов [Текст] / В. В. Доенин // М.: Изд. «Компания Спутник+», 2011. – 348 с.
32. Евреенова, Н. Ю. Качество услуг ТПУ: интерес и спрос [Текст] / Н. Ю. Евреенова // Мир транспорта. – 2015. – Vol. 13. – № 1. – С. 108-114.
33. Евреенова, Н. Ю. Моделирование функционирования транспортно-пересадочного узла [Текст] / Н. Ю. Евреенова // Мир транспорта. – 2014. – № 5. – С. 170-173.
34. Карсаков, А. С. Автоматизация процесса обучения персонала при подготовке и проведении массовых мероприятий [Текст]: дисс. канд. технических наук: 05.13.06 / Карсаков Андрей Сергеевич. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016. – 97 с.
35. Лановой, А. Ф. Моделирование поведения толпы на основе дискретно-событийного мультиагентного подхода [Текст] / А. Ф. Лановой, А. А. Лановой // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 4/4(70). – С. 52-57.
36. Мадяр, О. Н. Моделирование спроса на транспортное обслуживание в пригородной зоне тяготения пассажиропотоков для пассажирских поездов дальнего следования [Текст] / О. Н. Мадяр // Научные тенденции: Вопросы точных и технических наук сборник научных трудов по материалам X

- международной научной конференции. Международная Научно-Исследовательская Федерация «Общественная наука». Санкт-Петербург. – 2017. – С. 48-50.
37. Копылова, Е. В. Алгоритм назначения остановок поездов дальнего следования в пригородных зонах крупных железнодорожных узлов [Текст] / Е. В. Копылова, О. Н. Мадяр // Транспортное дело России. – 2018. – Vol. 48. – № 2. – С. 114-117.
38. Мадяр, О. Н. Методология комплексного анализа пассажиропотока при назначении остановок поездам дальнего следования в их пригородной зоне [Текст] / О. Н. Мадяр // Всероссийская научно-практической конференции «Неделя науки – 2017» В 2 ч. Ч. 2. М.: РУТ. – 2017. – Vol. X60с. – № IV66-IV67.
39. Майоров, Н. Н. Метод оценки пропускной способности аэровокзального комплекса с помощью имитационного моделирования [Текст] / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов // Моделирование систем и процессов. – 2014. – № 6. – С. 82-86.
40. Мельников, Р. В. Моделирование пешеходных потоков при подготовке к проведению мега-событий [Текст] / Р. В. Мельников // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 2. – С. 13.
41. Пашкевич, А. Г. Имитационное моделирование ТПУ метрополитена [Текст] / А. Г. Пашкевич // METRO INFO International. – 2016. – № 1. – С. 16-19.
42. Якимов, М. Р. Основные подходы к моделированию движения пешеходных потоков [Текст] / М. Р. Якимов // Мир транспорта. – 2015. – Vol. 13. – № 4. – С. 166-173.
43. Helbing, D. Dynamics of crowd disasters: An empirical study [Text] / D. Helbing // Physical review. – 2007. – Vol. 75. – № 4.
44. Helbing, D. Simulating dynamical features of escape panic [Text] / D. Helbing // Nature. – 2000. – № 407. – P. 487-490.

45. Helbing, D. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations [Text] / D. Helbing // Pedestrian and evacuation dynamics. – 2002. – № 21. – P. 21-58.
46. Helbing, D. Traffic and related self-driven many-particle systems [Text] / D. Helbing // Reviews of modern physics. – 2001. – Vol. 73. – № 4. – P. 1067-1141.
47. Helbing, D. Crowd turbulence: the physics of crowd disasters [Text] / D. Helbing, A. Johansson, H. Z. Al-Abideen // arXiv Prepr. arXiv0708.3339. – 2007.
48. Mahmood, I. Analyzing emergency evacuation strategies for mass gatherings using crowd simulation and analysis framework: Hajj scenario [Text] / I Mahmood, M. Haris, H. Sarjoughian // The 2017 ACM SIGSIM Conference – 2018. – P. 231-240.
49. Балакина, Е. П. Многофункциональные модели систем управления [Текст] / Е. П. Балакина, Л. А. Баранов, В. С. Ерофеев, В. Г. Сидоренко // Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2012. – № 2. – С. 79-82.
50. Балакина, Е. П. Восстановление движения поездов метрополитена по плановому графику [Текст] / Е. П. Балакина // Инновационные технологии – транспорту и промышленности: труды 46 международной научно-практической конференции ученых транспортных вузов, инженерных работников и представителей академической науки. – 2008. – С. 154-160.
51. Балакина, Е. П. Принципы построения алгоритмов системы поддержки принятия решений поездному диспетчеру [Текст] / Е. П. Балакина // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 2. – С. 23-26.
52. Баранов, Л. А. Интервальные и временные характеристики перегонов линии метрополитена [Текст] / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, Л. Н. Воробьева // Труды VII Научно-практической конференции Безопасность движения поездов. – 2006. – С. 7.2-7.3.
53. Баранов, Л. А. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава [Текст] / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов // Транспорт. – 1990. – 272 с.

54. Баранов, Л. А. Системы автоматического и телемеханического управления электроподвижным составом [Текст] / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, В. И. Астрахан и др. // Транспорт. – 1984. – 311 с.
55. Баранов, Л. А. Метрополитен Мехико: алгоритмы движения [Текст] / Л. А. Баранов, П. Ю. Воробьев // Мир транспорта. – 2012. – № 4. – С. 106-113.
56. Баранов, Л. А. Тренажер поездных диспетчеров линий Московского метрополитена [Текст] / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко // Железные дороги мира. – № 8. – С. 64-69.
57. Баранов, Л. А. Внедрение энергосберегающих технологий [Текст] / Л. А. Баранов, Д. В. Гаев, А. В. Ершов, В. А. Гречишников, М. В. Шевлюгин // Мир транспорта. – 2018. – Vol. 31. – № 3. – С. 3-8.
58. Баранов, Л. А. Автоматизированная система выбора энергооптимальных режимов управления движением поезда метрополитена [Текст] / Л. А. Баранов, М. А. Васильева, А. В. Ершов, В. М. Максимов, И. С. Мелёшин // Вестник МИИТа. – 2008. – № 19. – С. 3-10.
59. Баранов, Л. А. Метод оценки изменения электромагнитной обстановки в местах функционирования систем интервального регулирования движения поездов [Текст] / Л. А. Баранов, П. Ф. Бестемьянов, В. Г. Сидоренко, Е. Г. Щербина // Наука и техника транспорта. – 2013. – № 3. – С. 35-41.
60. Баранов, Л. А. Алгоритмы для поездов метрополитена [Текст] / Л. А. Баранов, Е. П. Балакина, Л. Н. Воробьева // Мир транспорта. – 2007. – № 2. – С. 104-113.
61. Воробьев, П. Ю. Изменение конструкции вагона скоростного поезда [Текст] / П. Ю. Воробьев // Мир транспорта. – 2012. – № 2. – С. 66-68.
62. Воробьев, П. Ю. Анализ пассажиропотоков на метрополитене г. Мехико [Текст] / П. Ю. Воробьев // Труды научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Неделя науки 2010». – 2010.

63. Замышляев, А.М. Информационная технология комплексного управления надежностью и функциональной безопасностью на железнодорожном транспорте [Текст] / А. М Замышляев // Надежность. – 2011. – № 2. – С. 12-16.
64. Замышляев, А.М. Прикладные информационные системы управления надежностью, безопасностью, рисками и ресурсами на железнодорожном транспорте [Текст] / А. М Замышляев // Надежность. – 2013. – С. 136.
65. Замышляев, А. М. Построение и использование матриц рисков в системе управления рисками на железнодорожном транспорте [Текст] / А. М. Замышляев, В. А. Гапанович, И. Б. Шубинский. // Надежность. – 2011. – № 4. – С. 56-68.
66. Козлов, В. П. Оперативное управление движением поездов в системе автоведения метрополитенов в периоды сбоя графика движения [Текст]: дисс. канд. тех. наук: 05.13.07 / Козлов Вячеслав Петрович. Москва, ВНИИ ж.-д. трансп. 1989. – 206 с.
67. Козлов, В. П. Математическая модель пассажиропотока метрополитена [Текст] / В. П. Козлов, А. К. Межох // Тр. ин-тов инж. ж.д. транс., МИИТ. – 1980. – № 661. – С. 95-100.
68. Воробьева, Л. Н. Градиентный способ управления городскими транспортными системами [Текст] / Л. Н. Воробьева, А. И. Сеславин // Наука и техника транспорта. – 2005. – № 2. – С. 71-73.
69. Пазойский, Ю. О. Оптимизация параметров системы освоения пригородных пассажиропотоков в условиях мегаполиса [Текст]: дисс. доктора технических наук: 05.22.08 / Пазойский Юрий Ошарович. – Москва: Московский государственный университет путей сообщения, 2000. – с. 339.
70. Сидоренко, В. Г. Автоматизация планирования работы ЭПС метрополитена [Текст] / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов, К. М. Филипченко // Мир транспорта. – 2015. – Vol. 13. – № 4. – С. 154-165.

71. Исакаков, Т. А. Математическая модель взаимодействия клиентских групп пешеходов внутри транспортного узла [Текст] / Т. А. Исакаков, В. Г. Сидоренко // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 6. – С. 32-35.
72. Сидоренко, В. Г. Система поддержки принятия решения поездного диспетчера метрополитена [Текст] / В. Г. Сидоренко // Датчики и системы управления. – 2001. – № 10. – С. 21-26.
73. Сидоренко, В. Г. Применение теории графов к планированию движения поездов метрополитена [Текст] / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко. // V Международная научно-техническая конференция «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование – ИСУЖТ-2016». – 2016. – С. 131-134.
74. Шубинский, И. Б. Основы анализа сложных систем [Текст] / И. Б. Шубинский // Пушкин: ПВУРЭ. – 1988. – 206 с.
75. Бочкова, Е. И. Организация спортивного мероприятия как социокультурного феномена [Текст] / Е. И. Бочкова // Организация работы с молодежью. – 2014. – № 5. – С. 15.
76. Коротченков, Д. А. Проблемы правового регулирования организации и проведения публичных мероприятий [Текст] / Д. А. Коротченков // Закон и право. – 2006. – № 7. – С. 30-31.
77. Коротченков, Д. А. Совершенствование административной ответственности за нарушение порядка организации и проведения массовых мероприятий [Текст] / Д. А. Коротченков, Д. В. Якунин // Современное право. – 2006. – № 8. – С. 41-43.
78. Меньших, В. В. Имитационное моделирование действий органов внутренних дел при возникновении массовых беспорядков [Текст] / В. В. Меньших, В. В. Горлов // Вестник Воронежского института МВД России. – 2015. – № 4. – С. 180-189.

79. Морозов, А. А. Оптимизация алгоритма организации мероприятий культурно-досуговой работы в подразделении [Текст] / А. А. Морозов // Студенческий научный форум. – 2012. – С. 43.
80. Никитин, Д. Н. Анализ культурно-массового мероприятия [Текст] / Д. Н. Никитин // Справочник руководителя учреждения культуры. – 2010. – № 4. – 8 с.
81. Пешкова, Н. В. Моделирование автоматами Байесовского типа действий органов внутренних дел при проведении массовых мероприятий [Текст] / Н. В. Пешкова // Вестник Воронежского института МВД России. – 2015. – № 2. – С. 196-204.
82. Свечкарев, В. П. Социальное моделирование культурного комплекса Ростовской области [Текст] / В. П. Свечкарев, Д. П. Олишевский, З. П. Гаврилова // Научная мысль Кавказа. Междисциплинарные и специальные исследования. – 2011. – № 2. – С. 78 .
83. Федеральный закон от 24.11.1996 N 132-ФЗ «Об основах туристской деятельности в Российской Федерации» (в редакции от 03.05.2012 N47-ФЗ). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_12462/
84. Постановление Правительства Российской Федерации от 03.03.2012N186 «Об утверждении федеральной целевой программы «Культура России» в период с 2012 по 2018 год». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.base.garant.ru/77674488/
85. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 июля 2010 г. No 1230-р «Об утверждении Федеральной целевой программы «Развитие внутреннего и въездного туризма в Российской Федерации» (на период с 2011 по 2018 год). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60107/
86. Некишев, А. В. Обеспечение антитеррористической защиты объектов транспортного комплекса Российской Федерации в период проведения

- крупных международных спортивных мероприятий [Текст] / А. В. Некишев, А. С. Клементьев // Вестник всероссийского института повышения квалификации сотрудников Министерства внутренних дел Российской Федерации. – 2018. – № 2(46). – С. 118-122.
87. Соломатина, Е. А. К вопросу об интегрированном подходе к проблеме безопасности при проведении Чемпионата мира по футболу 2018 г. [Текст] / Е. А. Соломатина, А. А. Звезда // Актуальные проблемы административного права и процессай. – 2018. – № 2. – С. 76-81.
88. Красноштан, М. А. Транспортный периметр стадиона в час организаций международных массовых спортивных мероприятий: аспекты транспортной безопасности [Текст] / О. М. Красноштан, О. М. Эфременко // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. – 2013. – С. 24-33.
89. Steffen, R. et al. Non-communicable health risks during mass gatherings [Text] / R. Steffen // Lancet Infect. Dis. Elsevier. – 2012. – Vol. 12. – № 2. – P. 142–149.
90. Крупнейшие давки в истории [Электронный ресурс], – Режим доступа: diletant.media/excursions/25711789/
91. Давка в Мекке [Электронный ресурс], – Режим доступа: www.kavpolit.ru/articles/davka_v_mekke_pochemu_eto_sluchilos_i_kto_vinovat-20185/
92. Давка на Хадже в Мекке [Электронный ресурс], – Режим доступа: www.art-assorty.ru/9361-davka-na-hadzhe-v-mekke-2015.html/
93. Ahmed, Q. Health risks at the Hajj [Text] / Q. Ahmed, Y. Arabi, Z. Memish // Lancet. Elsevier. – 2006. – Vol. 367. – № 9515. – P. 1008-1015.
94. Yamin, M. Framework for Improved Hajj Management and Future Research [Text]/ M. Yamin // ENTIC Bull. – 2008. – Vol. 2. – № 8.
95. 10 трагических случаев массовой гибели людей в результате давки [Электронный ресурс], – Режим доступа: www.muz4in.net/news/10_samykh_tragicheskikh_sluchaev_massovoj_gibeli_ljudej_v_rezultate_davki/2014-08-22-36617/

96. Давка в Багдаде [Электронный ресурс], – Режим доступа: www.chrontime.com/sobytiya-smertonosnaya-davka-v-bagdade-vo-vremya-religioznyh-meropriy/
97. Трагедия на Хиллсборо [Электронный ресурс], – Режим доступа: www.championat.com/football/article-31558-tragedija-na-khillsboro.html
98. Au, S. Y. Z. Managing Crowd Safety in Public Venues: A study to generate guidance for venue owners and enforcing authority inspectors [Text] / S. Y. Z Au, M. C. Ryan, M. S. Carey, S. Yzau // HSE contract research report №53/ 1 993 – 1993. – 322 p.
99. Трагедия на футбольном матче «Спартак» - «Харлем» (1982) [Электронный ресурс], – Режим доступа: www.ria.ru/spravka/20121020/903599851.html/
100. Трагедия на Немиге [Электронный ресурс], – Режим доступа: www.chrontime.com/sobytiya-tragediya-na-nemige/
101. Исаков, Т.А. Модель поведения различных клиентских групп в системе управления транспортного узла [Текст] / Т. А. Исаков // Наука и техника транспорта. – 2016. – № 3. – С. 79-89.
102. Транспортная глава Заявочной книги Российской Федерации к Чемпионату мира по футболу 2018/2022 г. М. 2009. – 66 с.
103. Концепция транспортного обеспечения Чемпионата мира по футболу FIFA 2018 в России. М. 2012. – 117 с.
104. Исаков, Т.А. Имитационное моделирование функционирования транспортного узла [Текст] / Т. А. Исаков // Труды пятой научно-технической конференции с международным участием ИСУЖТ. – 2016. – С. 221-225.
105. Подсчет расстояния Хэмминга на большом наборе данных [Электронный ресурс], – Режим доступа: www.habr.com/ru/post/211264/
106. Борчанинов, М. Г. Корпоративные информационные системы на железнодорожном транспорте Э.К. Лецкого и В.В. Яковлева [Текст] / М. Г.

- Борчанинов, Э. К. Лецкий, И. В. Маркова и др. // М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте. – 2013. – 256 с.
107. Искаков, Т. А. Организация транспортного обеспечения стадиона «Лужники» на примере футбольного матча 11.11.2017 [Текст] / Т. А. Искаков // Автоматика на транспорте. – 2018. – Vol. 4. – № 2. – С. 279-296.
108. Кузнецов, Н. А. Методы анализа и синтеза модульных информационно-управляющих систем [Текст] / Н. А. Кузнецов, В. В. Кульба, С. С. Ковалевский, С. А. Косячко // Монография. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2002. – 800 с.
109. Шульц, В. Л., Кульба, В. В., Шелков, А. Б., Чернов, И. В. Информационное управление в условиях глобализации [Текст]: монография. Москва: Российский государственный гуманитарный университет, 2017. – 130 с.
110. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. Р 50.1.028-2001 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200028629>
111. Купчинская, Ю. А. Основы управления качеством: цикл PDCA [Текст] / Ю. А. Купчинская, С. А. Чеховская // Бизнес-образование в экономике знаний. – 2016. – С. 36-37.
112. Жемчугов, М. К. Цикл PDCA Деминга: Современное развитие [Текст] / М. К. Жемчугов, А. М. Жемчугов // Проблемы экономики и менеджмента. – 2016. – № 2(54). – С. 3-28.
113. Айриев, Р. С. Показатели качества транспортного обслуживания [Текст] / Р. С. Айриев, М. А. Кудряшов // Мир транспорта. – 2018. – Vol. 4. – № 16. – С. 140-150.
114. Хрущева, Д. С. Математическое моделирование пассажиропотока на станции «Пионерская» метрополитена г. Санкт-Петербурга / Д. С. Хрущева // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2004. – № 1. – С. 95-99.

115. Плаксина, Н. В. Методы математического моделирования пассажиропотоков в транспортных системах [Текст]: дисс. канд. тех. наук 05.13.18 / Плаксина Нина Владимировна. Петрозаводский государственный университет. – 2014. – 132. с
116. Исаков, Т. А. Математическая модель пассажиропотоков внутри транспортного узла при пиковых нагрузках [Текст] / Т. А. Исаков // Труды научно-практической конференции «Неделя науки–2017». – 2017. – № 1. – С. 36.
117. Седякин, Н. М. Элементы теории случайных импульсов [Текст] / Н. М. Седякин // Советское радио. – 1965. – 264 с.
118. Солодовников, В. В. Техническая кибернетика. Теория автоматического управления. Книга 3. Часть 1. [Текст] / В. В. Солодовников // М.: Машиностроение, 1969. – 608 с.
119. Ivnitski, V. Queuing system with "generalized processor-sharing" and dependence of service rate on residual work [Text] / V. Ivnitski, O. Ivnitski // Информационные процессы. – Vol. 2. – № 2. – P. 195-197.
120. Ивницкий, В.А. Теория сетей массового обслуживания [Текст] / В. А. Ивницкий // 2004. – 772 с.
121. Исаков, Т. А. Оценка пропускной способности транспортной инфраструктуры спортивных объектов [Текст] / Т. А. Исаков // Труды научно-практической конференции «Неделя науки–2016». – 2016. – Vol. Секция III. – С. 36.
122. Соколов, В.Б. Имитационная модель пассажиропотоков метрополитена [Текст] / В. Б. Соколов, К. Г. Сорокин // В сб. тезисов 58-й научно-технической конференции с участием студентов, молодых специалистов и ученых, ПГУПС. – 1998. – (4.8.)
123. Введение в моделирование пешеходных потоков [Электронный ресурс] – Режим доступа:www.habr.com/ru/post/158975/

124. Соколов, В. А. Методика получения динамической матрицы корреспонденций пассажиропотоков на метрополитене [Текст] / В. А. Соколов, В. Б. Соколов, О. Ю. Максименко // В сб. тезисов 62-й научно-технической конференции с участием студентов, молодых специалистов и ученых, ПГУП. – 2002. – (4.8.)
125. Исаков, Т. А. Безопасность транспортного обеспечения при проведении культурно-массовых мероприятий [Текст] / Т. А. Исаков // Труды научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – 2016. – Vol. Секция III. – С. 14.
126. Исаков, Т.А. Транспортное обеспечение крупномасштабных культурно-массовых и спортивных мероприятий [Текст] / Т. А. Исаков // Труды студенческой научно-практической конференции «Электронный бизнес. Управление интернет-проектами. Инновации». – 2015. – С. 15-17.
127. Введение в моделирование пешеходных потоков [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.anylogic.ru.
128. Веников, В. А. Моделирование электрических систем при помощи вращающихся машин [Текст] / В. А. Веников // Электричество. – 1939. – № 9. – С. 48-51.
129. Веников, В. А. Физическое моделирование Электрических систем [Текст] / В. А. Веников // Госэнергоиздат. – 1965. – 282 с.
130. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики [Текст] / В. А. Веников // Высшая школа. – 1966. – 487 с.
131. Карликов, В. П. Метод приближенного учета влияния стенок при кавитационном обтекании тел в гидродинамических трубах [Текст] / В. П. Карликов, Г. И. Шоломович // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. – 1966. – № 4. – С. 89.
132. Mehran, R. Abnormal Crowd Behavior Detection using Social Force Model [Text] / R. Mehran, A. Oyama, M. Shah // IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recongition (CVPR), Miami. – 2009.

133. Качанова, Л. С. Модели систем массового обслуживания [Текст] / Л. С. Качанова // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина». – 2009. – № 8. – С. 75-78.
134. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и её инженерное применение. [Текст] / Е. В. Вентцель, Л. А. Овчаров // М.: Наука, 2003. – 47 с.
135. Вентцель, Е. С. Исследование операций. Задачи. Принципы. Методология. [Текст] / Е. В. Вентцель // Москва: Наука, Главная редакция физ.- мат. литературы, 1980. – 203 с.
136. Burks, A. Essays on Cellular Automata [Text] / A.W. Burks // University of Illinois Press, 1970. – 11 p.
137. Материалы сайта RunTheModel [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.runthemodel.com
138. МВД СССР. Система стандартов «Пожарная безопасность». Общие требования. 1992. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/9051953>
139. Михеева, Т. В. Обзор существующих программных средств имитационного моделирования при исследовании механизмов функционирования и управления производственными системами [Текст] / Т. В. Михеева // Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – С. 87-90.
140. Характеристика системы Anylogic [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.anylogic.ru.
141. Материалы сайта Arena [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.arenasimulation.com
142. Материалы сайта MATLAB [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.matlab.ru.
143. Материалы сайта GPSS [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.gpss.ru.
144. Rudan, J. Performance analysis of MILP based model predictive control algorithms for dynamic railway scheduling / J. Rudan, B. Kersbergen.

145. Albrecht, A. R.. Rescheduling rail networks with maintenance disruptions using Problem Space Search / A. R. Albrecht, D. M. Panton, D. H. Lee.
146. Логинова, Л. Н. Роль системы автоматизированной проверки знаний поездных диспетчеров линии метрополитена в повышении качества обучения [Текст] / Л. Н. Логинова // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 1. – С. 62-65.
147. Моисеев, А. А. Энергетически оптимальное управление движением подвижного состава с дискретным регулированием силы тяги [Текст] / А. А. Моисеев // Межвузовский сб. науч. тр. – 1989. – № 811. – С. 15-19.
148. Hu, H. A multi-objective train-scheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving [Text] / H. Hu, K. Li, X. Xu // Journal of Modern Transportation. – 2013. – № 21. – P. 9-16.
149. Тишкин, Е. М. Автоматизированный расчет графиков движения поездов метрополитена [Текст] / Е. М. Тишкин, А. Н. Феофилов // Вестник ВНИИЖТ. – 1989. – № 2. – С. 8-9.
150. Василенко, М. Н. Автоматическое построение графиков движения поездов на метрополитене [Текст] / М. Н. Василенко, Д. П. Дегтярев, О. А. Максименко // Труды международной конференции «Транспорт XXI век». Варшава. – 2001.
151. Christian, S. Railway scheduling problems and their decomposition [Text] / S. Christian // Osnabruck. 2007. – 123 p.
152. Bruker, P. Scheduling Algorithms[Text] / P. Bruker // Leipzig: Springer, 2007. – 371 p.
153. Zhao, J. A genetic-algorithm-based approach for scheduling the renewal of railway track components [Text] / J. Zhao, A. H. C. Chan, M. P. N. Burrow // Rail Rapid Transit. – 2009. – № 223. – P. 533-541.

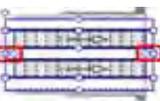
154. Mišauskaitė. Algorithm for Optimal Supplement of Train Traffic Schedule” in: Automatizavimas, Rototechnika [Text] / Mišauskaitė // Electronic and electrical engineering. – 2006. – Vol. 125. – № 7(71). – P. 43-46.
155. Материалы сайта Opklare [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.opklare.ru/m/passajiropotok_moskovskogo_metropolitena
156. Материалы сайта Комсомальская правда [Электронный ресурс] - Режим доступа: www.kp.ru/daily/26541.7/3558103/
157. Исаков, Т. А. Использование информационных систем при организации культурно-массовых мероприятия [Текст] / Т. А. Исаков // Труды международной научно-технической и научно-методической конференции «Современные технологии в науке и образовании СНТО–2016. – 2016. – Vol. 2. – С. 99-103.
158. ГОСТ Р 50850-96 Вагоны метрополитена. Общие технические [Электронный ресурс] – Режим доступа: docs.cntd.ru/document/1200027990/
159. Исаков, Т. А. Моделирование пешеходных потоков на станции метрополитена во время проведения культурно-массового мероприятия [Текст] / Т. А. Исаков // Труды международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» ИПУ РАН–XXIV. – 2016. – С. 356-360.
160. Константинова, Т.Ю. Методы и средства оптимизации режимов [Текст]: дисс. канд. технич. наук: 05.22.08 / Константинова Татьяна Юрьевна. – Санкт-Петербург, Петербургский государственный университет путей сообщения, 2006. – 177 с.
161. Жалобы на организацию матча Россия–Аргентина [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.rbc.ru/rbcfreenews/5a077c9b9a79472ae2035c1f
162. Материалы сайта Sports.ru [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.sports.ru/tribuna/blogs/odukhevremeni/1470413.html

163. Открытие вестибюля станции «Спортивная» [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.tass.ru/moskva/4490186
164. Ограничение движения в районе Лужников 11.11.2017 [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.mos.ru/news/item/32045073/
165. Давка в Лужниках 11.11.2017 [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.sport-express.ru/football/friendly/reviews/davka-v-luzhnikah-narod-gnali-peshkom-do-parka-kultury-1334041/
166. Исаков, Т. А. Функционирование транспортной инфраструктуры по окончании культурно-массового мероприятия [Текст] / Т. А. Исаков // Труды научно-практической конференции «Неделя науки-2018». – 2018. – № 3. – С. 37-38.

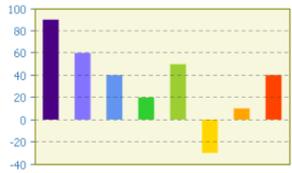
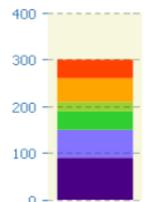
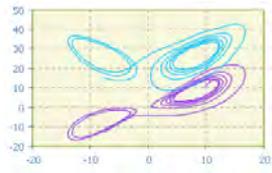
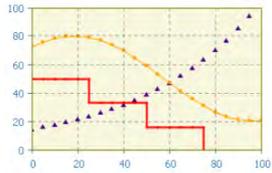
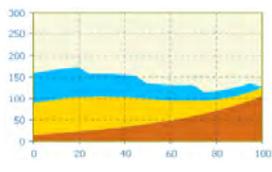
Приложение А

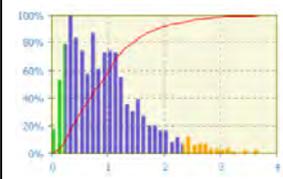
Описание блоков моделей Anylogic

Название	Элемент	Функция	Атрибуты
<i>PedSource</i>		Создание агентов (пешеходов) в модели.	<ul style="list-style-type: none"> – область появления; – интенсивность появления; – тип агента.
<i>PedSink</i>		Удаление агентов из модели.	<ul style="list-style-type: none"> – действие при событии; – тип агента.
<i>PedGoTo</i>		Определение маршрута движения агентов.	<ul style="list-style-type: none"> – режим следования; – область следования; – действие при событии; – тип агента.
<i>PedService</i>		Определение параметров обслуживания агентов.	<ul style="list-style-type: none"> – система обслуживания; – время обслуживания; – действие при событии; – тип агента.
<i>PedWait</i>		Определение параметров ожидания агентов.	<ul style="list-style-type: none"> – область ожидания; – время ожидания; – действие при событии; – тип агента.
<i>PedSelectOutput</i>		Выбор маршрута движения.	<ul style="list-style-type: none"> – параметры выбора; – действие при событии; – тип агента.
<i>PedAreaDescriptor</i>		Преобразует скорость движения или задает движущуюся поверхность.	<ul style="list-style-type: none"> – область; – скорость движения; – параметры выбора; – действие при событии; – тип агента.
<i>PedEscalator</i>		Моделирует перемещение пешеходов по эскалатору.	<ul style="list-style-type: none"> – эскалатор; – время обслуживания; – действие при событии; – тип агента.
<i>PedSettings</i>		Определяет свойства агентов.	<ul style="list-style-type: none"> – временной шаг; – действие при событии; – тип агента.

<i>TargetLine</i>		Обозначает линии появления и следования на маршруте.	<ul style="list-style-type: none"> – местоположение – размер; – количество.
<i>PedServices</i>		Обозначает системы обслуживания.	<ul style="list-style-type: none"> – количество сервисов и очередей; – правила обслуживания; – пропускная способность; – местоположение; – внешний вид.
<i>Escalator Group</i>		Обозначает эскалатор.	<ul style="list-style-type: none"> – количество платформ эскалатора; – местоположение; – направление; – правила обслуживания; – пропускная способность; – внешний вид.
<i>Area</i>		Обозначает области следования.	<ul style="list-style-type: none"> – местоположение; – размер; – внешний вид; – вместимость.
<i>Pathway</i>		Обозначает рамки и направление виртуальных коридоров на пути движения агентов.	<ul style="list-style-type: none"> – местоположение; – направление; – размер; – внешний вид.
<i>Wall</i>		очерчивает допустимые зоны передвижения, границы модели.	<ul style="list-style-type: none"> – местоположение; – размер; – внешний вид.

Описание блоков статистики

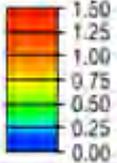
Название	Элемент	Функция	Атрибуты
<i>Bar chart</i>		Отображает несколько элементов данных в виде столбцов, «растущих» в заданном направлении от базовой линии.	<ul style="list-style-type: none"> — источник данных; — обновление данных; — внешний вид; — местоположение; — размер; — легенда; — область диаграммы; — шкала значений; — элементы данных.
<i>Stack chart</i>		Показывает вклад нескольких элементов данных в суммирующий результат в виде столбцов, расположенных друг над другом.	
<i>Plot</i>		Отображает зависимость Y-составляющих значений набора данных от соответствующих им X-составляющих.	
<i>Time Plot</i>		Отображает динамику изменения (временной тренд) одного или сразу нескольких наборов данных в течение последних N единиц модельного времени.	
<i>Time Stack Chart</i>		Отображает в виде располагающихся друг над другом областей историю (временной тренд) вклада нескольких наборов данных в	

		общую составляющую в течение последних N единиц модельного времени.	
<i>Histogram</i>		Отображает данные, в зависимости от выбранных функций (функция плотности вероятности, функция распределения и линия среднего значения).	

Описание дополнительных инструментов.

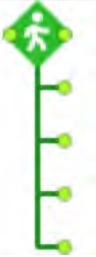
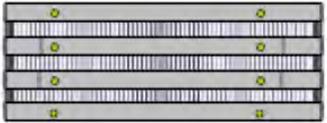
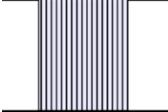
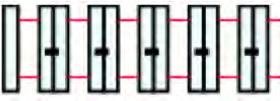
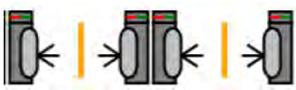
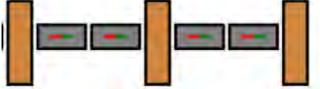
Название	Элемент	Функция	Атрибуты
<i>Agent</i>		Создание популяций агентов	<ul style="list-style-type: none"> – название (имя); – начальная / комфортная скорость движения; – размер агента (диаметр); – тип агента; – внешний вид; – действие при событии.
<i>Parameter</i>		Определение статических характеристик агента	<ul style="list-style-type: none"> – название (имя); – тип данных; – тип параметра; – единицы измерения; – значение по умолчанию.
<i>Function</i>		Задаёт определенную последовательность действий, которую нужно будет выполнять из разных мест (или в разные моменты жизни) модели.	<ul style="list-style-type: none"> – название (имя); – тип возвращаемого значения; – аргументы; – тело функции.

<i>Variable</i>		Моделирование изменяющихся характеристик агента или для хранения результатов работы модели.	<ul style="list-style-type: none"> – название (имя); – тип переменной; – начальное значение.
<i>Event</i>		Планирование действий в модели (задержки, таймауты и т.д.).	<ul style="list-style-type: none"> – название (имя); – режим; – время срабатывания; – период; – интенсивность; – условие.
<i>Collection</i>		Создание объекта данных, объединяющего в себе сразу несколько однотипных элементов. разновидность переменной.	<ul style="list-style-type: none"> – название (имя); – класс коллекции.
<i>Schedule</i>		Задаёт цикличность, согласно которой значение какой-то величины изменяется с ходом времени.	<ul style="list-style-type: none"> – название (имя); – тип данных; – источник данных; – тип расписания; – действие.
<i>Data set</i>		Двумерный массив измерений, позволяющий сохранять данные по ходу работы модели с помощью.	<ul style="list-style-type: none"> – название (имя); – значения; – обновление данных; – методы для работы.
<i>Statistics</i>		Вычисляет основную статистическую информацию (среднее значение, минимум, максимум и т.д.) для последовательности измеренных значений.	<ul style="list-style-type: none"> – название (имя); – значения; – обновление данных; – методы для работы.
<i>Histogram data</i>		Выполняет обычный статистический анализ добавляемых значений. Производит построение функции плотности распределения вероятности и интегральной функции распределения. Вычисляет верхний и нижний процентиля.	<ul style="list-style-type: none"> – название (имя); – значения; – диапазон значений; – обновление данных; – расчет CDF(интегральная функция распределения); – методы для работы.

<i>Density Map</i>	 <p>1.50 1.25 1.00 0.75 0.50 0.25 0.00</p>	Динамически отображает загрузженность агентами моделируемого пространства.	<ul style="list-style-type: none"> – местоположение; – внешний вид.
<i>Ped Flow Statistics</i>		Позволяет собирать статистику по интенсивности пешеходных потоков, проходящих в моделируемом пространстве через заданную линию.	<ul style="list-style-type: none"> – название (имя); – местоположение; – направление; – размер; – внешний вид.

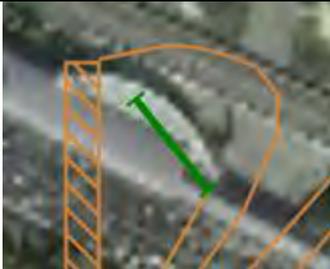
Приложение В

Описание имитационной модели №1

Название	Элемент	Графическое изображение	Функция
<i>A1_pedSource</i> <i>A2_pedSource</i> <i>A3_pedSource</i> <i>A4_pedSource</i> <i>A5_pedSource;</i>			Прибытие клиентских групп на станцию метрополитена (добавление агентов в модель).
<i>pedSource_V..Highway</i>		X	Прибытие клиентских групп через Волоколамское шоссе.
<i>selectOutput1</i> <i>selectOutput2</i> <i>selectOutput3</i> <i>selectOutput4;</i>		X	Выбор приоритетного выхода со станции метрополитена.
<i>pedSelectService_Stadium</i>		X	Выбор приоритетной входной группы на стадион
<i>pedEscalator</i>			Подъем по эскалатору.
<i>pedAreaDescriptor</i>			Подъем по маршевой лестнице.
<i>E1_pedService1</i> <i>E1_pedService2</i> <i>E2_pedService1;</i>			Проход через турникеты на станции метрополитена.
<i>pedService_turnstiles_L1</i> <i>pedService_turnstiles_L2</i> <i>pedService_turnstiles_R1</i> <i>pedService_turnstiles_R2</i>			Проход через турникеты на стадионе.
			Проход через рамки-металлоискатели на стадионе.
<i>E1_pedGoTo,</i> <i>E2_pedGoTo2</i>			Проход через двери метрополитена.

<i>pedGoTo_entrance_group</i> <i>pedGoTo_Stadium</i>		X	Проход к входным группам. Проход к трибунам стадиона.
<i>E1_pedSink</i>		X	Выход из зоны разграничения.

Описание имитационной модели №2

Название	Элемент	Графическое изображение	Функция
<i>PedSource</i>			Выход клиентских групп со стадиона.
<i>PedSource1</i>			
<i>PedSource2</i>			
<i>PedSource3</i>			
<i>PedGoTo,</i> <i>PedGoTo1</i> <i>PedGoTo2</i> <i>PedGoTo3</i>		X	Проход к станции Лужники (МЦК), станции Спортивная (метро), станции Воробьевы горы (метро), наземному общественному транспорту.
<i>PedSink</i>		 (пример)	Выход из зоны разграничения.

Приложение С

Прибытие представителей клиентских групп на станцию при ПГД 100 сек

Время прибытия поезда на станцию	Количество представителей клиентской группы в прибывающем поезде					Всего	Доля болельщиков от максимальной вместимости поезда При плотности 5 чел./1 м ²
	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5		
16:00:01	17	10	10	10	1	48	3%
16:01:41	17	10	15	20	2	64	4%
16:03:21	17	10	20	30	2	79	5%
16:05:01	17	10	30	30	4	91	6%
16:06:41	17	10	40	40	5	112	8%
16:08:21	26	15	60	40	5	146	10%
16:10:01	26	15	60	50	5	156	11%
16:11:41	26	15	70	50	5	166	11%
16:13:21	26	15	80	50	5	176	12%
16:15:01	26	15	90	50	5	186	13%
16:16:41	26	15	90	50	5	186	13%
16:18:21	26	15	60	50	5	156	11%
16:20:01	26	15	60	50	5	156	11%
16:21:41	26	15	70	60	6	177	12%
16:23:21	26	15	80	70	6	197	14%
16:25:01	51	30	90	70	7	248	17%
16:26:41	51	30	100	75	8	264	18%
16:28:21	51	30	110	80	10	281	19%
16:30:01	51	30	120	85	10	296	20%
16:31:41	51	30	130	90	10	311	21%
16:33:21	51	30	140	95	10	326	23%
16:35:01	51	30	150	100	10	341	24%
16:36:41	51	30	150	100	12	343	24%
16:38:21	51	30	150	100	12	343	24%
16:40:01	51	30	150	100	14	345	24%
16:41:41	51	30	150	100	14	345	24%
16:43:21	51	30	150	110	15	356	25%
16:45:01	51	30	150	110	16	357	25%
16:46:41	51	30	150	110	17	358	25%
16:48:21	51	30	150	110	20	361	25%
16:50:01	68	40	150	120	20	398	27%
16:51:41	68	40	150	120	20	398	27%
16:53:21	68	40	150	120	20	398	27%
16:55:01	68	40	150	120	20	398	27%
16:56:41	68	40	150	120	20	398	27%
16:58:21	68	40	150	120	20	398	27%
17:00:01	68	40	150	120	25	403	28%

17:01:41	68	40	150	120	25	403	28%
17:03:21	68	40	150	120	26	404	28%
17:05:01	68	40	150	110	27	395	27%
17:06:41	68	40	150	100	28	386	27%
17:08:21	68	40	150	80	30	368	25%
17:10:01	68	40	150	60	30	348	24%
17:11:41	85	50	150	40	30	355	25%
17:13:21	119	70	150	10	30	379	26%
17:15:01	170	100	150	10	35	465	32%
17:16:41	204	120	150	10	35	519	36%
17:18:21	221	130	150	10	40	551	38%
17:20:01	255	150	150	10	40	605	42%
17:21:41	289	170	150	10	40	659	46%
17:23:21	306	180	150	10	40	686	47%
17:25:01	340	200	150	8	40	738	51%
17:26:41	357	210	150	5	45	767	53%
17:28:21	374	220	150	5	45	794	55%
17:30:01	391	230	140	5	45	811	56%
17:31:41	408	240	130	5	45	828	57%
17:33:21	417	245	120	5	45	832	57%
17:35:01	434	255	110	5	45	849	59%
17:36:41	442	260	100	5	45	852	59%
17:38:21	451	265	100	5	45	866	60%
17:40:01	459	270	80	5	45	859	59%
17:41:41	493	290	50	5	45	883	61%
17:43:21	519	305	50	5	45	924	64%
17:45:01	519	305	40	5	45	914	63%
17:46:41	519	305	20	5	50	899	62%
17:48:21	527	310	10	5	50	902	62%
17:50:01	519	305	5	5	50	884	61%
17:51:41	519	305	5	5	60	894	62%
17:53:21	374	220	5	5	60	664	46%
17:55:01	357	210	5	5	65	642	44%
17:56:41	204	120	5	5	65	399	28%
17:58:21	85	50	5	5	65	210	15%
18:00:01	68	40	5	5	65	183	13%
18:01:41	68	40	5	5	65	183	13%
18:03:21	51	30	5	1	60	147	10%
18:05:01	51	30	5	1	50	137	9%
18:06:41	51	30	5	1	40	127	9%
18:08:21	43	25	5	1	30	104	7%
18:10:01	34	20	5	1	15	75	5%
18:11:41	26	15	5	1	15	62	4%

18:13:21	17	10	5	1	13	46	3%
18:15:01	1	1	1	1	1	5	0%

Прибытие представителей клиентских групп на станцию при ПГД 160 сек

Время прибытия поезда на станцию	Количество представителей клиентской группы в прибывающем поезде					Всего	Доля болельщиков от максимальной вместимости поезда При плотности 5 чел./1 м ²
	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5		
16:00:01	60	50	80	50	5	245	17%
16:02:41	80	50	80	50	5	265	18%
16:05:21	100	50	80	50	5	285	19%
16:08:01	100	50	80	50	5	285	19%
16:10:41	100	60	150	70	5	385	26%
16:13:21	100	70	160	80	5	415	28%
16:16:01	120	100	170	90	5	485	33%
16:18:41	140	140	170	120	5	575	39%
16:21:21	150	180	180	150	5	665	45%
16:24:01	160	180	190	180	5	715	49%
16:26:41	180	190	200	200	5	775	53%
16:29:21	190	190	200	220	5	805	55%
16:32:01	200	190	200	220	5	815	56%
16:34:41	230	190	210	200	5	835	57%
16:37:21	250	190	220	200	5	865	59%
16:40:01	270	190	225	190	5	880	60%
16:42:41	280	190	225	180	5	880	60%
16:45:21	300	190	230	170	5	895	61%
16:48:01	350	240	240	160	5	995	68%
16:50:41	370	230	240	150	5	995	68%
16:53:21	400	240	240	110	10	1000	68%
16:56:01	450	280	240	70	20	1060	72%
16:58:41	430	290	240	50	30	1040	71%
17:01:21	435	280	240	50	40	1045	71%
17:04:01	450	250	240	50	60	1050	72%
17:06:41	450	235	240	40	80	1045	71%
17:09:21	450	225	240	30	100	1045	71%
17:12:01	450	210	240	30	110	1040	71%
17:14:41	450	210	240	30	135	1065	73%
17:17:21	450	200	220	30	140	1040	71%
17:20:01	435	170	190	30	140	965	66%
17:22:41	430	150	140	30	145	895	61%
17:25:21	410	150	100	30	140	830	57%
17:28:01	400	150	100	30	135	815	56%
17:30:41	400	150	100	30	130	810	55%

17:33:21	400	150	100	30	110	790	54%
17:36:01	350	150	100	30	100	730	50%
17:38:41	300	140	100	30	90	660	45%
17:41:21	250	130	100	30	85	595	41%
17:44:01	180	110	100	30	75	495	34%
17:46:41	150	100	100	30	65	445	30%
17:49:21	140	80	80	30	60	390	27%
17:52:01	130	70	70	30	50	350	24%
17:54:41	110	60	60	30	30	290	20%
17:57:21	110	50	50	10	10	230	16%
18:00:01	110	50	50	10	10	230	16%
18:02:41	110	50	50	10	10	230	16%
18:05:21	80	50	50	10	10	200	14%
18:08:01	50	50	50	10	10	170	12%
18:10:41	40	20	20	10	10	100	7%
18:13:21	20	20	20	0	10	70	5%

Приложение D

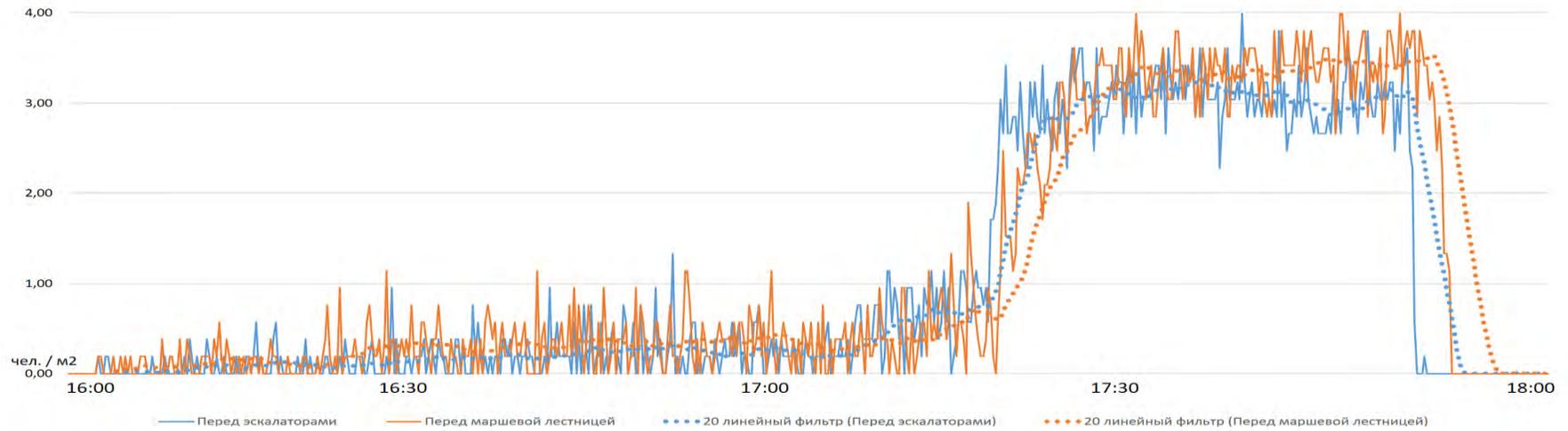


График плотности пассажиропотока перед выходами

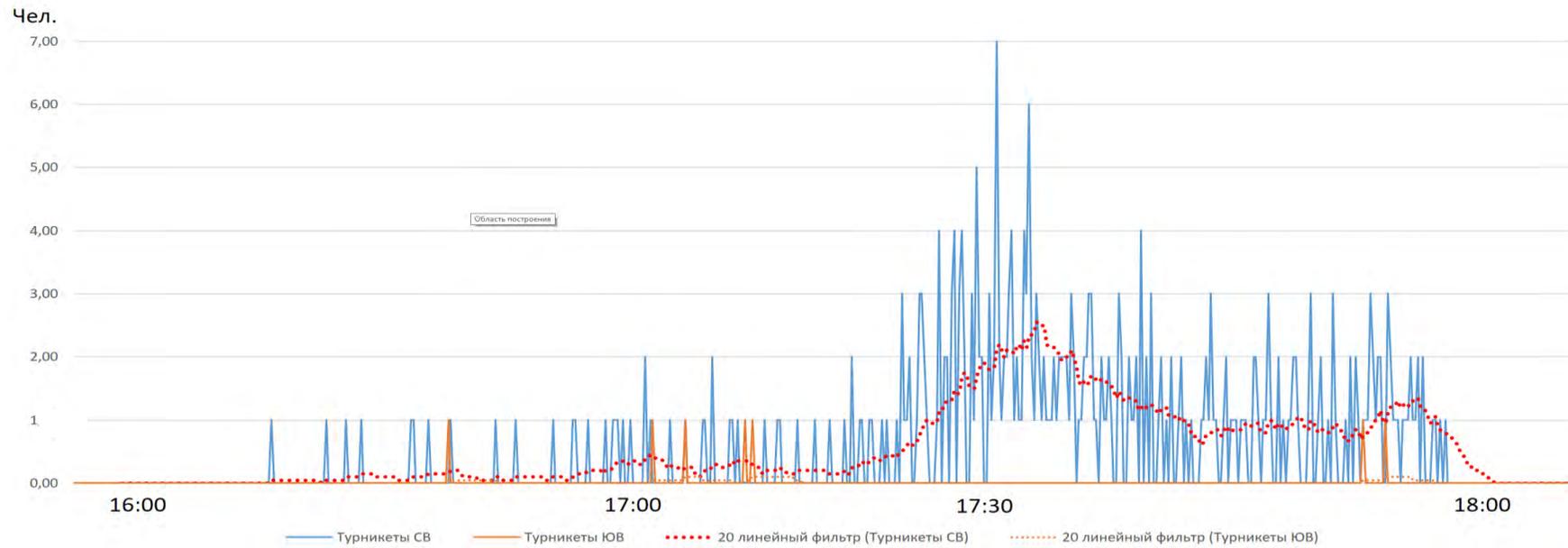


График длин очередей перед турникетами



ООО «СТАДИОН «СПАРТАК»

Место нахождения: 125424, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 69
Почтовый адрес: 125424, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 69, стр. 1
☎ (495) 530-95-00, 530-95-01 E-mail: info@stadion Spartak.ru
ОГРН 1047796801920 ИНН 7709574093 КПП 773301001

06 мая 2019 г.

АКТ

о практическом использовании результатов диссертационной работы
Искакова Тимура Анвяровича
«Автоматизация планирования транспортного обеспечения
крупномасштабных культурно-массовых мероприятий»

Основные результаты диссертационной работы Искакова Тимура Анвяровича нашли применение при планировании и проведении крупномасштабных культурно-массовых мероприятий на стадионе «Спартак», а именно:

– анализ чрезвычайных ситуаций при проведении крупномасштабных культурно-массовых мероприятий, клиентские группы посетителей и зоны разграничения крупномасштабного культурно-массового мероприятия позволили систематизировать накопленный опыт прошедших мероприятий на стадионе;

– реализована предложенная автором методика автоматизированного планирования транспортного обеспечения, учитывающая качества обслуживания пешеходного потока посетителей мероприятий;

– результаты имитационных экспериментов и предложенные требования и рекомендации, необходимые для достижения целевых значений критериев качества, дающих оценку функционированию объектов инфраструктуры при пиковых нагрузках, эффективности управления пешеходными потоками зрителей, времени эвакуации в различных зонах разграничений, транспортной доступности крупномасштабного культурно-массового мероприятия.

Директор по эксплуатации
ООО «Стадион Спартак»



И.И. Ячменцев

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор РУТ

д.т.н., профессор


В.В. Виноградов

« 9 » 12 2019 г.



СПРАВКА

о практическом использовании результатов диссертационной работы
Искакова Тимура Анвяровича
«Автоматизация регулирования пассажиропотока при проведении
крупномасштабных культурно-массовых мероприятий»

Результаты, полученные Искаковым Тимуром Анвяровичем в диссертационной работе, используются в методическом обеспечении дисциплин «Математическое моделирование объектов и систем управления» и «Автоматизированные информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте» по направлениям подготовки 27.03.04 – «Управление в технических системах» (профиль «Управление и информатика в технических системах», бакалавриат) и 27.04.04 – «Управление в технических системах» (программа «Управление и информатика в технических системах», магистратура);

Заведующий кафедрой «Управление и
защита информации»,
д.т.н., профессор

Л.А. Баранов

Ученый секретарь кафедры «Управление и
защита информации»,
к.т.н., доцент

А.И. Сафронов