

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Кафедра «Прикладная математика и информатика»  
(наименование)

01.03.02 Прикладная математика и информатика  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Компьютерные технологии и математическое моделирование  
(направленность (профиль)/специализация)

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Моделирование движения пешеходов.

Обучающийся

В.С. Чаплыгин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.ф.м.н., доцент, Г.А. Тырыгина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Консультант

к.п.н., доцент С. А. Гудкова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2024

## **Аннотация**

Тема данной выпускной квалификационной работы: «Моделирование движения пешеходов».

Бакалаврская работа содержит пояснительную записку объемом 45 страниц, 12 рисунков и список используемой литературы, состоящей из 20 источников.

Объект исследования – пешеходное движение в общественном месте.

Предмет исследования – компьютерное моделирование и анализ процессов движения пешеходов.

Целью работы является разработка и анализ компьютерной модели пешеходного моделирования.

Область применения – область в повышении общественной безопасности, для разработки планов эвакуации, оптимизации интенсивного движения, планирования мест массового скопления людей.

Значимость данной работы – улучшение безопасности и эффективности общественных мест, повышение уровня комфорта для пользователей городской инфраструктуры, которое позволяет.

Результатом работы является создание и изучение имитационной модели движения пешеходов, которую можно использовать для правильного планирования пешеходных потоков внутри помещений и во внешних пространствах, для планирования городской инфраструктуры, что важно для комфорта и безопасности людей.

## **Abstract**

The title of the graduation work is "Modeling Pedestrian Movement."

The bachelor's thesis comprises an explanatory note of 45 page, 12 figures, and a bibliography with 20 sources.

The object of the study is pedestrian traffic in public places.

The subject of the study is the modeling and analysis of pedestrian movement processes.

The aim of the work is the development and analysis of a computer model for pedestrian simulation.

The graduation work is divided into several parts: analysis of pedestrian movement patterns, development of the computer model, validation of the model against.

The application area of the work includes the development of evacuation plans, optimization of layouts for public places with high foot traffic, and overall enhancement of public safety and efficiency.

The significance of this work lies in improving the safety and efficiency of public spaces, enhancing the comfort level for users of urban infrastructure.

The special part of the project details the methodology used for pedestrian simulation, including algorithms and software tools. The model's effectiveness is validated through case studies in various urban environments, demonstrating its potential for real-world applications. The approach taken ensures compliance with safety regulations and aims at maximizing both efficiency and comfort in public spaces.

## Оглавление

Введение .....	5
Глава 1 Обзор подходов к моделированию имитационных систем .....	7
1.1 История имитационного моделирования .....	7
1.2 Понятие имитационного моделирования .....	10
1.3 Области применения пешеходного моделирования.....	12
1.4 Обзор программного обеспечения, используемого для имитационного моделирования.....	15
Глава 2 Материалы и методы, использованные в работе .....	23
2.1 Программное обеспечение для проведения эксперимента.....	23
2.2 Методы и алгоритмы, используемые в моделировании .....	27
Глава 3 Материалы и методы, использованные в работе .....	34
3.1 Описание элементов модели.....	34
3.2 Обзор программного обеспечения .....	35
3.3 Реализация модели.....	39
Заключение .....	42
Список используемой литературы .....	44

## Введение

В наше время сложно представить современный мир без имитационного моделирования, ведь оно играет очень важную роль в решении различных задач, особенно в оптимизации процессов массового обслуживания людей.

Актуальность данной темы обусловлена необходимостью эффективного управления потоком людей в различных общественных местах, движение пешеходов на улицах городов, в торговых центрах, на вокзалах и аэропортах имеет значимую роль в обеспечении безопасности и комфорта.

В данной выпускной квалификационной работе мы рассмотрим имитационное моделирование пешеходов в различных ситуациях, создадим модель и запустим симуляцию, посмотрим на изменение факторов, которые могут повлиять на изменение поведения пешеходов.

Объект исследования – пешеходное движение в общественных местах.

Предмет исследования – моделирование и анализ процессов движения пешеходов.

Целью данной работы является разработка и анализ компьютерной модели для оптимизации движения пешеходных потоков.

В соответствии с целями работы она имеет следующие задачи:

- изучение основ и методов имитационного моделирования;
- создание модели, а также проведение компьютерного эксперимента, с учётом различных факторов, которые влияют на движение пешеходов;
- анализ эффективности работы общественных мест с помощью модели, учитывающей различные варианты развития событий;
- оценка влияния различных решений на смоделированную систему.

Первая глава выпускной квалификационной работы содержит:

- анализ основных подходов в моделировании движения пешеходов;
- различные методы и подходы к имитационному моделированию потоков пешеходов, а также возможность их применения в различных условиях;

- выбор подходящего метода моделирования с учетом требований;
- обоснование выбора метода способом анализа и сравнения эффективности и простоты реализации каждого из методов.

Вторая глава представлена:

- описанием моделей;
- описанием выбранного метода моделирования;
- выбором сред разработки, соответствующих требованиям;
- выбором инструментов для реализации моделей.

Третья глава содержит реализацию моделирования на основе выбранных методов.

# Глава 1 Обзор подходов к моделированию имитационных систем

## 1.1 История имитационного моделирования

Имитационное моделирование возникло в 20–м веке. «Это дисциплина, которая пытается объяснить, как что-то работает, создавая его точную копию.» [24]. Активное развитие оно получило с расширением возможностей вычислительных машин. Основой для создания данного вида моделирования послужили работы по теории вероятностей и статистики. «Имитация – это численный метод проведения экспериментов с математическими моделями, описывающими поведение сложных систем во времени» [1]. Данные работы, а также развитие информационных систем и возможностей ЭВМ позволили моделировать сложные системы и процессы с множеством переменных.

«Моделирование – процесс отражения свойств одного объекта (оригинала) в другом объекте (модели). Это могут быть объекты «как есть» в целом и (или) их отдельные сущности – процессы и явления. Явления – например, поведение животного, состояния погоды – рассматриваются как сложные процессы.

В основу моделирования заложена процедура формализации – перевод свойств объекта на язык понятий предметной области, алгоритмов и математики.» [8].

«Направление статистического моделирования (в том числе методы Монте–Карло) является разновидностью имитационного моделирования. Первоначально это направление появилось в теории случайных процессов и математической статистике как способ вычисления статистических характеристик случайных процессов путем многократного воспроизведения течения процесса с помощью модели этого процесса.» [11].

Введение метода Монте–Карло в 40–х годах стало важным этапом в развитии. Метод использует случайные числа для имитации процессов, например распространение нейтронов в ядерных реакциях. «Теория

вероятностей является разделом математики, в котором изучаются математические модели случайных экспериментов, т. е. экспериментов, результаты которых заранее не известны.» [16].

Применение данного метода было использовано такими учеными как Станислав Улам, Джон фон Нейман и Энрико Ферми, работавшими в проекте Манхэттен.

В период 50–60-х годов развитие компьютерных технологий дало новый толчок имитационному моделированию. Были созданы первые программные продукты, способные проводить сложные расчеты. Тогда же были разработаны первые языки программирования, которые можно было использовать для создания моделей.

«Инструментальные средства имитационного моделирования – языки моделирования, появились довольно давно, почти одновременно с языками Fortran и Algol, и прошли путь от бурного развития в 70-х годах, когда они ежегодно рождались десятками, до современного стабильного состояния, когда доминирует лишь несколько языков. Наиболее широко используемые в настоящее время языки имитационного моделирования и инструментальные средства, их реализующие, подразделяются на три большие группы: языки имитационного моделирования непрерывных динамических систем; языки имитационного моделирования дискретных систем; универсальные языки.» [13].

В конце 20-го века и начале 21-го века отличились широким внедрением компьютерных технологий в коммерческую и производственную деятельность. Это привело к возможности расширить применение имитационного моделирования на таких областях, как логистика, управление производством, образование, здравоохранение и прочие области. Увеличение вычислительной мощности компьютеров и появление специализированного программного обеспечения позволило анализировать еще более сложные системы с большим количеством переменных и объектов взаимодействия.

«Важнейшим этапом моделирования является разделение входных

параметров по степени важности влияния их изменений на выходные. Такой процесс называется ранжированием (разделением по рангам).» [2].

Имитационное моделирование – это метод, применяемый в случаях, когда для объектов или систем отсутствуют аналитические модели или их создание невозможно. Отличием моделирования от аналитического подхода является то, что аналитический подход основан на решении дифференциальных уравнений и формулировании четких математических зависимостей между параметрами системы, а имитационное моделирование это процесс получения решений (численных) на основе экспериментов.

«Математическая модель – это некоторый эквивалент исследуемой системы или объекта, отражающий в математической форме важнейшие, с точки зрения исследователя, свойства, законы, которым он подчиняется, а также связи, присущие составляющим его частям.» [5].

Моделирование дает предположительную информацию об определенном фрагменте реальности. Проведя различные проверки, такая информация может оказаться истинной или ложной, вследствие чего возникает необходимость построения других моделей либо дополнения существующей.

Имитационная модель – это описание объекта/группы объектов или системы/группы систем, позволяющее проводить различные эксперименты с целью проектирования, анализа, а также оценки их функционирования. Данный метод моделирования чаще всего используется для получения численных решений задач, для которых либо отсутствует решение аналитическим методом, либо они неустойчивы и создание нецелесообразно.

«Имитационная модель отображает гораздо больше деталей, чем аналитическая. Это делает имитационную модель точнее, а прогнозы на ее основе – более определенными. Например, горнодобывающие компании смогут значительно сократить расходы, если оптимизируют использование ресурсов и сделают прогноз потребности в оборудовании.» [20].

В моделировании управления потоками людей, используемыми для

анализа и/или оптимизации процессов, существует множество подходов, методов и стратегий. При этом, каждая модель является упрощением реальной системы, даже наиболее проработанная.

«Модель должна адекватно реагировать на команды системы управления, т.е. в определенные моменты времени в ней должны происходить события, соответствующие конкретные действия, выполняемые в ответ на эти команды.» [21]. Современное имитационное моделирование включает в себя не только статистические методы, но и использование «BigData» для создания и тестирования моделей, а также использование систем искусственного интеллекта и машинного обучения. Наличие и доступность данных инструментов и методов позволяет специалистам с высокой точностью воспроизводить или прогнозировать поведение сложных систем в различных условиях. Имитационное моделирование на сегодняшний день является неотъемлемой частью современных научных и инженерных исследований.

«Компьютерное моделирование позволяет рассматривать процессы, происходящие в системе, на любом уровне детализации. При этом с помощью модели можно реализовать практически любой алгоритм управленческой деятельности или поведения системы. Кроме того, модели, которые допускают исследование аналитическими методами, также могут анализироваться имитационными методами. Все это служит причиной того, что методы компьютерного имитационного моделирования в настоящее время становятся одними из основных методов исследования сложных систем менеджмента.» [15].

## **1.2 Понятие имитационного моделирования**

Имитационное моделирование – это такой метод исследования, при котором создается упрощенная модель реально существующей системы, которая позволяет воспроизвести ее поведение при различных условиях. Модель может быть представлена в виде математических уравнений,

компьютерных программ или физических систем, которые имитируют процессы и условия, происходящие в реальной системе.

«Модель в общем смысле (обобщенная модель) – это создаваемый с целью получения и (или) хранения информации специфический объект (в форме мысленного образа, описания знаковыми средствами либо материальной системы), отражающей свойства, характеристики и связи объекта–оригинала произвольной природы, существенные для задачи, решаемой субъектом.» [3].

Основная цель имитационного моделирования – это понимание специфики работы и анализ поведения системы. «Его использует в качестве альтернативы проверке теорий и изменений в реальном мире.» [25]. Немаловажную роль играет и предсказание реакции системы на изменения входных параметров. Все это позволяет исследовать сложные процессы без необходимости проведения дорогостоящих и трудозатратных экспериментов с реальными объектами.

«Имитационная модель может учитывать более сложные взаимозависимости и поведение системы с течением времени.» [22]. Имитационные модели делятся на статические и динамические, а также на дискретные и непрерывные. Статические модели описывают систему в одном фиксированном состоянии, без учета изменений системы во времени, динамические же модели данные изменения учитывают. «Дискретное моделирование состоит из набора переменных состояния и механизма для изменения этих переменных в зависимости от времени события.» [23]. Дискретные модели описывают систему как последовательность отдельных событий, а непрерывные модели используют уравнения для описания непрерывных изменений. «Дискретно–событийное моделирование поддерживает средний и низкий уровни абстракции. Между ними находятся агентные модели, которые могут быть как очень детализированными, когда агенты представляют физические объекты, так и предельно абстрактными, когда с помощью агентов моделируются конкурирующие компании или

правительства государств.» [17].

Имитационное моделирование на данный момент широко используется в различных областях, таких как наука, техника, экономика, социальные науки. Данное моделирование позволяет исследовать взаимодействие различных компонентов системы, выявлять узкие места, а также оптимизировать процессы для достижения наилучших результатов.

Основные этапы имитационного моделирования:

- формулировка проблемы;
- определение целей моделирования;
- построение модели системы (концепт);
- программная реализация модели;
- эксперименты с моделью;
- анализ работы модели и интерпретация результатов.

Имитационное моделирование нужно для исследования любых систем и сложных процессов, для которых важно спрогнозировать и проанализировать проблемы, возникающие при создании модели.

«Дискретно-событийное моделирование обязано своим рождением Дж. Гордону, который в начале 1960-х спроектировал и реализовал на IBM систему дискретно-событийного программирования GPSS (Global Purpose Simulation System). Основной объект в этой системе – пассивный транзакт (заявка на обслуживание), который может определенным образом представлять собой работников, клиентов, покупателей, детали, сырье, документы, сигналы и т. п.» [9].

### **1.3 Области применения пешеходного моделирования**

Пешеходное моделирование изучает, как себя ведут пешеходы в различных условиях. Рассмотрим основные области пешеходного моделирования.

Область городского планирования – это вид моделирования, который

используют при проектировании общественных мест. Модели позволяют проанализировать проблемные места, а также помогают в предотвращении создания проблемных участков, в которых может образоваться затор или ухудшение безопасности движения

«Выбор архитектуры модели (как разделять модель на компоненты, что агрегировать, какой уровень детальности выбрать, какое поведение естественнее задавать с помощью диаграммы процесса, а какое – с помощью диаграммы состояний и т.д.) зависит в основном от опыта и интуиции разработчика моделей.» [12].

В области транспортных моделей подробный разбор пешеходного моделирования предотвращает ограничение движения пассажиров и транспортных средств на дорогах, аэропортах и железнодорожных станциях. Например, можно использовать моделирование для создания расписания движения поездов в часы пик, изменение длительности работы разрешающего сигнала светофора, а также в системах массового обслуживания добавление еще одного кассира в загруженные часы работы, чтобы минимизировать время ожидания в очередях, предотвратить массовое скопление людей, а также повысить общую эффективность транспортных систем. К примеру, с помощью моделей можно отследить влияние изменений в расписании общественного транспорта на движение потоков пассажиров и разработать меры для улучшения пропускной способности транспортных узлов.

Моделирование может быть использовано для оптимизации перемещений еще на стадии проектирования или перепланировок, например, в метро, в аэропортах, в крупных торговых центрах, на стадионах, внутри концертных залов и других общественных местах при существенном скоплении людей. Модели позволяют повысить удобство и комфорт пребывания в общественных местах и увеличить пропускную способность этих объектов. Также модели используются для анализа потоков перемещения людей в периоды пиковой нагрузки и позволяют разрабатывать или корректировать перечень мероприятий для снижения или предотвращения

скопления людей в общественных местах.

Создание моделей с последующим анализом играют очень важную роль в разработке планов эвакуации из мест общественного пользования, так как позволяют выявить уязвимые и проблемные места, оценить быстроту эвакуации и в последствии разработать комплекс корректирующих мероприятий при возникновении чрезвычайных ситуаций. Например, модели могут использоваться для анализа путей эвакуации из концертных залов, торговых центров, стадионов и других общественных мест. Модели позволяет определить наиболее оптимальные пути эвакуации для каждого помещения.

В медицинских учреждениях – больницах и поликлиниках моделирование может использоваться для оптимизации пути передвижения пациента, для уменьшения времени ожидания и улучшения качества обслуживания. Модели помогают в планировании оптимального расположения помещений по их функциональному назначению, чтобы определить места оптимального расположения регистратур, гардеробных, кабинетов приема врачей, кабинетов со специализированной диагностической аппаратурой и коммуникации для нее и прочих элементов необходимой инфраструктуры с целью повышения общей эффективности. Также модели используются для анализа перемещения пациентов в периоды больших нагрузок для создания мер по предотвращению локального скопления людей, что повышает удобство получения медицинских услуг.

Создание модели позволяет спланировать и перенаправить большие потоки людей при организации крупных мероприятий, таких как спортивные соревнования, концерты, фестивали. Это необходимо для обеспечения безопасности и комфорта всех участников, помогает оптимизировать размещение входов и выходов, положение сцены, зон отдыха, торговых точек и прочих элементов необходимой инфраструктуры. Также моделирование используется для анализа движения людей на стадионе, на трибунах во время спортивных мероприятий. Разработка плана передвижения осуществляется еще на стадии проектирования зданий для обеспечения лучшей проходимости

людей, для улучшения доступа к зонам стадиона.

Пешеходное моделирование активно используется в образовательных и научных целях. Учебные учреждения добавляют в программу обучения разные курсы по имитационному моделированию для того, чтобы студенты и заинтересованные люди осваивали разные методы и технологии. Модели помогают проводить безопасные исследования. В транспортных системах, системах безопасности и прочих областях, в которых может потребоваться анализ передвижения людей в различных условиях.

Создание моделей существенно помогает в разработке и тестировании новых технологий. К примеру, автоматизированные системы управления дорожного движения уменьшают нагрузку на участки дороги в часы, когда она сильно нагружена, путем изменения порядка реверсивного движения. Имитационное моделирование помогает при анализе влияния автоматизированных систем управления дорожного движения на безопасность и удобство передвижения транспорта.

#### **1.4 Обзор программного обеспечения, используемого для имитационного моделирования**

На данный момент есть большое множество программ для имитационного моделирования. Каждая из них имеет как свои достоинства, так и недостатки. При выполнении выпускной квалификационной работы я использовал программное обеспечение Anylogic в виду его простоты использования и простоты создания моделей. Но также мы коснемся и других специализированных программных сред моделирования.

На рисунке 1 представлено загрузочное окно AnyLogic. Это флагманское программное обеспечение многонациональной команды компании The AnyLogic Company для многоподходного имитационного моделирования. Актуальная на данный момент версия – 8.9. Полностью переведена на русский язык.

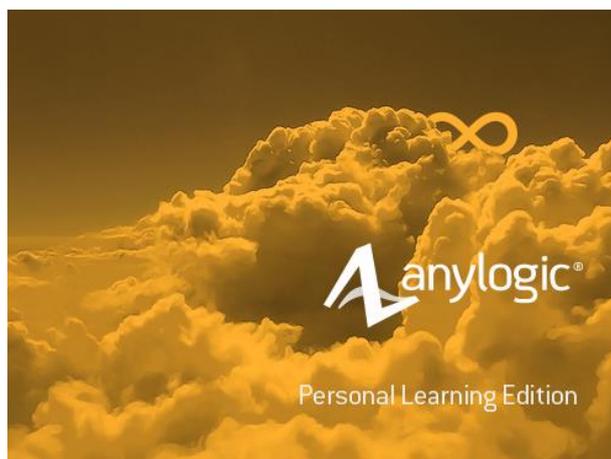


Рисунок 1 – Загрузочное окно anylogic

Данное ПО поддерживает создание моделей с использованием всех трех современных подходов, а именно:

- агентный подход;
- дискретно-событийный подход;
- подход системной динамики.

Anylogic предназначен для создания и анализа моделей, их поведения в разных сценариях. Программа предоставляет возможности для создания сложных моделей, используется в различных сферах, в частности в транспортной логистике, социальной сфере, производстве, медицине.

«Построение модели в AnyLogic не требует написания программного кода, но если стандартных средств не хватает (или их использование неудобно), есть возможность использования языка Java.» [6].

Программа имеет простой и понятный интерфейс. Одно из преимуществ Anylogic в том, что с программой поставляется база готовых моделей для понимания принципа работы разных систем, а также справка на нескольких языках, включая русский.

В программе есть возможность создания агентов с индивидуальными характеристиками и правилами поведения в системе разного уровня сложности. Таким образом программа незаменима при моделировании сложных систем с большим количеством элементов, взаимодействующих

между собой.

Основное преимущество Anylogic – поддержка моделирования систем, в которых важную роль играют последовательность и временные характеристики событий, что позволяет моделировать непрерывные процессы с использованием дифференциальных уравнений для анализа макроуровневых характеристик систем.

ПО предоставляет мощные средства визуализации, которые позволяют анимировать модели и визуализировать результаты моделирования в реальном времени на используемом ПК либо посредством облачных технологий компании.

Выпускается в трех версиях:

- Personal Learning Edition (для оценки и обучения, бесплатно);
- University Researcher (для открытых исследований в университетах, платно);
- Professional (для компаний и гос. организаций, платно).

На рисунке 2 продемонстрировано загрузочное окно программного обеспечения Arena – одной из известных программ для дискретно-событийного моделирования.



Рисунок 2 – Загрузочное окно Arena

Актуальная версия на данный момент – 16.20. Не имеет русского языка.

Используется для анализа и оптимизации производственных процессов, логистических систем и обслуживания клиентов.

Программа предоставляет пользователям достаточно простой интерфейс, изображенный на 3 рисунке, похожий на интерфейс офисного пакета от Microsoft и широкие возможности для создания моделей.

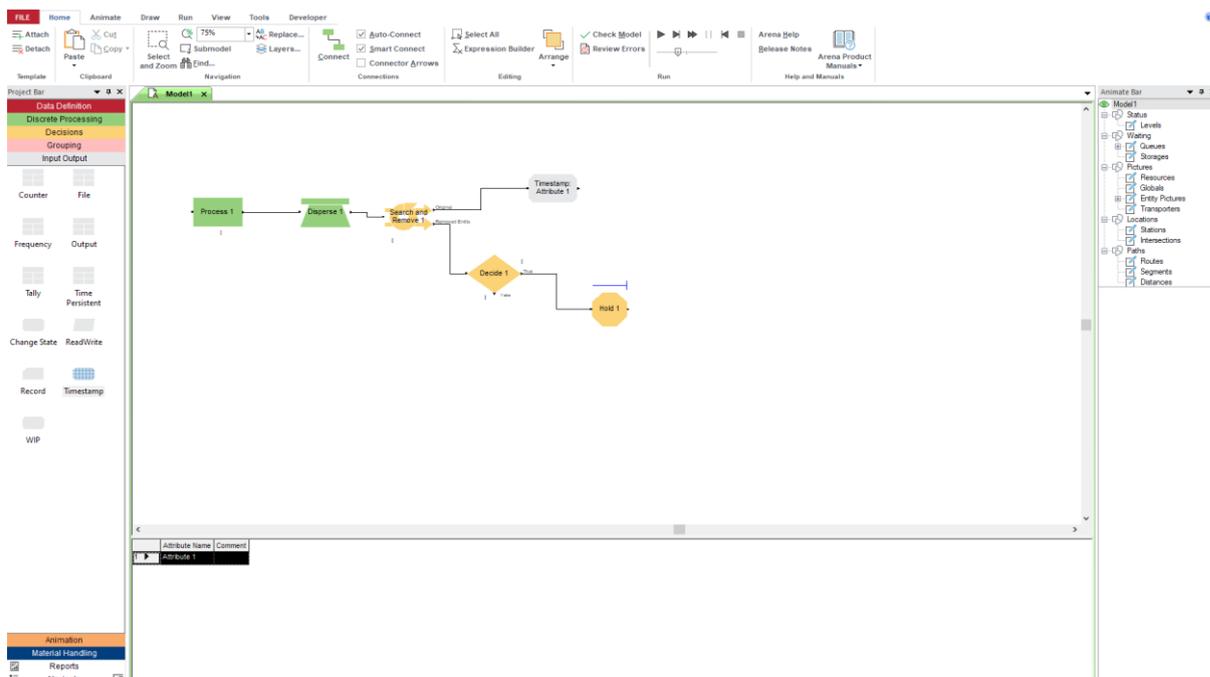


Рисунок 3 – Интерфейс программы Arena

Имеет графический интерфейс для создания моделей, что позволяет быстро и легко разрабатывать сложные системы, симулировать производственные процессы, логистические системы и другие дискретные системы моделей, но из-за отсутствия русского языка и документации на русском использование затруднено. Может быть интегрирована с другими приложениями с помощью Visual Basic, а также имеет импорт блок-схем из Microsoft Visio, и импорт данных из Access, что позволяет использовать реальные данные для моделирования и анализа. Поддерживается размещение элементов управления ActiveX. В ней присутствуют средства для анализа результатов моделирования, такие как статистические методы и инструменты

визуализации.

Arena может использоваться для моделирования сложных логических процессов:

- управление очередями;
- маршруты движения пешеходов;
- обработка различных типов событий и другое.

Это особенно полезно для моделирования пешеходных потоков в сложных условиях, транспортных узлах, торговых центрах и других местах. Пользователь может задавать как сложные правила и условия поведения, так и простые, и может создавать сценарии для моделирования псевдослучайных процессов с использованием статистических распределений. Учитывая вышесказанное, это позволяет пользователю учесть изменчивость и неопределенность, которые должны соответствовать реальным системам. Время прибытия пешеходов, продолжительность обслуживания на кассах и другие параметры, заданные в качестве случайных величин, повышают реалистичность и точность модели.

Выпускается в трех версиях:

- Demo/Academic Edition (для оценки и обучения, бесплатно);
- Standard Edition (полные возможности с небольшими ограничениями, платно);
- Professional Edition (для высокопроработанных моделей с улучшенным контролем над моделью, платно).

Рассмотрим следующее программное обеспечение: Simul8 это инструмент, который помогает в создании моделей, использующих дискретные и случайные события. Его применение в системном моделировании позволяет улучшить проектирования производственных систем и транспортных узлов. С помощью встроенных инструментов моделирования можно создавать модели различной сложности и проводить эксперименты над ними для последующего анализа. При моделировании пешеходного движения это программное обеспечение помогает

пользователям создавать подробные модели. Это делает данное из него очень ценный ресурс как для обычных пользователей, так и для специалистов, сосредоточенных и занимающихся проектированием, и анализом пешеходных потоков.

Наличие в нем подробного и понятного каждому пользователю интерфейс позволяет создавать модели с использованием визуальных элементов и блок–схем, при этом создание систем становится простым в изучении даже для тех, кто не имеет глубоких знаний в области моделирования.

Используемое в Simul8 методы дискретно-событийного моделирования помогают в анализе процессов, при которых изменения в системе происходят в определенные отрезки времени. Рассматривая выбор данного обеспечения, позволит моделировать пешеходное движение и многие другие события, например прибытие новых агентов либо начало и завершение обслуживания в различных точках, а также взаимодействия между пешеходами и окружающей средой. А возможность создания анимаций позволяют наблюдать за поведением пешеходов в режиме реального времени, для возможного выявления потенциальных проблем.

При необходимости более детального анализа есть возможность воспользоваться инструментами, разработанными для сбора и анализа данных. Возможность собирать статистическую информацию, например время ожидания, длина очередей, пропускная способность и прочие параметры. Полученные данные можно использованы при проведении анализа и оценки влияния различных факторов на результаты моделирования, а также для разработки оптимальных стратегий в управлении пешеходными потоками. К примеру, можно проверить как увеличение числа входных точек или изменение маршрутов движения влияет на общее время пребывания и убывания пешеходов в системе.

Поддержка моделирование случайных процессов с использованием статистических распределений, позволяет учитывать вариативность и

неопределенности реальных систем. Например, время прибытия пешеходов, время обслуживания и другие параметры могут быть заданы как случайные величины, благодаря этому реалистичность и точность моделирование случайных процессов позволяет исследовать спектры сценариев и выявлять наиболее вероятные и критические ситуации.

Интеграция с внешними системами и источниками данных является еще одной важной функцией, это позволяет импортировать данные из баз данных, таблиц и облегчает процесс настройки моделей, повышает точность, релевантность результатов моделирования. Поддержка экспорта данных и отчетов упрощает обмен информацией и совместную работу над проектами.

В программе есть возможность для автоматизации и оптимизации процессов, создавать и запускать сценарии оптимизации для поиска наилучших решений в рамках заданных ограничений, включая оптимизацию маршрутов движения, минимизацию времени ожидания или максимизацию пропускной способности. Возможности оптимизации позволяют находить наиболее эффективные стратегии управления пешеходными потоками и улучшать эффективность системы.

В здравоохранении Simul8 используется для моделирования потоков пациентов и улучшения организации работы медицинских учреждений. В сфере обслуживания Simul8 помогает анализировать и оптимизировать работу торговых центров, аэропортов, железнодорожных станций и других объектов с высокой плотностью пешеходного движения.

Выпускается также в трех версиях:

- Project (платно);
- Business (платно);
- Twin (платно).

Не имеет русского языка. На запрос демонстрационной версии в компании не ответили.

FlexSim – программа для 3D-моделирования, используемая в производстве, логистике и здравоохранении, позволяет визуализировать

модели в трехмерном пространстве и анализировать их поведение в режиме реального времени, позволяет создавать трехмерные модели систем, что делает его идеальным для визуализации и анализа сложных процессов моделирования. Выпускается компанией Autodesk, которая приостановила деятельность в России.

MassMotion – специализированное программное обеспечение для моделирования пешеходных потоков, используется в городском планировании, транспортных системах и при организации массовых мероприятий.

Данная программа позволяет анализировать поведение пешеходов и оптимизировать инфраструктуру для повышения безопасности и комфорта. Моделирование пешеходных потоков в MassMotion позволяет создавать модели и анализировать их поведение в различных сценариях.

Имеет три версии:

- Standalone – для одного пользователя в пределах одной страны (платно);
- Network Floating – для нескольких пользователей в пределах одной страны. (платно);
- Network Floating International – для нескольких пользователей, без ограничений по месту (платно).

Выбор конкретного программного обеспечения зависит от целей и задач моделирования, а также от особенностей моделируемой системы. Использование современного программного обеспечения для имитационного моделирования позволяет получить точные и достоверные модели, проводить эксперименты и анализировать результаты для принятия обоснованных решений и оптимизации процессов в различных областях деятельности.

#### Выводы по первой главе

В первой главе мы рассмотрели историю создания и методы имитационного моделирования, кратко рассмотрели программное обеспечение, используемое в создании имитационных систем.

## Глава 2 Материалы и методы, использованные в работе

### 2.1 Программное обеспечение для проведения эксперимента

Для проведения имитационного эксперимента по моделированию движения пешеходов я выбрал программное обеспечение AnyLogic. Это было обусловлено его гибкостью, простотой и мощностью в решении задач имитационного моделирования, а также поддержка русского языка и свободное распространение для обучения.

Программная среда Anylogic, как указывалось выше, позволяет использовать три основных подхода:

- дискретно-событийное моделирование;
- системную динамику;
- агентное моделирование.

Все перечисленное делает данный программный продукт идеальным инструментом для анализа динамики пешеходных потоков и обучения. «Агентное моделирование сосредоточено на индивидуальных участниках системы. В этом заключается его отличие от более абстрактного метода системной динамики и дискретно–событийного метода, ориентированного на процессы. В агентном моделировании сначала устанавливаются параметры активных объектов – агентов, и определяется их поведение. В виде агентов может быть представлено что угодно, что имеет значение для исследуемой системы: люди, домохозяйства, автомобили, оборудование, даже продукты и компании. Затем устанавливаются связи между агентами, задается окружающая среда и запускается моделирование. Индивидуальные действия каждого из агентов образуют глобальное поведение моделируемой системы.» [18].

При использовании подхода агентного моделирования в первую очередь задаются параметры активных объектов-агентов, определяется их поведение. Агентами называют любые важные для исследуемой системы сущности, такие

как: люди, домохозяйства, автомобили, оборудование, продукты, компании, технические средства. После создания агентов необходимо установить взаимосвязи между ними и задать окружающую среду, ввести действующие условия. Далее запускается моделирование. Задавая индивидуальные действия для каждого агента, формируется глобальное поведение системы, которая моделируется.

Данное программное обеспечение предоставляет достаточно мощные инструменты для подробной визуализации. Это позволяет наглядно просмотреть и проанализировать пешеходный поток на отрезке времени. Особенно важно это при представлении результатов моделирования заинтересованным сторонам и принятии решений. Визуализация позволяет не только увидеть поведение модели, но и самое главное выявить ключевые факторы, влияющие на динамику потоков. Возможность анимации, а также возможности приостановки и прокрутки позволяют отслеживать изменения во времени и наблюдать за взаимодействиями между пешеходами (агентами) и окружающей средой.

Anylogic поддерживает создание модульных и многокомпонентных моделей, что сильно упрощает процесс разработки сложных моделей и также упрощает последующие разработки посредством повторного использования модулей. Модульный подход позволяет создавать более гибкие и адаптивные модели, которые могут быть легко изменены и расширены, если требуется быстрая адаптация модели к новым условиям либо необходимо добавление новых элементов. Как пример, при изменении городской инфраструктуры можно легко добавить новые элементы среды.

Интеграция с внешними базами данных, таблицами Excel, ГИС-картами и другими источниками ввода значений или программными продуктами увеличивает точность и актуальность результатов моделирования. Это важно для корректного составления модели и/или обеспечения ее соответствия реальной системе. Например, есть возможность загрузки данных о количестве покупателей в определенные часы, собранные с помощью датчиков на дверях

(каунтеры) в магазине, которые считают сколько посетителей пришло в магазин в определенное время. Можно использовать данные с камер видеонаблюдения, например на производствах для анализа пропускной способности конвейера, либо количества автомобилей, проезжающих по развязке.

Одно из ключевых преимуществ – поддержка моделирования с комбинированием различных подходов в одной модели, что значительно расширяет возможности как анализа, так и оптимизации. Появляется возможность использовать дискретно–событийное моделирование для анализа производственных процессов, системную динамику для моделирования долгосрочных направлений, а агентное моделирование для анализа поведения отдельных агентов. Это делает выбранную программу мощным инструментом–комбайном для решения сложных задач с большим количеством условий и параметров, где при моделировании необходимо учитывать взаимодействия на разных уровнях системы.

Помимо этого, Anylogic предоставляет широкий набор инструментов для анализа результатов моделирования и создания отчетов:

- визуализация результатов в виде графиков и диаграмм;
- создание подробных отчетов для последующего анализа;
- создание динамических таблиц.

Данные возможности позволяют быстро и ресурсоэффективно анализировать полученные данные и впоследствии принимать взвешенные и правильные решения. К примеру, можно проводить анализ влажности, ветра, солнечного излучения, для оценки влияния указанных факторов и дальнейшего прогнозирования погоды.

«Для отображения поведения модели в ходе моделирования существуют анимационные средства и динамические объекты, которые можно размещать на диаграмме произвольным образом. Поведение модели определяется из имитационных экспериментов (имитаций) с моделью.» [18].

Помимо основных возможностей, также в наличии ряд дополнительных

инструментов, которые будут полезны в случае более детального и глубокого анализа в случае необходимости большей оптимизации моделей. Поддерживается разработка пользовательских библиотек и компонентов, что позволяет расширять функциональность модели и адаптировать узконаправленные и/или специфичные задачи. Доступна интеграция с языками Java и Python, она позволяет использовать дополнительные аналитические и вычислительные инструменты.

AnyLogic получила широкое распространение при моделировании процессов в таких индустриях, как логистика, производство, здравоохранение и градостроение.

- для логистики основное использование программы – это оптимизация складских процессов, планирование логистических цепочек пути товаров, а также управления запасами на складах;
- в здравоохранении программа может использоваться для моделирования потоков пациентов с целью оптимизации времени работы сотрудников, оптимизации работы медицинских учреждений в целом и анализа эпидемиологических ситуаций;
- в области градостроения помогает спланировать транспортную инфраструктуру, создавать и проанализировать объем пешеходных потоков, оптимизировать размещение общественных и транспортных объектов.

Выбор данного программного обеспечения для исследования обусловлен его универсальностью, мощностью, возможностью интеграции различных подходов к моделированию, а также доступностью для целей обучения и наличие русскоязычного интерфейса. Данное ПО позволит провести комплексный анализ и оптимизацию движения пешеходов в городских условиях с учётом множества факторов и различных взаимодействий.

AnyLogic предоставляет все необходимые инструменты для создания точных и реалистичных визуализированных моделей, что делает его

незаменимым инструментом для исследования в рамках ВКР.

## **2.2 Методы и алгоритмы, используемые в моделировании**

Существует множество различных подходов в имитационном моделировании, их использование зависит от области применения модели.

Дискретно–событийное моделирование, одно из трех самых современных, используется в производственных и транспортных системах. Данный подход фокусируется на моделировании систем, в которых события происходят в хронологической последовательности. Идея данного подхода заключается в том, что движение пешеходов рассматривается как серия дискретных событий, происходящих в определенные моменты времени. Помимо переменных, которые определяют состояние системы, а также логики, которая определяет, что произойдет в ответ на произошедшее событие, данная система моделирования имеет следующие компоненты:

- часы, как основной компонент всей системы, который синхронизирует изменения, т.е. возникновение событий;
- список событий;
- генераторы случайных чисел, в свою очередь делящиеся на детерминированные и стохастические;
- статистика, в которой собираются основные данные усредненной доступности ресурсов, количества клиентов, времени ожидания;
- условие завершения (заданное число циклов либо возникновение предопределенного в системе события).

Примером события является, например, переход через дорогу, остановка на светофоре, вход в здание и другое. Каждое из этих событий характеризуется временем начала и окончания, скоростью и направлением движения. При создании модели движения пешеходов используются разные методы. Одними из самых распространенных является система клеточных автоматов.

Метод клеточных автоматов представляет собой поле элементов,

состоящую из ячеек, каждая из которых может находиться в одном из нескольких состояний, которые могут изменяться в зависимости от соседних клеток. В модели клеточного автомата каждая клетка представляет собой некий участок на области, где параметрами ячейки являются плотность пешеходов, их скорость и направление движения. В такой модели правила перехода по клеткам определяются состоянием ячеек, изменяющимся со временем. Если в ячейке слишком много пешеходов, скорость их движения может быть уменьшена во избежание столкновений или когда ячейка рядом свободна, пешеходы могут перейти туда, что позволяет моделировать и взаимодействовать с пешеходами и их поведением в условиях ограниченного пространства.

Метод системной динамики применяется в моделировании экологических и социальных систем, основанных на моделировании потоков в системе, что позволяет исследовать долгосрочную динамику сложных систем. Это инструмент моделирования и анализа сложных динамических систем, который был придуман для изучения поведений во времени. Он позволяет оценить структуру системы, взаимосвязи между элементами и временные задержки влияют на динамику модели. Взвешенный анализ очень важен для принятия решений в условиях, когда прямое вмешательство в модель либо невозможно, либо не рекомендуется. Системная динамика широко используется в различных областях, таких как экология, экономика, управление проектами, здравоохранение и социальные науки.

«Метод системной динамики был изобретен в 1950-х Джеймсом Форрестером из Массачусетского Технологического Института (MIT). Используя свой научный и инженерный опыт, Форрестер искал способ применения законов физики, в частности, законов электрических цепей, к исследованиям и описанию динамики процессов социальных и экономических систем.» [4].

В экологии она помогает моделировать и управлять природными ресурсами. В экономике её применяют для анализа макроэкономических

процессов и разработки экономической политики. В управлении проектами системная динамика позволяет оптимизировать ресурсы и сроки выполнения проектов. В здравоохранении она помогает моделировать распространение заболеваний и планировать медицинские ресурсы. А в социальных науках её используют для изучения динамики социальных процессов и разработки стратегий социальной политики.

Системная динамика не только позволяет понять, как система работает в текущий момент, но и предсказать, как она будет вести себя в будущем при различных сценариях и вмешательствах. Это делает её незаменимым инструментом для исследователей, инженеров, менеджеров и политиков, которые стремятся к более глубокому пониманию сложных динамических систем и эффективному управлению ими.

«В основе системной динамики лежат два основных понятия: уровень и поток (оценка уровня). Уровень является очень широким понятием, но основное его значение – это возможность изменения (накопления) значения. Под уровнем можно понимать как количество товаров на складе, так и уровень стресса сотрудников или уровень удовлетворения потребностей клиентов и т. д. Поток – это скорость изменения уровня. Величина потока определяется функциями решения (вентильями), линиями задержки и вспомогательными переменными. Функции решения (вентили) определяют зависимость величины потока от уровня.» [10].

В агентном моделировании каждый элемент системы – это агент, который выполняет свои задачи независимо от других. У агентов есть свои собственные характеристики и сценарии взаимодействий с другими элементами. Это делает их автономными единицами модели, исполняющими свои роли.

«В агентном моделировании процесс функционирования модели представляется как результат взаимодействия агентов. Агент – это класс с заданным поведением. Поведение класса задается конечным автоматом, где состояния агента являются состояниями автомата, а переход между

состояниями задается по какому–либо условию.» [10].

«В основе агентного моделирования лежит попытка понять логику принятия решения отдельно взятым потребителем, формализовать ее и объединить в единую модель, которая агрегирует индивидуальный выбор сотен и тысяч независимо действующих потребителей. На языке моделирования автономно принимающий решение субъект и называется агентом: агентом может быть как индивидуальный потребитель, так и целые социальные группы или организации.» [7].

Движущиеся агенты используют разные алгоритмы для поиска пути. Рассмотрим несколько алгоритмов, которые помогают ориентироваться в пространстве и находить путь.

Алгоритм поиска A-Star является улучшенным алгоритмом Дейкстеры. Его придумали в 1968 году для мобильного робота, который должен был планировать свои действия. Сейчас он часто применяется в компьютерных играх для ориентирования неигровых персонажей. Так же он используется в искусственном интеллекте бытовых роботов, к примеру роботов пылесосов. Они строят виртуальную карту с помещениями и проходами, а после вычисляют короткий путь до станции зарядки. Он сочетает особенности двух алгоритмов: алгоритм Дейкстры и поиск по первому наилучшему совпадению.

В нем оценивается стоимость пути до цели, выбирается вершина с наименьшей длиной из списка открытых. Затем алгоритм просчитывает путь до соседей этой вершины и проверяет их вес. Если путь через текущую вершину оказался более коротким, то он выбирает ее и ищет следующий кратчайший путь. Поиск продолжается пока не будет найден путь до искомой вершины.

На рисунке 4 проверяется ближайшие от зеленого агента клетки, в них строятся направления от центра агента во все стороны и измеряется расстояние до конечной точки, так по мере приближения к концу пути в каждой точке указывается расстояние от начала пути, конца и их сумма.



свою стоимость пути с учётом этого узла и если стоимость пути через новый узел меньше, чем через предыдущий, то она заменяется на новую. Это происходит, пока все узлы не станут исследованными или не будет достигнут конечный узел. Алгоритм завершает работу и выдаёт кратчайший путь, состоящий из рёбер наименьшей стоимости.

На рисунке 5 представлен граф, на примере которого мы посмотрим, как работает алгоритм. Круги – это вершины, обозначенные номерами, соединения кругов – пути между ними, которые имеют свой вес.

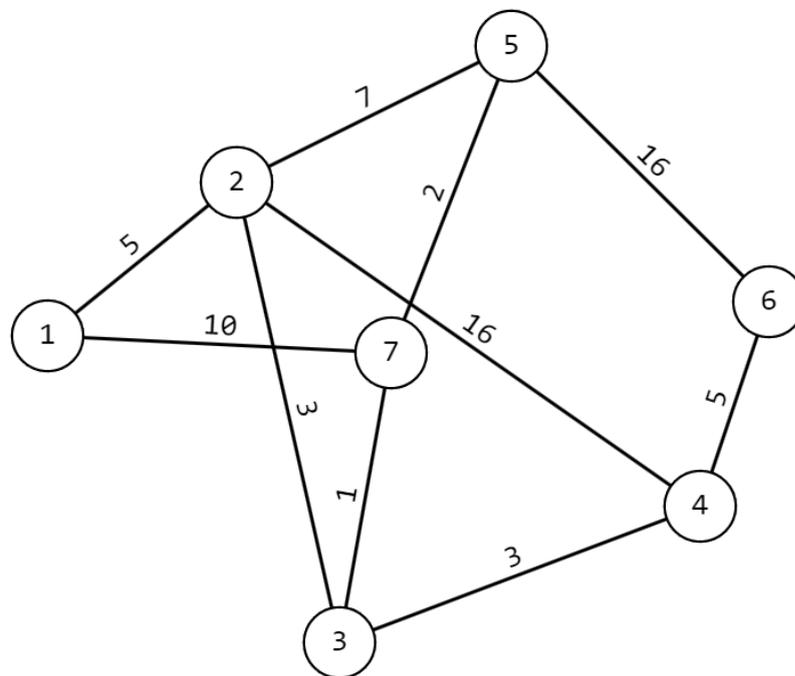


Рисунок 5 – Граф с вершинами и путями

Рассмотрим пример работы данного метода: с первой вершины и ее соседями – 2, 7. Посчитаем длину между первой и второй вершинами, путь будет равен 5. Прделаем такие же действия с другими вершинами. Рядом с каждой вершиной запишем расстояние кратчайшего пути в эту вершину из первой.

На рисунке 6 показан граф с весами его вершин, которые соответствуют минимальной длине пути от начальной точки.

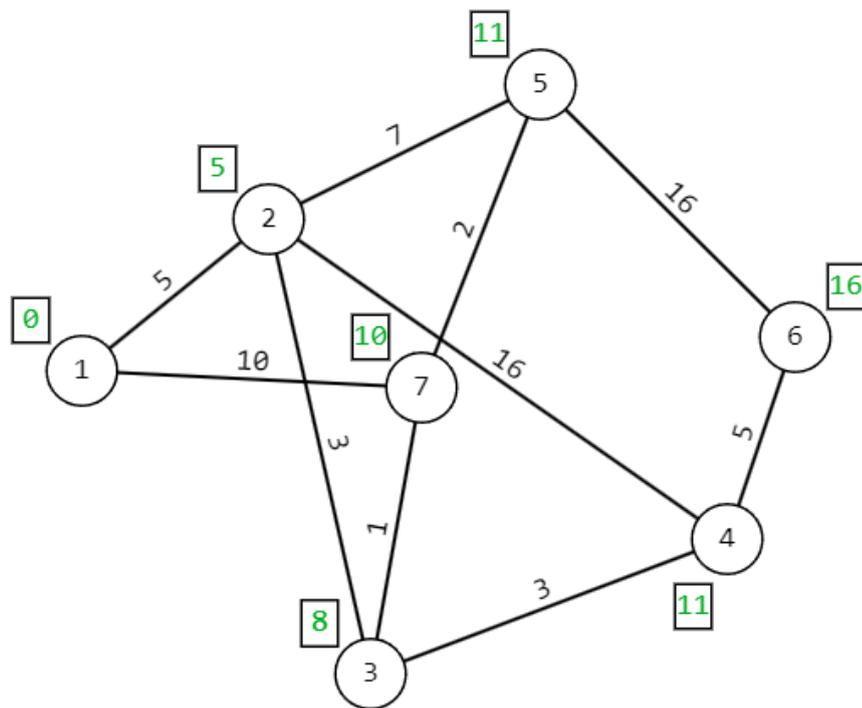


Рисунок 6 – Граф с взвешенными вершинами

Данный метод заканчивает свою работу, в момент, когда будут посещены все вершины, подсчитаны все пути и выявлены самые короткие из них. Результат работы алгоритма указан на рисунке выше: путь от 1 вершины до 2 будет равен 5, до 3 – 8, до 4 – 11, до 5 – 11, до 6 – 16 и до 7 – 10.

#### Вывод по второй главе

Во второй главе было рассмотрено программное обеспечение Anylogic для создания агентной модели, подробно разобрали области применения имитационного моделирования и его алгоритмы.

## Глава 3 Материалы и методы, использованные в работе

### 3.1 Описание элементов модели

В данной работе создается имитационную модель филиала банка. Для демонстрации процесса моделирования будут созданы очередь, банкоматы и отдел обслуживания клиентов.

«Теория массового обслуживания – это область прикладной математики, занимающаяся анализом процессов в СМО, в которых события повторяются многократно. С помощью этой теории разрабатываются методы решения типовых задач массового обслуживания, строятся модели СМО и определяются их количественные характеристики.» [14].

Модель банка будет состоять из нескольких ключевых компонентов:

- банкоматы: Автоматизированные устройства для выполнения различных банковских операций без участия сотрудника банка, например снятие, внесение наличных, проверка баланса. В модели будет учитываться количество банкоматов в филиале;
- отдел обслуживания клиентов: Зона, в которой сотрудники банка оказывают консультационные и операционные услуги клиентам;
- очереди: Системы управления очередями для банкоматов, для отдела обслуживания клиентов. В модели будет учитываться длина очередей, рассчитываться время ожидания клиентов и пропускная способность очереди;
- клиенты: Агенты, представляющие посетителей банка. В модели используются различные типы агентов: одни могут использовать только банкоматы, другие обращаются в отдел обслуживания.

Основными целями данного имитационного моделирования являются:

- анализ работы очередей: Анализ времени ожидания клиентов в очередях к банкоматам, в отделе обслуживания, выявление ситуаций, при которых могут появляться длинные очереди;

- оценка эффективности работы: Исследование различных сценариев, корректировка переменных, которые повлекут за собой изменения в модели.

Для создания модели в своей ВКР я использую программное обеспечение AnyLogic, позволяющее реализовать одновременно дискретно–событийное моделирование и агентное моделирование в одной модели. Основное внимание будет обращено на следующие критерии:

- время простоя: Изменение времени ожидания клиентов при использовании случайных значений в распределении;
- работа очередей: Моделирование систем очередей, будет рассмотрено распределение клиентов между банкоматами и отделом обслуживания;
- сценарный анализ: Каким образом изменение вероятности в поведении агента повлияет на эффективность пешеходной модели.

### **3.2 Обзор программного обеспечения**

Рассмотрим основные окна и инструменты, предоставляемые программным обеспечением Anylogic. Программа состоит из нескольких основных панелей:

- проекты: Перечислены все основные элементы модели: агенты, разметка пространства, отношения и связи между агентами, базы данных для хранения информации и других параметров модели, диаграммы и графики;
- палитра: В окне палитры расположены библиотеки в виде вкладок с элементами, которые впоследствии размещаются на рабочем поле;
- панель свойств: Данная панель используется для изменения свойства объектов и изменения их поведения. С ее помощью изменяются правила реализации и создания стохастической модели, а также указываются аспекты поведения агентов.

На рисунке 7 представлена библиотека с объектами, которые используются для добавления в имитационную модель. Разметка пространства дает возможность добавлять элементы построения пути и создания узлов, с которыми впоследствии будут контактировать агенты. С ее помощью также можно создавать анимации движения агентов к узлам (нодам).

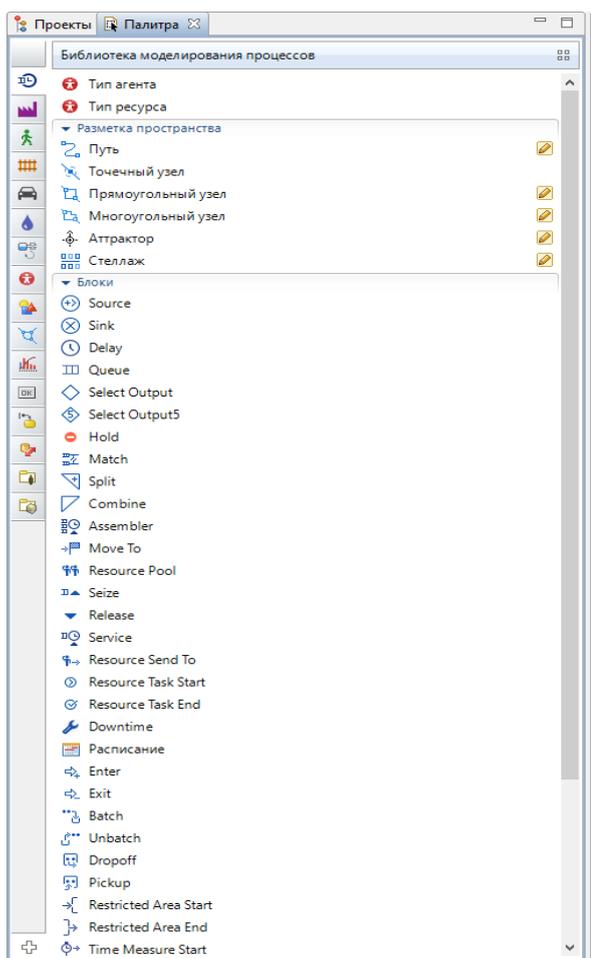


Рисунок 7 – Библиотека моделирования процессов

Ниже на рисунке 8 продемонстрированы библиотеки с категориями элементов, расположенными слева, в окне палитры и содержат готовые решения для использования в построении модели.

В ней присутствуют:

- блоки для разметки пространств;
- создание событий;

- диаграммы, графики;
- базы данных, таблицы;
- анимации, визуализация процессов модели и другое.

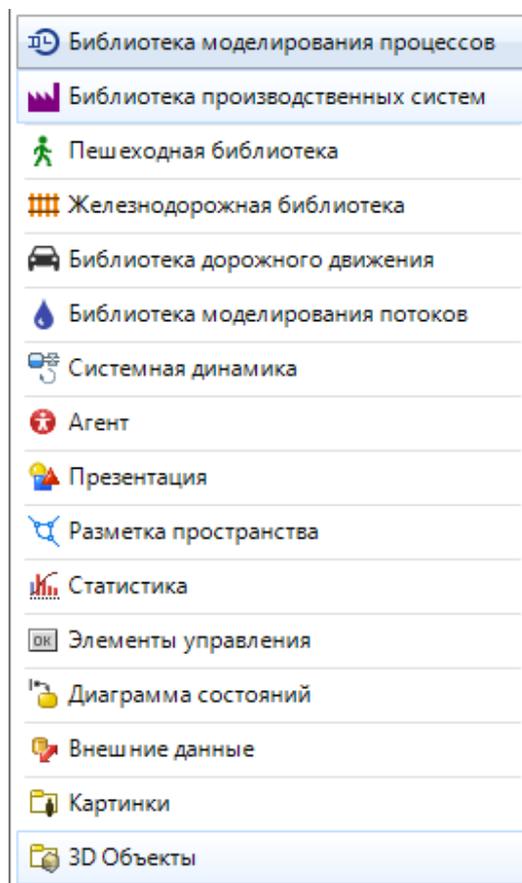


Рисунок 8 – Категории с библиотеками процессов

Область графического редактора, изображенная на 9 рисунке, является главным компонентом программы, в котором происходит создание, просмотр, создание анимации и редактирование модели. Благодаря интуитивно понятному и легкому интерфейсу можно реализовать создание достаточно сложные системы. Элементы модели можно добавлять, перетаскивая их из библиотеки и соединять их между собой для настройки связей и поведения. Связи могут отображаться любыми линиями.

После размещения элементов на рабочей области требуется настроить их свойства и модели поведения с помощью панели свойств, в которой

задаются значения параметров. Элементы модели соединяются между собой с помощью связей.

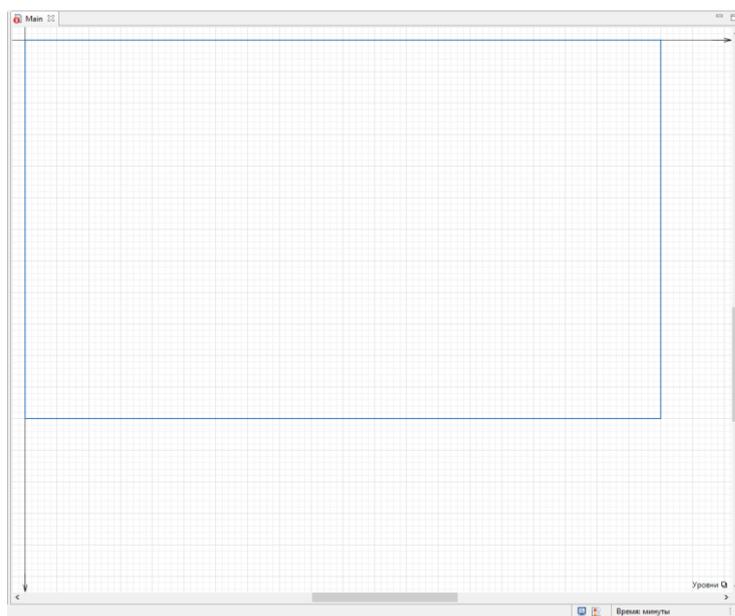


Рисунок 9 – Рабочая область

Панель свойств на 10 рисунке является важным элементом в создании моделей, так как изменяет параметры элементов и предоставляет пользователю возможность детально настраивать внешний вид и поведение у каждого элемента модели.

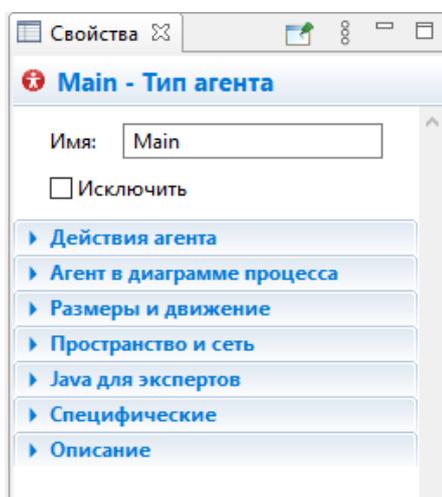


Рисунок 10 – Панель свойств

### 3.3 Реализация модели

Рассмотрим создание модели, которая будет состоять из основных элементов системы и коротко рассмотрим ее на рисунке 11. Добавим на рабочее поле элемент генератор агентов из категории блоков – (source), он предназначен для создания новых агентов, которые будут проходить тестировать нашу модель и выявлять ошибки в моменты запуска симуляции. Следующим в нашей модели стоит блок распределения (selectOutput), в котором агенты отправляются на буферные зоны содержания агентов (queue) с вероятностями, примененными в свойствах.

Зона задержки (delay) нужна для имитации ожидания времени обслуживания, выход (sink) уничтожает агентов в модели, которые ее прошли. На нашей модели присутствует элемент выход без обслуживания (sink), он используется для уничтожения агентов, вытесненных из очереди другими агентами по прошествии запрограммированного времени.

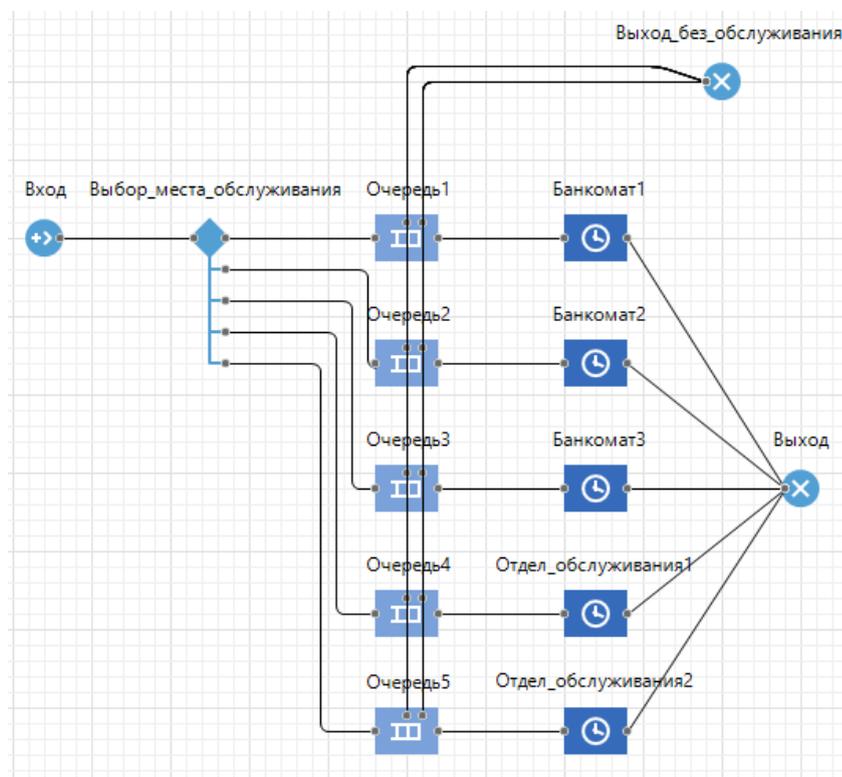


Рисунок 11 – Модель с основными элементами

Рассмотрим модель подробнее и напишем какие есть блоки элементов и что в ней происходит. Выделенные красной рамкой на 12 рисунке и подписанные буквами элементы модели представляют собой исполнение модели в зависимости от критериев моделирования.

Рассмотрим их:

- элемент А. Представляет собой генератор новых агентов, используется обычно в качестве начального блока диаграммы процесса. Агенты создаются с заданной пользователем интенсивность, по разному времени прибытия, с помощью расписания, или вручную, так же можно задать максимальное количество генераций и количество агентов, единоразово создаваемых за один промежуток времени;
- элемент Б. Это селектор выходов, он распределяет входящие объекты на один из пяти выходов в соответствии с условиями и/или заданным вероятностями, используется для перенаправления агентов модели в различные подпроцессы исходя из заданных ему условий;
- элемент В. Является очередью или же буфером агентов, ожидающих приема следующим блоком, можно разрешить у элемента уход из очереди по прошествии заданного времени. имеет порт вынужденного ухода, если очередь заполнена, то исходя из условий, можно заставить последнего агента в очереди покинуть ее;
- элемент Г. Задерживает агентов на заданный период времени, используется для моделирования выполнения какой-то задачи с заданным временем, которое может быть случайным в определенных значениях;
- элемент Д. Данный элемент уничтожает клиентов (агентов), которые не смогли по тем или иным заданным причинам получить обслуживание;
- элемент Е. Уничтожает агентов, прошедших модель.

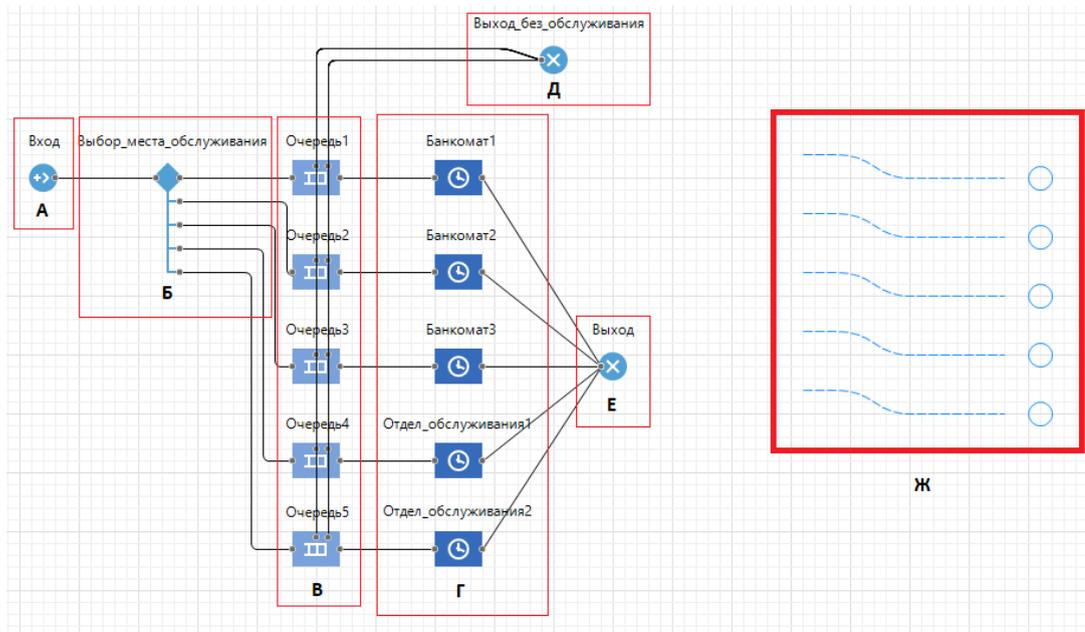


Рисунок 12 – Готовая модель

### Выводы по третьей главе

В последней главе выпускной квалификационной работы мы рассмотрели основные элементы, добавляемые на модель, их свойства и назначения и создали простую агентную имитационную модель.

## Заключение

В ходе выполнения данной дипломной работы была проведена исследовательская деятельность по моделированию движения пешеходов с использованием программного обеспечения AnyLogic. Рассмотрены основные подходы и методологии имитационного моделирования, описана история его развития и ключевые концепции. Особое внимание уделено программным средствам, AnyLogic, которые предоставляют мощные инструменты для создания и анализа моделей сложных систем, включая пешеходные потоки.

В рамках исследования были выполнены следующие задачи:

- проведен обзор различных подходов к имитационному моделированию, в том числе дискретно–событийное моделирование, системна динамика и агентное моделирование;
- рассмотрены следующие области применения пешеходного моделирования:
  - урбанистика;
  - транспортные узлы;
  - торговые центры;
  - массовые мероприятия, что позволило выявить значимость и спектр применения.
- осуществлен анализ программного обеспечения для имитационного моделирования, что позволило понять возможности и преимущества моделирования пешеходных потоков;
- описана модель, используемая для имитационного моделирования движения пешеходов.

Была реализована практическая модель банка с использованием банкоматов и отделом обслуживания клиентов, что продемонстрировало процесс моделирования, анализ работы очередей.

Результаты исследования подтвердили эффективность имитационного моделирования для анализа и оптимизации пешеходных потоков. Модели,

созданные с помощью AnyLogic, позволяют детально изучать поведение пешеходов, выявлять узкие места и разрабатывать рекомендации по улучшению городской инфраструктуры и организации работы различных объектов.

Практическая ценность данной работы заключается в возможности применения разработанных моделей для решения реальных задач, связанных с управлением пешеходными потоками в различных сценариях. Результаты моделирования могут быть использованы для оптимизации работы транспортных узлов, торговых центров, массовых мероприятий и других объектов, где важно управление потоками людей.

Таким образом, выполненное исследование вносит значительный вклад в область имитационного моделирования и демонстрирует потенциал использования современных программных средств для анализа и оптимизации сложных систем.

## Список используемой литературы

1. Акопов А. С. Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата. М. : Издательство Юрайт, 2014. — 389 с.
2. Будникова И. К. Прикладная теория систем массового обслуживания: практикум. Казань: Казан. гос. энерг. ун–т, 2018. – 76 с.
3. Вьюненко Л. Ф., Михайлов М. В., Первозванская Т. Н. Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата / под ред. Л. Ф. Вьюненко. М.: Издательство Юрайт, 2016. — 283 с.
4. Григорьев, И. Anylogic за три дня: учеб.–метод. пособие. СПб.: СПбПУ, 2016. –202 с.
5. Заборовский В. С., Ильяшенко А. С., Мулюха В. А. Имитационное моделирование телематических систем. Учеб. пособие. СПб: Изд–во СПбГПУ, 2013. 58 с.
6. Замятина О. М. Моделирование систем [Текст] : учебное пособие : Томск: Издательство ТПУ, 2015. – 204 с.
7. Каталевский Д. Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа. Издание 2–е, переработанное и дополненное. М.: Издательский дом Дело, 2015 год
8. Куприяшкин А. Г. Основы моделирования систем. М.: Издательство ФГБОУВПО «Норильский индустриальный институт», 2015. – 135 с.
9. Леонова Н. Л. Компьютерное моделирование: курс лекций. СПбГТУРП. – СПб.,2015. – 88 с
10. Лимановская О. В. Имитационное моделирование в AnyLogic 7. В 2 ч., ч.1: учебное пособие. Екатеринбург : Изд–во Урал. ун–та, 2017. – 152с.
11. Маликов Р. Ф. Основы математического моделирования: учебное пособие для вузов / 2–е изд. Москва: Издательство Юрайт, 2022 – 403 с.
12. Михайлов В. Н. Имитационное моделирование: Учебно–методическое пособие. Орел: Издательство ОФ РАНХГиС, 2015. 164с.
13. Нечаевский А.В. История развития компьютерного имитационного

моделирования // Электронный журнал «Системный анализ в науке и образовании» Выпуск №2, 2013 год URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/2013-nechaevsky-1.pdf>

14. Петухов О. А. Моделирование: системное, имитационное, аналитическое: учеб. пособие . – 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008. – 288 с.

15. Серова Е. Г. Имитационное моделирование в современном менеджменте. // Санкт-Петербург. 2007 год. Третья всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД 2007 URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/immod-2007-1-215-219.pdf>

16. Строгалев В. П., Толкачева И. О. Имитационное моделирование: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008 – 280 с.

17. Эльберг М. С., Цыганков Н. С. Имитационное моделирование: учеб. Пособие : Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – 128 с.

18. Якимов А. И., Якимов Е. А., Борчик Е. М. Имитационное моделирование производственных систем: [монография] Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – 196 с.

19. Алгоритм Дейкстры. Поиск оптимальных маршрутов на графе. [Электронный ресурс] URL: <https://habr.com/ru/articles/111361/>

20. Официальный сайт AnyLogic [Электронный ресурс] URL: <https://www.anylogic.ru>

21. Faingloz L. Simulation Modelling Application in Real-time Service Systems // Transport and Telecommunication Institute. 2017. №17. P. 200–205.

22. Developing Disruptive Business Strategies with Simulation [Электронный ресурс] URL: <https://www.anylogic.com/resources/white-papers/developing-disruptive-business-strategies-with-simulation/>

23. History of simulation modeling [Электронный ресурс] URL: <https://www.simio.com/resources/papers/WinterSim2017/History-of-simulation->

modeling.php

24. Mahdavi A. The Art of Process-Centric Modeling with AnyLogic [Электронный ресурс] URL: <https://www.anylogic.ru/resources/books/the-art-of-process-centric-modeling-with-anylogic/>

25. What is simulation? [Электронный ресурс] URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-simulation#WhatDoesitMean>