

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/230757270>

Моделирование поведения толпы с использованием локальных скалярных полей.

Thesis · May 2011

CITATIONS

0

READS

1,347

1 author:



Roman Grebennikov
Voronezh State University

1 PUBLICATION 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Гребенников Роман Владимирович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ТОЛПЫ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛОКАЛЬНЫХ СКАЛЯРНЫХ ПОЛЕЙ**

05.13.17 – Теоретические основы информатики

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

научный руководитель
к. ф.-м. н., доцент
Тюкачёв Н.А.

Воронеж – 2011

Список условных обозначений.....	4
Введение	5
Глава 1. Проблема поведения толпы.....	11
1.1. Задача моделирования толпы.....	12
1.2. Подходы к созданию моделей поведения толпы	13
1.2.1. Клеточные автоматы.....	14
1.2.2. Непрерывные модели	17
1.2.3. Броуновское движение	19
1.2.4. Ньютоновская механика.....	20
1.2.5. Мультиагентные методы	23
1.2.6. Гибридные методы	24
1.2.7. Графоаналитический метод.....	27
1.2.8. Модель ADPLV	28
1.3. Исследования о поведении реальных толп	33
1.4. Выводы.....	38
1.5. Постановка задачи	39
Глава 2. Моделирование поведения толпы.....	41
2.1. Структура предлагаемой модели	41
2.2. Правила поведения людей в толпе	43
2.3. Типы функций описания полей	48
2.4. Поиск оптимального пути	50
2.5. Оценка эффективности работы моделей поведения толпы	55
2.5.1. Мера средней дистанции пути	56
2.5.2. Мера средней кривизны пути.....	57
2.5.3. Мера затраченного на путь времени.....	59
2.5.4. Мера доли агентов, дошедших до финиша	59
2.6. Выводы.....	60
Глава 3. Алгоритмизация процедуры построения набора полей.....	61
3.1. Алгоритмы полей.....	61

3.1.1. Предыдущие работы	61
3.1.2. Расчет дискретных полей	62
3.1.3. Расчет непрерывных полей	63
3.2. Алгоритм построения набора полей	64
3.2.1. Расчет поля цели	65
3.2.2. Расчет поля дискомфорта	66
3.2.3. Расчет функции максимальной скорости	67
3.3. Обучение системы	69
3.4. Оценка вычислительной трудоемкости	71
3.5. Алгоритм расчета вектора движения для участника толпы	71
3.6. Сравнение с существующими моделями поведения толпы	73
3.7. Выводы	76
Глава 4. Программная реализация модели поведения толпы	77
4.1. Структура программного обеспечения	77
4.2. Программная платформа	81
4.3. Программная реализация	82
4.3.1. Модуль «Конструктор»	82
4.3.2. Модуль «Рендерер»	84
4.3.3. Модуль «Визуализатор»	85
4.3.4. Формат обмена данными между модулями	86
4.4. Графический интерфейс	87
4.4.1. Окно «Визуализатор»	87
4.4.2. Пример визуализации процесса моделирования	88
4.5. Обучение модели	89
4.6. Натурный эксперимент	92
4.7. Выводы	94
Заключение	94
Литература	96

Список условных обозначений

Толпа – бесструктурное скопление нескольких людей в некотором объеме, лишенных ясно осознаваемой общности целей, но взаимно связанных сходством эмоционального состояния и общим объектом внимания [26].

Агент – сущность, обладающая собственной свободой поведения на основании установленного набора правил поведения [92].

XML (англ. eXtensible Markup Language) – расширяемый язык разметки. Подмножество языка SGML, разработанное для упрощения процесса машинного разбора документа. Текстовый формат, предназначенный для хранения структурированных данных, обмена информацией между программами и создания на его основе более специализированных языков разметки.

SGML (англ. Standard Generalized Markup Language) – стандартный обобщенный язык разметки. Метаязык, определяющий язык разметки для документов.

КА – Клеточный автомат, набор клеток, образующих некоторую периодическую решетку с заданными правилами перехода, определяющими состояние клетки в следующий момент времени через состояние клеток, находящимися от нее на расстоянии не больше некоторого, в текущий момент времени.

Введение

Актуальность работы. Зачастую поведение толпы исследовалось в рамках социологии и психологии с целью исследования событий, случающихся в группах людей, объединенных общей целью, и функционирующих как единое целое. В таких случаях люди начинают частично терять свою индивидуальность и совершать поступки в рамках общего поведения толпы.

С ростом населения крупных городов, исследования поведения массовых скоплений людей в последнее время становятся все важнее. Моделирование поведения толпы помогает решать задачи в следующих областях:

- Толпа как часть транспортной системы. Оптимизация пропускной способности транспортных систем.[50]
- Культурно-массовые и спортивные мероприятия. Действия толпы в экстремальных ситуациях (пожар, террористический акт). [101]
- Паломничества. Проверка маршрутов массового движения людей на предмет критических областей для избегания давки.[44]
- Политические демонстрации. Управление поведением толп.[94]
- Пожарная эвакуация. Анализ зданий на предмет соответствия нормам безопасности. [7]
- Визуализация в компьютерной графике. Моделирование реалистичных толп с поведенческой точки зрения.[43]

Это позволит разработать рекомендации специалистам, помогающие обеспечивать высокий уровень безопасности в обычных и экстремальных ситуациях, оптимизировать различные здания и сооружения с точки зрения эффективности прохождения людского потока, а также эффективно управлять транспортным потоком.

Задача с аналогичной постановкой также имеет место при решении проблемы взаимодействия агентов, мигрирующих в распределенной сети в

многоагентных системах, а также при планировании целенаправленного поведения автономных роботов.

Таким образом, во всех этих приложениях можно выделить задачу, заключающуюся в моделировании поведения объектов заданного класса, совокупность которых в общем случае будем называть толпой.

Цель работы. Целью данного диссертационного исследования является разработка и анализ моделей поведения толпы для создания новых эффективных технологий и программных средств моделирования толпы.

Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Проведение анализа существующих моделей поведения толпы.
2. Определение системы показателей эффективности поведения толпы.
3. Разработка математической модели поведения толпы на основе локальных скалярных полей.
4. Разработка мультиагентных алгоритмов расчета индивидуальных скалярных полей и вектора движения для отдельных участников толпы, оценка эффективности их работы.
5. Разработка структуры программного обеспечения, реализующего предложенные алгоритмы моделирования поведения толпы.
6. Проведение экспериментальных исследований для оценки практической применимости полученных результатов, проведение натурного эксперимента.

Методы исследования. Для решения представленных в диссертации задач были использованы аналитические и вычислительные методы аппарата математического моделирования, теории управления, численных методов, теории вероятности и математической статистики, теории оптимизации. Для реализации программной системы используются принципы объектно-ориентированного и функционального программирования.

Основные результаты, выносимые на защиту и их научная новизна.

В результате диссертационного исследования получены новые результаты, касающиеся изучения поведения толпы:

1. Модель поведения толпы, основанная на использовании локальных скалярных полей и позволяющая с более высокой точностью проводить имитационные исследования поведения больших групп объектов в различных условиях.
2. Роевый алгоритм оптимизации подходящего пути для каждого объекта.
3. Система показателей эффективности, позволяющая сравнивать оптимальность поведения толп.
4. Процедура проверки адекватности предложенной модели на основании данных, полученных в результате проведения эксперимента.
5. Структура программного обеспечения, позволяющая проводить полный цикл процесса имитационного моделирования поведения толпы, включающий в себя формирование внешней среды, визуальную демонстрацию деятельности моделируемой толпы, а также сравнение эффективности с уже существующими моделями.

Научная новизна. В диссертации получены следующие результаты, обладающие **научной новизной**

- предложена модель поведения толпы, основанная на локальных скалярных полях, отличающаяся высоким уровнем соответствия поведению реальной толпы;
- впервые сформулирована система показателей эффективности для сравнения различных моделей поведения толпы;

- предложен мультиагентный алгоритм расчета движения толпы, позволяющий более эффективно выходить из локальных «тупиков».

Экспериментально подтверждена адекватность предложенной модели в рамках проведенного эксперимента.

Практическая ценность. Практическая ценность результатов данной научной работы состоит в том, что предложенная модель поведения толпы позволяет с большей точностью проводить имитационное моделирование поведения толпы в различных ситуациях и условиях по сравнению с существующими моделями.

Разработанное программное обеспечение, реализующее предложенную модель поведения толпы, позволяет экспериментально оценить ее преимущество перед уже существующими моделями. Рекомендации, получаемые в результате работы разработанного программного обеспечения, предназначены для широкого круга специалистов в области проектирования зданий и сооружений и позволяют заблаговременно выявлять проблемные места в процессе проектирования.

Теоретические и практические результаты работы внедрены в деятельность ООО «МарКо» и реализованы в виде программной системы, о чем свидетельствует соответствующий акт внедрения. Данная программная система также зарегистрирована в отраслевом фонде алгоритмов и программ СФАП.

Данные, полученные в результате проведения натурного эксперимента с реальной толпой, могут быть использованы для проверки любой другой модели поведения толпы.

Полученные в данной научной работе результаты дают основу для дальнейших теоретических и практических изысканий в области моделирования поведения толпы.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались на IX международной конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии» (Воронеж, 2009), международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных "Ломоносов-2010" (Москва, 2010), XXIX научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве» (Нижний Новгород, 2010), международной научно-практической конференции «Гибридный Интеллект 2010» (Воронеж, 2010) а также на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов ГУП ВПО «Воронежский государственный университет»

Область исследования. Содержание диссертации соответствует специальности 05.13.17 «Теоретические основы информатики» по следующим областям исследований: исследование и когнитивное моделирование интеллекта, включая моделирование поведения, рассуждений различных типов, моделирование образного мышления (п.8 паспорта специальности), разработка и анализ моделей информационных процессов и структур (п.2 паспорта специальности).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 113 страницах и состоит из введения, четырех глав, разбитых на параграфы, заключения, приложений и библиографического списка из 101 пункта. Данная работа также включает в себя 38 рисунков и 10 таблиц.

Содержание работы. Во введении описаны цели исследования, дается обзор результатов по главам.

В первой главе проводится обзор существующих на данный момент моделей поведения толпы, для каждой из рассмотренных моделей дается характеристика ее эффективности. Описываются базовые подходы и технологии, применяемые для изучения поведения толпы. Элементы наиболее эффективных методов используются в качестве отправной точки в дальнейшей разработке более эффективного метода моделирования толпы.

Во второй главе рассматривается задача создания модели поведения толпы, используя подход расчета нескольких локальных потенциальных полей. Предлагается новая модель поведения толпы и набор метрик оценки эффективности работы для исследования и сравнения предложенной модели и других, уже существующих моделей. Рассматривается случай возникновения «тупиковых» ситуаций в толпе.

В третьей главе производится алгоритмизация процедуры расчета набора локальных потенциальных полей, предлагается набор алгоритмов расчета скалярных полей. Также рассматривается алгоритм расчета вектора движения для каждого участника толпы.

В четвертой главе описывается структура разработанного программного комплекса, позволяющего экспериментально оценить эффективность предложенных ранее моделей и алгоритмов, а также проводится тестирование эффективности полученной модели в сравнении как с реальными толпами, так и с уже существующими моделями поведения толпы.

В заключении делаются итоговые выводы, излагаются практические и научные результаты диссертационного исследования.

Глава 1. Проблема поведения толпы

Толпа – бесструктурное скопление нескольких существ в некотором объеме, лишенных ясно осознаваемой общности целей, но взаимно связанных сходством эмоционального состояния и общим объектом внимания. Участниками толп могут являться любые существа, способные передвигаться и принимать решения о направлении своего дальнейшего движения: это могут быть люди, животные (рыбы, птицы и т.д.), а также роботы.

Очевидно, что индивидуальное поведение человека вне толпы обуславливается множеством высокоуровневых факторов, связанных с его интеллектуальной деятельностью. Но с другой стороны, человек внутри толпы теряет свою индивидуальность и начинает подчиняться более простым законам поведения. Таким образом, толпа образом начинает приобретать новые качества, которые не являются характерными для отдельных независимых ее участников.

Разница индивидуального и коллективного поведения участников толпы, способность к самоорганизации и формированию новых качеств – все это является показателями сложности толпы. Существует четкая связь коллективного человеческого поведения, как в нормальных, так и в экстремальных условиях (например, во время террористических атак, наводнений, пожаров) не только с архитектурным и городским планированием, но также с организацией любых массовых мероприятий (концертов, митингов) [93]. Также с некоторыми изменениями задача о моделировании поведения толпы может быть применена к проектированию автомобильных дорог и развязок [61] и задачам о планировании пути для роботов.

Круг применений моделей поведения толпы ограничивается не только областью архитектурного и городского планирования, также в него входит

компьютерная графика [43], используемая во многих современных фильмах и телепередачах. Их создателям, помимо создания модели поведения толпы, требуется также создавать реалистичную визуализацию толпы.

Главная задача моделирования толпы – описание поведения множества индивидов в определенных условиях. Наиболее распространенной интерпретацией такого индивида является человек в толпе, но на это никаких принципиальных ограничений не существует: сходным способом моделируется поведение косяков рыбы, стай птиц, стад животных и групп роботов.

В настоящий момент моделирование толпы представляет собой развивающуюся область науки, во многом благодаря процессу мировой глобализации и увеличению численности населения на Земле. Как известно, крупные города привлекают к себе все большие количества иммигрантов, что как увеличивает нагрузку на транспортную систему таких городов, так и усложняет процессы городского планирования. Необходимость расчета параметров людского и транспортного потока породила особый класс геоинформационных систем: симуляторов толпы, дающих возможность измерения, оптимизации и визуализации подобных потоков.

1.1. Задача моделирования толпы

Сообщается [21], что с годами население крупных городов, как в России, так и в других государствах только возрастает (в том числе в странах с нисходящим трендом количества населения, например в России). В подобных городах многие объекты городского планирования, такие как транспортные магистрали и места скопления людей были спроектированы и построены без учета современного разрастания населения крупных городов, что на сегодняшний день приводит к образованию заторов, мешающих нормальному функционированию данных объектов. Эта же проблема стоит гораздо острее в случае возникновения экстремальной ситуации, в случае

которой нагрузка на подобные объекты многократно возрастает, а заторы могут привести к замедлению эвакуации и человеческим жертвам.

Корректная модель поведения толпы позволит имитировать возникновение подобных ситуаций и заблаговременно вносить изменения как в существующие, так и в проектируемые объекты городского планирования:

- обнаружение узких мест движения и областей высокой плотности потока людей,
- проверка различных вариантов проектирования объектов с целью поиска наиболее оптимального с точки зрения пропускной способности потока;
- проверка сценариев проведения различных общественных мероприятий (митингов, концертов, шествий) в экстремальных ситуациях.

1.2. Подходы к созданию моделей поведения толпы

Существует множество подходов к созданию моделей поведения толпы, и в целом их можно разделить на несколько классов:

- подходы на основе клеточных автоматов. В подобных подходах пространство, по которому перемещаются агенты, представляется в виде набора клеток, образующих периодическую решетку с заданными правилами перехода. Данные правила определяют состояние клетки в следующий момент времени через состояние клеток, находящихся от нее на определенном расстоянии в текущий момент времени [100];
- подходы на основе физических процессов динамики жидкости и газа. В данном случае каждый элемент толпы представляет собой частицу, состояние которой описывается уравнениями динамики

жидкости или газа (например, уравнениями Навье-Стокса или Бернулли) [66];

- подходы на основе Ньютоновской механики. В подобных подходах все социальные силы, действующие на агента в толпе, выражаются в виде физических сил, а движение агента описывается на основе второго закона Ньютона [88];
- подходы на основе мультиагентных методов. В соответствии с этим подходом, в процессе моделирования не описывается динамическая система в целом, а создается набор элементарных правил движения и взаимодействия отдельных агентов;
- гибридные подходы, использующие комбинацию нескольких вышеперечисленных подходов.

Рассмотрим подробнее каждый из вышеперечисленных подходов и основанные на них модели для дальнейшего анализа.

1.2.1. Клеточные автоматы

Клеточными автоматами называются системы, в которых время и пространство дискретны, а все величины принимают значения из конечного (обычно небольшого) набора значений.

Клеточные автоматы были впервые предложены в работе Фон Неймана [83] как дискретные динамические системы, состоящие из пространственной клеточной решетки. Клеточный автомат изменяет свое состояние на каждом дискретном шаге времени таким образом, что значение определенной клетки определяется значениями соседних клеток. Значения каждой клетки на текущем шаге вычисляются на основании значении соседних клеток на предыдущем шаге алгоритма с учетом набора локальных правил. В настоящее время клеточные автоматы успешно применяются во многих областях науки и техники, включая в себя модели уличного трафика. В последние несколько лет клеточные автоматы начали применять и к области моделирования поведения толпы.

Модели поведения толпы с использованием клеточных автоматов можно разделить на две категории:

- Основанные на взаимодействии агентов толпы и окружающей среды.

К примеру, Zhao [101] предложил двухмерный клеточный автомат для изучения динамики эвакуации здания. Perez [85] была описана модель на основе клеточного автомата для изучения динамики эвакуации толпы из ограниченной комнаты с учетом различных обстоятельств. Varas [100] предложил модель на основе КА для моделирования эвакуации с учетом препятствий.

- Основанные на взаимодействии участников друг с другом.

Некоторые модели изучают силы трения, возникающие в плотном потоке толпы. Kirchner [68] предложил две стохастических модели на основе КА: для симуляции эффектов трения и заторов во время эвакуации толпы из комнаты с одной дверью и для симуляции эффекта соревновательности в тех же условиях.

При рассмотрении таких систем используется следующая терминология: узел пространственной решетки (чаще всего ортогональной или двумерной гексагональной) называется клеткой. Ближайшие к нему узлы называются соседями, причем возможен различный выбор соседей, который определяет различные автоматы. То, что в узле решетки величины принимают некоторый набор значений, называется "данная клетка находится в состоянии с такими значениями величин". И, наконец, законы изменения состояния клеток в зависимости от состояния их соседей (одинаковые во всех клетках) носят название правил клеточного автомата.

Необходимый для описания поведения толпы клеточный автомат должен, иметь два состояния клетки, соответствующие наличию и отсутствию в этой точке человека, и учитывать две составляющие движения толпы - хаотичную и направленную.

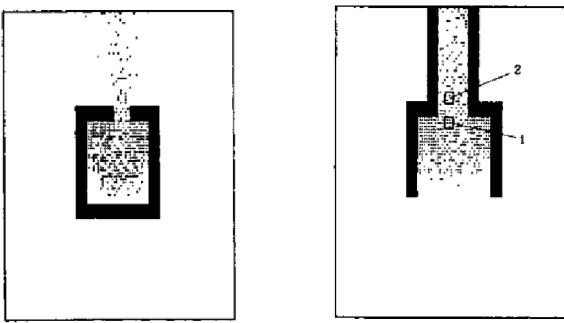


Рис. 1.1. Поведение группы людей при выходе из помещения через узкую дверь (слева) и при проходе через сужающийся коридор (справа)

На рисунке 1.1 показаны характерные случаи изучения поведения толп с использованием подхода на основании клеточных автоматов: на обоих рисунках заметно образование заторов в узких местах помещения. Данный рисунок был приведен в работе [33], посвященной созданию дискретной модели толпы.

Основным достоинством подхода на основании клеточных автоматов является простота реализации самого автомата и несложное описание правил, что является большим плюсом для области моделирования толп в компьютерной графике. Также гомогенность моделируемой толпы является большим плюсом при изучении однородных толп. Несмотря на свою простоту, клеточные автоматы показывают высокую долю соответствия результатов моделирования и натурных экспериментов. К примеру, в работе [78] было произведено моделирование потока пассажиров в метро города Токио на среднего размера станции Хамачи, а также проверка достоверности полученных результатов на основе реальных данных. Результат показал высокий процент соответствия предложенной модели поведению настоящих пассажиров в метро.

Недостатком данного подхода можно считать дискретность поведения элементов толпы, как во времени, так и в пространстве, что накладывает некоторые ограничения на свободу движения толпы. Также, во многих предложенных методах толпы представлены как однородные системы, что в реальности никогда не наблюдается: у каждого участника толпы, несмотря на

потерю индивидуальности при нахождении в толпе, остается набор индивидуальных параметров, таких как скорость передвижения, реакции и т.д.

1.2.2. Непрерывные модели

С точки зрения непрерывного подхода к интерпретации толпы, толпа может быть представлена в виде континуума, учитывая тот факт, что расстояния между участниками значительно меньше, чем размер помещения, по которому участники двигаются.

Состав толпы зачастую разнороден: у каждого участника толпы есть различные характеристики движения и отличающиеся цели. К примеру, пешеход, двигающийся вверх по склону, будет иметь характеристики, отличающиеся от характеристик такого же пешехода, идущего вниз по склону. Таким образом, можно заметить, что направление движения в некоторых случаях определяет некоторые характеристики движения людей. Для получения уравнения движения для отдельного человека в толпе, в работе [66] введены три гипотезы:

1. Скорость перемещения агентов определяется плотностью окружающей толпы, поведенческими характеристиками и параметрами ландшафта.
2. У агентов есть чувство цели, которую они пытаются достичь.
3. Агенты пытаются минимизировать время, проведенное в пути с учетом предыдущих двух гипотез.

Наблюдения реальных толп подтверждают эти гипотезы. Гипотеза 1 – подтверждение выводов работы Гриншилда [61] для автомобильного трафика, также рассмотренного в работе Лайтилла [75], посвященной исследованию кинематических волн в потоке транспорта на автомагистрали. В дальнейшем многие работы подтвердили отношение гипотезы 1 к потокам толп, такие как работа Фруина [59] и Пушкирева [87]. Но, несмотря на это,

эта гипотеза не применима к толпам с высокой плотностью, в которых велика сила трения между агентами.

Значение гипотезы 2 зависит от уровня визуальной информированности каждого агента. В случае различия роста агентов в толпе, может случиться такая ситуация, когда низкорослые агенты не могут объективно оценить ситуацию и им приходится получать информацию о направлении желаемого движения за счет соседних, более высокорослых агентов.

Третья гипотеза зависит от причины движения и мотивации каждого агента. Данная гипотеза адекватна только для агентов, имеющих цель (конкретный определенный географический пункт назначения) [76]. К тому же данная гипотеза требует, чтобы задачи движения к цели и избегания повышенной плотности толпы были математически разделенными.

Предложенные гипотезы ведут к базовому уравнению движения агента в потоке толпы для двухмерного случая:

$$-\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(pg(p)f^2(p)\frac{\partial \varphi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(pg(p)f^2(p)\frac{\partial \varphi}{\partial y}) = 0$$

$$g(p)f(p) = \frac{1}{\sqrt{(\frac{\partial \varphi}{\partial x})^2 + (\frac{\partial \varphi}{\partial y})^2}} , \quad (1.1)$$

где φ – время до окончания движения, p – плотность толпы, $f(p)$ – скорость агентов как функция от плотности, $g(p)$ – дискомфорт как функция от плотности, (x, y, t) – координаты агента и текущее время. Данная формула была предложена в работе Hughes [66].

В работе Блю [48], путем численного решения данного уравнения, была проведена симуляция потока толпы. Были выделены два режима движения толпы – критический и некритический, что провело четкую параллель с движением жидкости по каналу в гидродинамике (Наллури [81]). Стоит отметить тот факт, что работы в области гидродинамики редко пересекаются с областью моделирования толпы.

Из приведенных уравнений можно сделать вывод о близости понятий потоков толпы и потоков жидкости (без учета трения). Но есть и некоторые различия: в толпе возможно движение нескольких типов агентов (с разными целями, скоростью и т.д.). Примечателен тот факт, что в соответствии с гипотезой 1, скорость каждого типа агентов зависит от плотности окружающей толпы. Но общая плотность толпы будет близка к средней плотности агентов этого же типа – данный факт объясняется тем, что одинаковые агенты имеют тенденцию к движению группами, как это было описано в работе Тошиюки [97].

К достоинствам данного подхода можно отнести возможность описания толпы как динамической системы.

1.2.3. Броуновское движение

В статье Dogbe [55] проводилось математическое исследование поведения толпы с точки зрения теории игр.

Модель толпы, представленная в работе Dogbe, представляет собой систему дифференциальных уравнений, основанных на уравнении Фоккера-Планка:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = - \sum_{i=1}^N \frac{\partial}{\partial x_i} [D_i^1(x_1, \dots, x_N) f] + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [D_{ij}^2(x_1, \dots, x_N) f], \quad (1.2)$$

где D^1 - вектор сноса, а D^2 - тензор диффузии.

Критерий для i -того участника толпы выглядит следующим образом:

$$u(x, s) := J(x, \alpha; \rho) = \inf_{\alpha} \left[E \int_s^T L(x(t), \alpha(t); \rho(t)) dt + F(x(T); \rho(T)) \right], \quad (1.3)$$

где $L(x, \alpha; \rho)$ - добавочная стоимость (динамически зависящая от текущего и прошлого положения препятствий и окружающих соседей), $F(x; \rho)$ - маргинальная стоимость (зависящая от плотности толпы).

Стоит обратить внимание на тот факт, что работа [55] представляет собой набор начальных методологий исследования динамики толпы, и

апробация данной модели в сравнении с поведением реальных толп не проводилась.

Также стоит заметить, что использование моделей на основе броуновского движения достаточно спорно. Проблема заключается в том, что в пограничных ситуациях, например, при значении силы, влекущей участников толпы к цели намного более низкой, чем величина диффузии, в соответствии с такими моделями толпа должна двигаться случайно в соответствии с броуновским движением, что при наблюдениях за реальными толпами замечено не было – при пропадании объекта внимания толпа либо находит новый такой объект, либо стоит неподвижно.

1.2.4. Ньютоновская механика

В статье Хелбинга [62] исследовалось поведение толпы в состоянии паники в процессе покидания помещения через узкую дверь в экстренном случае, например, при пожаре.

Модель, построенная авторами, заключается в следующем: движение каждого человека происходит под действием нескольких сил – это могут быть не только настоящие физические силы, но и психологическое взаимодействие. Каждая из этих сил заставляет человека двигаться с ускорением.

Пусть в какой-то момент времени скорость i -го человека равна V_i . Эта скорость может не совпадать с "желаемой" скоростью движения V_{i0} . Например, "желаемая" скорость движения человека, который только что узнал об опасности, направлена к выходу и максимальна по модулю, вне зависимости от его "настоящей" скорости. Для того чтобы разогнаться, человеку требуется некоторое время, которое мы обозначим через T_i .

Для учета сил, действующих между индивидами, во-первых, стоит учесть, что даже в отсутствие непосредственного физического контакта между двумя людьми существует некое "психологическое отталкивание", т.е. тенденция держаться подальше друг от друга. Эта сила была

промоделирована экспоненциальным законом: $f_{ij} \sim \exp(-d_{ij}/b)$, где d_{ij} - расстояние центрами масс i -го и j -го индивидуумов. Затем, в случае непосредственного контакта возникает радиальная сила давления, а также "сила трения скольжения", которая пропорциональна относительной скорости двух людей. Таким образом, учитывалось, что люди, движущиеся с разными скоростями, мешают друг другу локтями. Наконец, аналогичные силы f_{iW} вводились для описания взаимодействия человека со стенкой, включая и эффект психологического отталкивания от стен.

Таким образом, уравнение, описывающее движение i -го человека (2-ой закон Ньютона), выглядит так:

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = m_i \frac{\vec{v}_i^o(t) - \vec{v}_i(t)}{T_i} + \sum_{j \neq i} \vec{f}_{ij} + \sum \vec{f}_{iw}. \quad (1.4)$$

Поскольку такое уравнение движения имеет место для каждого человека ($i=1,2,\dots,N$), в результате получается система связанных уравнений.

Аналитически решить эту систему авторам не удается, поэтому приходится обращаться к численным методам. В результате получается динамическая картина движения толпы, которую можно отобразить графически.

Для того чтобы решать уравнения численно, необходимо определить значения всех параметров и коэффициентов, присутствующих в модели. Однако в задаче о поведении толпы присутствуют величины, не поддающиеся прямому измерению (психологическое отталкивание), поэтому исследователю приходится самому присваивать этим параметрам значения, которые выглядят правдоподобными. Наличие таких коэффициентов, вообще говоря, уменьшает достоверность результатов, а значит и уменьшает предсказательную силу модели.

Авторы работы это вполне осознавали; в их статье говорится о необходимости привлечения дополнительных экспериментальных данных для подтверждения и улучшения модели.

В численном моделировании результатом можно называть явление, устойчивое по отношению к небольшим изменениям параметров, то есть неизменно возникающее при различном наборе коэффициентов.

Из результатов работы Хелбинга [62] следует отметить следующее: во-первых, был зафиксирован переход от простого неупорядоченного движения к толпе и возникновению давки около выхода. Пока "желаемая" скорость покидания помещения была меньше 1,5 м/с, движение людей было относительно организованным. При больших скоростях сила, "толкающая" человека к выходу, превышала взаимное психологическое отталкивание между людьми, в игру вступал непосредственный физический контакт, возникала давка, лавинообразно образовывалась толпа.

Затем наблюдался эффект, названный авторами "чем быстрее, тем медленнее". Это значит, чем быстрее люди хотят покинуть комнату (т.е. чем выше "желаемая" скорость), тем медленнее толпа проходила через дверь: люди, находящиеся непосредственно у выхода, мешали друг другу.

В-третьих, когда "желаемая" скорость возрастала еще больше и сила взаимодействия людей превышала критическую, давление в толпе стало приводить к травмам отдельных людей. В рамках этой модели, травмированный человек превращался в неподвижное препятствие, это приводило к еще большим заторам, и в результате количество человек, успевших покинуть комнату за определенное время, резко уменьшалось.

В целом, авторы работы утверждают, что их модель уже сейчас способна описывать все основные черты поведения паникующей толпы, и предлагают использовать их программу при проектировании общественных зданий и построек.

К недостаткам этого подхода можно отнести невозможность моделирования гетерогенных толп.

1.2.5. Мультиагентные методы

Впервые мультиагентный подход к моделированию толпы был предложен в работе Reynolds [88], в которой приводилась модель поведения стаи птиц. Подобный объект моделирования был выбран по причине очень сложного характера движения стай птиц: несмотря на то, что стая состоит из отдельных птиц, общий характер движения обладает гибкостью, синхронизацией и создает впечатление наличия централизованного управления. Несмотря на это, характер такового движения складывается только из отдельных независимых поступков агентов, сделанных на основе их локального восприятия окружающей обстановки.

В этой работе было введено понятие «боид» (англ. boid), обозначающее независимого, подобного птице агента. Боид является виртуальным агентом, который взаимодействует с подобными ему агентами путем передачи сообщений. Подобная модель поведения была уже предложена некоторыми авторами [84, 86] как наиболее подходящая для описания подобного рода структур. Также в литературе, посвященной распределенным компьютерным системам, стаи птиц (а также косяки рыб и стада животных) представлены как устойчивые самоорганизующиеся системы [88].

Птица, участвующая в стае, должна обладать способностью координировать свои движения со своими соседями. Действия, объединенные в эту способность, не уникальны – все живые существа обладают ими. Реальные стаи птиц следуют двум противоположным шаблонам поведения: желание находиться как можно ближе к стае и избегание столкновения с соседями.

Данные шаблоны выработаны природой в процессе эволюции как механизм защиты от хищников, поиска пищи и размножения [88]. Важно заметить, что способности стаи не меняются в худшую сторону при увеличении числа птиц в ней – не существует перегруженных стай.

Для процесса симуляции стаи была предложена следующая модель боида в виде набора правил, в процессе убывания приоритета:

1. Избегание столкновений с ближайшими соседями.
2. Согласование скорости.
3. Согласование направления движения в попытке не удаляться от центра стаи.

Идеи из этого подхода частично легли в основу данного диссертационного исследования. К достоинствам этого метода можно отнести относительно простой способ задания правил поведения для участников толпы (также с возможностью расширения их количества). Недостатком данного подхода является наличие довольно большого количества свободных параметров системы, влияющих на поведение толпы в целом – выбор и верификация этих параметров не рассматривается в большинстве работ по этой тематике.

1.2.6. Гибридные методы

В работе Трюи [98] была предложена идея использования набора глобальных скалярных полей для толпы, в которой каждый агент пытался минимизировать текущее значение энергии, и в рамках одного алгоритма, без разделения на отдельные процессы, следовал глобальной цели и огибал локальные препятствия. Трюи было предложено три гипотезы, исходя из которых формировался набор глобальных потенциальных полей:

Гипотеза 1. Каждый агент пытается достичь определенной географической цели. Цель может быть как точкой (например «Красная пл., д.1»), так и направлением (например, «на восток»). Также цель может быть динамической (например, «следовать за определенным человеком» или «идти к ближайшему свободному стулу в комнате»).

Гипотеза 2. Агенты двигаются на максимально возможной в данных условиях скорости. Окружающая среда воздействует на скорость путем ее уменьшения на подъемах и увеличения на спусках. Вдобавок, максимальная скорость зависит от плотности окружающей агента толпы. В общем случае,

такая зависимость выражается в виде $\bar{x} = f(x, \theta)n_\theta$, где f – потенциальное поле максимальной скорости для агента в точке x , двигающегося в направлении θ , $n_\theta = [\cos\theta, \sin\theta]^T$ – единичный вектор в направлении θ .

В реальных толпах, при выборе оптимального пути, люди предпочитают наикратчайший, но на это предпочтение зачастую влияет желание избегать заторов и прочих ситуаций, влияющих на время прохождения пути. К тому же, реальные люди пытаются избегать попадания в области повышенного дискомфорта (например, на автодорогу). Обобщив эти идеи, в работе [98] было выдвинуто предположение, что агенты в толпе выбирают путь с минимальной комбинацией следующих факторов:

- длина пути;
- затраченное время;
- ощущенный дискомфорт.

Гипотеза 3. Пусть P – множество всех возможных путей от точки x к одной из целей, таким образом, выбирая путь $P \in P$, агент пытается минимизировать величину:

$$\alpha \int_P 1 ds + \beta \int_P 1 dt + \gamma \int_P g dt,$$

где α, β, γ – веса данных факторов, ds – интеграл по длине пути, dt – интеграл по времени. Учитывая, что $ds = f dt$, где f – скорость, запишем формулу в виде:

$$\begin{aligned} & \alpha \int_P 1 ds + \beta \int_P \frac{1}{f} ds + \gamma \int_P \frac{g}{f} dt \\ & \int_P C ds, \quad C = \frac{\alpha f + \beta + \gamma g}{f}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Предложенный критерий используется для расчета оптимального пути. Пусть существует функция $\phi \in R$, на всей своей области определения равная значению критерия оптимальности. Очевидно, что для одновременного достижения цели и минимизации критерия оптимальности, агент должен двигаться в сторону, противоположную значению градиента функции ϕ .

Данная потенциальная функция в точке цели пути равна нулю, а на всем остальном промежутке удовлетворяет уравнению Эйконала:

$$\|\nabla \phi(x)\| = C, \quad (1.6)$$

где $\nabla \phi(x)$ - градиент функции $\phi(x)$.

Таким образом, вектор движения агента записывается в форме:

$$\bar{x} = -f(x, \theta) \frac{\nabla \phi(x)}{\|\nabla \phi(x)\|}, \quad (1.7)$$

где $f(x, \theta)$ - значение скорости агента, находящегося в точке x , двигаясь в направлении θ .

В полной форме, модель, предложенная Трюи, выглядит следующим образом:

$$\Phi(x) = \int_p C(x) ds \quad (1.8)$$

$$C(x) = \frac{\alpha f(x) + \beta + \gamma g(x)}{f(x)}$$

$$\frac{dx}{dt} = -f(x, \theta) \frac{\nabla \Phi(x)}{\|\nabla \Phi(x)\|} \quad (1.9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f_T(x, \theta) = f_{\max} + \left(\frac{\nabla h(x)n_\theta - s_{\min}}{s_{\max} - s_{\min}} \right) (f_{\min} - f_{\max}) \\ f_U(x, \theta) = u(x + rn_\theta)n_\theta \\ f(x, \theta) = f_T(x, \theta) + \left(\frac{p(x + rn_\theta) - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}} \right) (f_U(x, \theta) - f_T(x, \theta)) \end{array} \right. \quad (1.10)$$

К достоинствам гибридного подхода к созданию моделей поведения толпы можно отнести возможность совместить достоинства разных моделей в рамках одной теории, что в теории позволяет добиться результатов, наиболее близких к поведению реальных толп. К недостаткам же стоит отнести сложность совмещения нескольких подходов в рамках одной модели из-за различных методик описания взаимодействий внутри толпы.

1.2.7. Графоаналитический метод

Данный метод был впервые предложен В.М. Предтеченским [31] для оценки соответствия характеристик зданий и сооружений возложенным на них функциям. Для создания этого метода была проведена большая работа по изучению поведения толпы в различных базовых ситуациях на основе как реальных событий, так и искусственно симулированных.

В процессе исследования был создан набор базовых задач, которые решает толпа, среди них:

1. Определение скорости потока толпы в зависимости от плотности.
2. Зависимость плотности толпы от физических характеристик ее участников (возраст, пол, одежда).
3. Изменение плотности потока при прохождении сужений и расширений, дверных проемов.
4. Изменение скорости потока в зависимости от уровня наклона пола, а также при перемещении по лестницам.
5. Поведение потока при его расщеплении и слиянии с другим потоком.
6. Изменение поведения толпы в зависимости от текущего режима перемещения (обычный, аварийный, паника).

В дальнейшем, с учетом условий данных базовых задач, была проведена серия натурных наблюдений (или использованы данные подобных натурных наблюдений у других исследователей [4]), результаты которых были занесены в соответствующие таблицы.

На основании полученных данных были выявлены и математически описаны простейшие закономерности в поведении потока толпы при возникновении определенного набора базовых ситуаций. Для анализа более сложных ситуаций требовалось произвести их декомпозицию к изученному ранее базису.

Фактически, данная модель поведения толпы может описать лишь набор статистических параметров толпы, таких как средняя скорость и средняя плотность на определенном участке, а также время достижения цели.

Основным отличием данного метода является большой уровень соответствия модельных и экспериментальных данных и, следовательно, высокая точность предсказания. К минусам можно отнести высокую сложность расчетов, несмотря на кажущуюся простоту этого метода, а также проблемы с задачами поведения толпы, не позволяющие произвести четкую и однозначную декомпозицию.

1.2.8. Модель ADPLV

Расчет графоаналитическим методом был изобретен еще в 60-е годы 20-го века и, несмотря на свою простоту, весьма трудоемок. И, поэтому, при появлении первой возможности использования ЭВМ стали разрабатываться подходы к их применению для расчетов движения людских потоков в зданиях различного назначения, которые создали необходимые предпосылки для разработки в последующем алгоритма и соответствующих ему программных комплексов имитационного моделирования.

Метод ADPLV был впервые представлен в работе Холщевникова [37]. Идея имитационного моделирования людских потоков состоит в том, чтобы, придав малым совокупностям людей естественные, не зависящие от их сознания закономерности связи между их скоростью движения и ощущаемыми ими плотностью потока и видом пути, рассмотреть, как будет развиваться процесс в последовательные, достаточно малые интервалы времени Δt_i , в течении которых и могут происходить наблюдаемые, но не улавливаемые другими методами изменения состояний потока.

Плотность людского потока на участке его нахождения рассчитывается по формуле:

$$D_i = N_i / b_i \Delta l_i, \quad (1.11)$$

где N_i - количество людей, $b_i \Delta l_i$ - занимаемая площадь (b_i - ширина, Δl_i - длина). При этом количество людей на элементарном участке $b_i \Delta l_i$ в момент времени t_{i+1} определяется как баланс количества людей, успевших уйти с него на последующий элементарный участок за интервал времени Δt и перейти на него за этот интервал времени с предшествующего элементарного участка.

Скорость движения людского потока при плотности D_i на i -том отрезке участка пути k -того вида – случайная величина $V_{D,k}$, имеющая следующие характеристики:

- математическое ожидание:

$$M[V_{D,k}] = V_{0,k} \text{ при } D_i \leq D_{0,k}$$

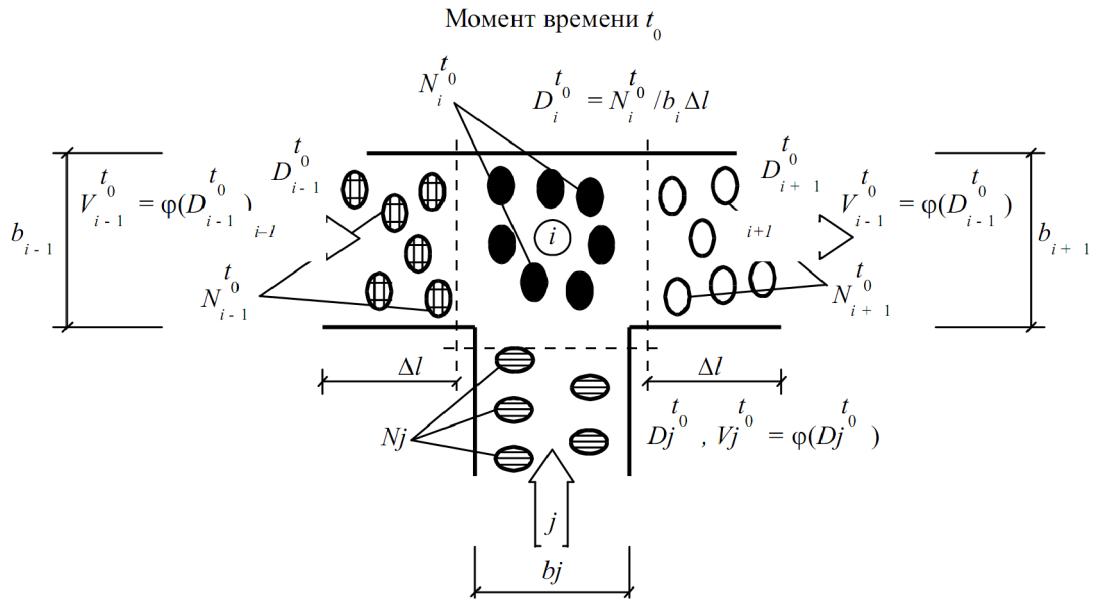
$$M[V_{D,k}] = m V_{0,k} \left(1 - a_k \ln \frac{D_i}{D_{0,k}}\right), \text{ при } D_i \geq D_{0,k} \quad (1.12)$$

- среднее квадратичное отклонение:

$$\sigma(V_{D,k}) = \sigma(V_{0,k}) \left(1 - a_k \ln \frac{D_i}{D_{0,k}}\right) \quad (1.13)$$

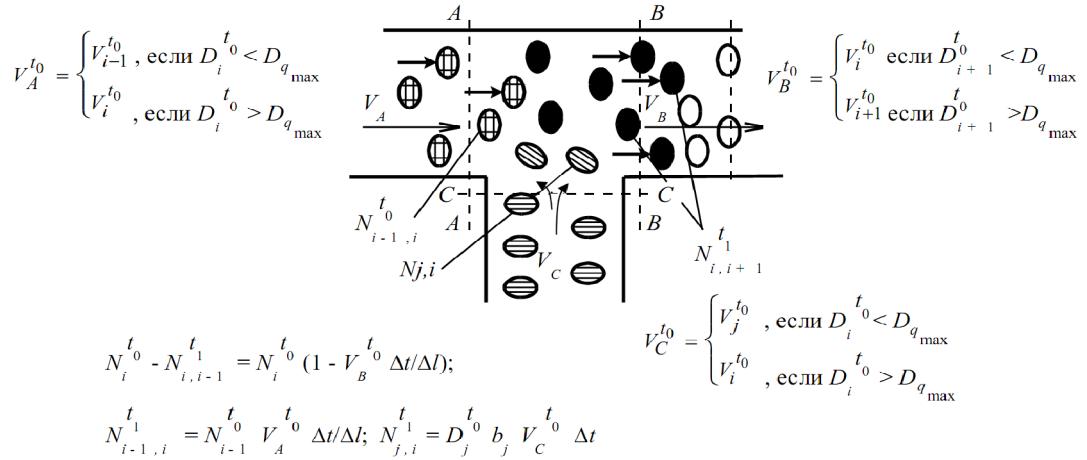
где $D_{0,k}$ – предельное значение плотности людского потока, до достижения которого возможно свободное движение людей по k -тому виду пути, a_k – коэффициент адаптации людей к изменениям плотности потока при движении по k -тому виду пути, D_i – значение плотности людского потока на i -том отрезке участка пути, m – коэффициент влияния проема.

При любом возможном значении $V_{0,k}$ люди в количестве $N_i^{t_0}$, находящиеся в момент t_0 на i -том элементарном участке, двигаются по нему и начинают переходить на последующий участок $i+1$. На участок i в свою очередь переходит часть людей с предыдущего ($i-1$) участка и из источника j .



Момент времени $t_1 = t_0 + \Delta t$

$$D_i^{t_1} = (N_i^{t_1} - N_{i,i+1}^{t_1} + N_{i-1,i}^{t_1} + N_{j,i}^{t_1})/b\Delta l; V_i^{t_1} = \varphi(D_i^{t_1})$$



Доля участия при образовании скопления на участке i

$$\Delta N_{i-1}^{t_1}/\Delta N_j^{t_1} = P_{i-1}^{t_1}/P_j^{t_1} = D_{i-1}^{t_1} V_{i-1}^{t_1} b_{i-1}^{t_1} / D_j^{t_1} V_j^{t_1} b_j^{t_1}$$

Рис 1.2. Изменение состояния потока в последовательные моменты времени

По прошествии времени Δt , к моменту $t_1 = t_0 + \Delta t$ только часть людей $N_{i,i+1}^{t_1}$ с участка i успеет перейти на участок $i+1$. К этому моменту времени из $N_i^{t_0}$ людей, бывших на участке I в момент времени t_0 , останется $N_i^{t_0} - N_{i,i+1}^{t_1}$ людей. Их число пополняется за счет людей, успевших за этот интервал времени перейти на него с последующего участка и из источника. Тогда плотность потока на участке i в момент t_1 будет равна

$$D_i^{t1} = \frac{N_i^{t0} - N_{i,i+1}^{t0} + N_{i-1,i}^{t0} + N_{j,i}^{t0}}{b_i \Delta l} \quad (1.14)$$

Подобный процесс происходит на всех элементарных участках, занятых людским потоком. Изменение плотности потока на каждом из них в различные моменты времени отражает процесс переформирования различных частей потока и, как частный случай, процесс растекания потока.

Изменение плотности потока на каждом из элементарных участков в последовательные моменты времени зависит от количества людей, переходящих через границы участков. В общем случае количество людей, переходящих за интервал времени Δt с участка I на следующий участок $i+1$ составляет

$$N_{i,i+1}^{t1} = D_i^{t0} b_i V_{nep} \Delta t, \quad (1.15)$$

т.е. зависит от скорости перехода V_{nep} через границу участка.

Скорость перехода V_{nep} через границы смежных элементарных участков следует принимать, руководствуясь следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} V_{nep} &= V_i^{t0} \text{ если } D_{i+1}^{t0} \leq D \text{ при } \max V_{iDk} \bullet D = q_{\max}, \\ V_{nep} &= V_{i+1}^{t0} \text{ если } D_{i+1}^{t0} > D \text{ при } \max V_{iDk} \bullet D = q_{\max} \end{aligned} \quad (1.16)$$

Если $V_{nep} = V_i^{t0}$, то время t_{nep} , необходимое для перехода всех N_i^{t0} людей, находящихся на элементарном участке i в момент t_0 на следующий участок $i+1$ будет определяться по формуле

$$t_{nep} = \frac{\Delta l}{V_i^{t0}} \quad (1.17)$$

За интервал времени $\Delta t < t_{nep}$ на участок $i+1$ перейдут не все N_i^{t0} людей, а только их часть

$$N_{i,i+1}^{t0} = \frac{N_i^{t0} V_i^{t0} \Delta t}{\Delta l} \quad (1.18)$$

Количество людей, не успевших перейти за интервал времени Δt с участка I на участок $i+1$, следовательно составит

$$N_i^{t0} - N_{i,i+1}^{t0} = N_i^{t0} \left(1 - \frac{V_i^{t0} \Delta t}{\Delta l}\right) \quad (1.19)$$

Если $V_{nep} = V_i^{t_0}$, то справедливы аналогичные соотношения, в которых вместо $V_i^{t_0}$ следует принимать $V_{i+1}^{t_0}$. При этом количество людей, остающихся на участке i увеличивается, а количество людей, переходящих на него с предыдущего участка $i-1$ и источника j остается тем же, что и при $V_{nep} = V_i^{t_0}$. Следовательно, плотность потока на участке i в следующий момент времени t_1 будет больше чем при $V_{nep} = V_i^{t_0}$. Она будет расти тем быстрее, чем меньше значение $V_{i+1}^{t_0}$, т.е. чем выше значение $D_{i+1}^{t_0}$. При $D_{i+1}^{t_0} = D_{\max}$ этот процесс моделирует распространение скопления людей.

Если в какой-то момент времени t_n плотность потока на участке i достигла максимальной величины и дальше увеличиваться не может, то на этот участок в этот момент времени не может прийти ни один человек ни с предшествующего участка, ни из источника. В результате перед их границами с участка i задерживается соответственно $\Delta N_{i-1}^{t_n}$ и $\Delta N_{i,j}^{t_n}$ людей.

В следующий момент времени t_{n+1} часть людей с участка i переходит на участок $i+1$, плотность людского потока на нем уменьшится и часть скопившихся перед его границей людей сможет перейти на него. Но это не все люди, скопившиеся на границах участков $i-1$ и j . Доля их участия в пополнении людьми участка i в момент t_{n+1} определяется соотношением

$$\frac{\Delta N_{i-1}^{t_{n+1}}}{\Delta N_j^{t_{n+1}}} = \frac{D_{i-1}^{t_{n+1}} V_{i-1}^{t_{n+1}} b_{i-1}}{D_j^{t_{n+1}} V_j^{t_{n+1}} b_j} \quad (1.20)$$

Эти соотношения полностью описывают состояние людского потока на элементарных участках и их переходы в последовательные моменты времени при конкретных значениях $V_{0,k}$ и позволяют рассчитать соответствующие значения времени движения людских потоков с участков их формирования до прохода последней группой людей к сечению пути, в котором заканчивается эвакуация. Совокупность значений t_Δ , полученных при различных значениях $V_{0,k}$, формирует эмпирическое распределения вероятностей значений t_p . Это распределение позволяет рассчитать по

правилам математической статистики значение времени завершения эвакуации, соответствующее вероятности $P(t_{p,99}) = 0,999$.

Адекватность имитационной модели реальному процессу движения людского потока неоднократно проверялась натурными наблюдениями. Один из примеров сопоставления результатов из работы [37] приведен на рисунке 1.3.

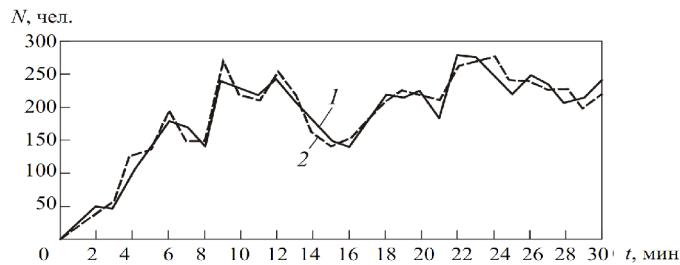


Рис 1.3. Количество людей, проходящих через поперечное сечение пути в последовательные моменты времени в пассажирском зале метрополитена. 1 – эксперимент, 2 – моделирование

Высокая степень соответствия результатов моделирования данным натурных наблюдений позволила широко использовать имитационную модель в практике проектирования уникальных объектов.

К недостаткам данного метода можно отнести тот факт, что, исходя из предложенной методики, невозможно определить характер движения отдельного агента в толпе. Данный метод определяет только вероятностные количественные характеристики групп, такие как плотность, количество людей, скорость. Также этот метод не подходит для гетерогенных толп, в которых разные группы агентов имеют различные цели и характеристики.

1.3. Исследования о поведении реальных толп

В работе [31] проведен обзор и анализ многих натурных наблюдений за поведением реальных толп, в том числе изучение зависимости плотности, скорости толпы и пропускной способности различных сооружений от различных внешних параметров.

Колебания скорости участников толпы зависят от многих причин, трудно подчиняющихся точному расчету. Здесь имеют значение и физические данные человека, и различные личные обстоятельства.. Поэтому при оценке скорости движения неизбежно приходится прибегать к средним значениям, которые можно считать надежными, если они установлены на основании статистических методов. В значительной степени скорость движения зависит от плотности людской массы. Чем выше плотность, тем медленнее движение. На рисунке 1.4, представленном в [31], схематически изображена толпа, покидающая зал кинотеатра после сеанса: наблюдается увеличение плотности толпы в области, прилегающей к выходу из зала.

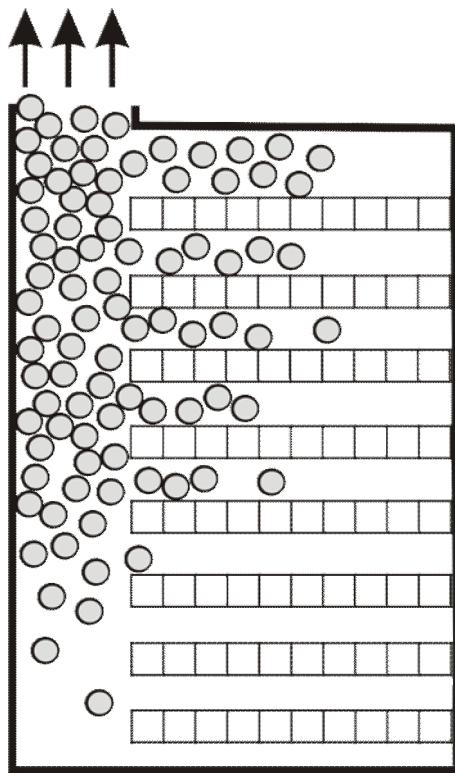


Рис 1.4. Людской поток в проходе зрительного зала кинотеатра по окончании сеанса (схема)

Значительные скопления людей наблюдаются в метро в часы пик, особенно перед эскалаторами из-за недостаточной их пропускной способности.

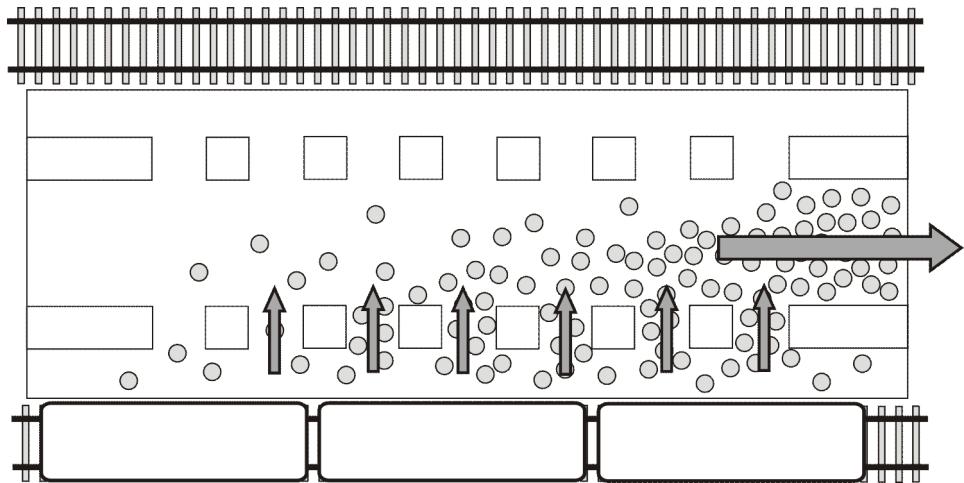


Рис 1.5. Образование людского потока с высокой плотностью в подземном зале станции метрополитена перед эскалатором

На приведенных рисунках движение людских потоков носит спокойный характер. Но если предположить, что в таких скоплениях неожиданно возникнет аварийная ситуация, легко представить себе к каким серьезным последствиям она может привести, если процесс движения по тем или иным причинам будет затруднен.

На рисунке 1.5, приведенном в работе [31], показана толпа с высокой плотностью, возникающая в метро на площадке перед эскалатором после прибытия поезда. Как видно из этого рисунка, даже при спокойном движении толпы возникает затор.

Получить параметры движения людей в аварийных условиях не представляется возможным, поэтому для этих целей приходится прибегать к использованию или условий приближения, близких к аварийным, или методов экстраполяции данных, полученных в нормальных условиях.

На натурных наблюдениях при нормальных условиях отмечалась очень высокая плотность скопления людских масс, составляющая более $7 \text{ чел}/\text{м}^2$. При движении в аварийных условиях плотность может достигать $10-11 \text{ чел}/\text{м}^2$ вследствие силовых воздействий при сжатии в случае скопления людей, стремящихся выбраться из потока.

В работе С.В.Беляева [4] на основе натурных наблюдений была сформулирована таблица зависимости пропускной способности и скорости движения от плотности людского потока, приведенная в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Зависимость пропускной способности и скорости от плотности потока

Плотность, м/ч	Пропускная способность, гор. ч/м*мин	Пропускная способность лест., ч/м*мин	Скорость гор., м/мин	Скорость лест., м/мин
20	25	35	7	
30	50	32	15	10
40	48	28	20	11
50	44	25	21	12
60	39	22	23	13
70	35	20	24	14
80	33	18	25	15
90	30	16	26	15
100	28	15	28	16
110	26	14	29	16
120	25		30	17

Соответственно, зависимость пропускной способности от плотности показана рисунке 1.6, а зависимость скорости движения потока от плотности на рисунке 1.7.

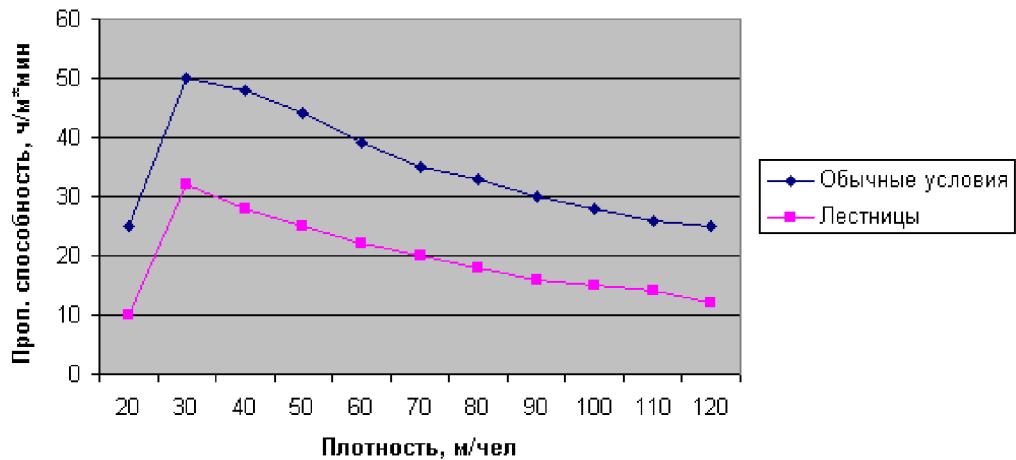


Рис 1.6. Зависимость пропускной способности от плотности для обычных условий и движения по лестницам

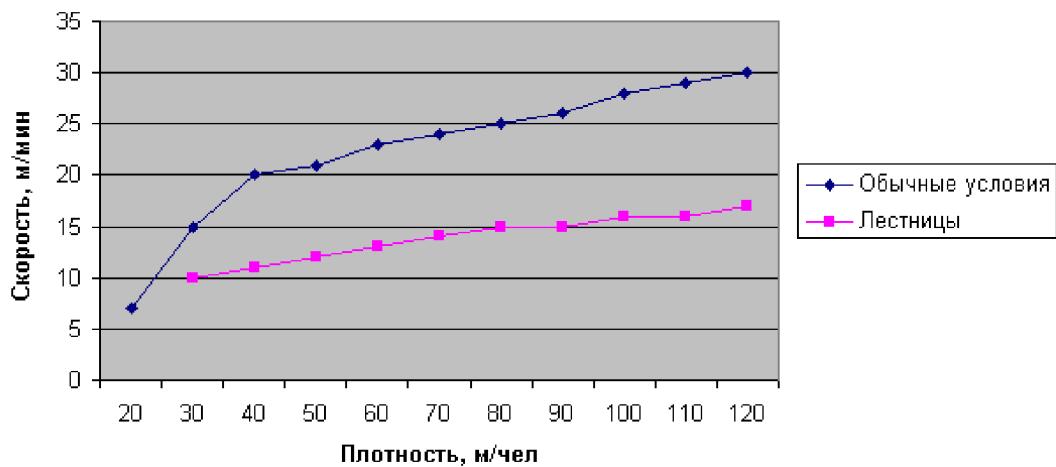


Рис 1.7. Зависимость скорости движения людского потока от плотности для обычных условий и движения по лестницам

Можно обратить внимание, что предложенные Беляевым данные описывают толпы с очень низкой плотностью. В работе М.Я. Ройтмана [32] были приведены подобные данные, но уже для толп с довольно высокой плотностью. Эти данные показаны в таблице 2 и на рисунке 1.8.

Таблица 1.2. Пропускная способность выходов

Линейная плотность, м/чел	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
Скорость движения, м/мин	70	70	70	60	50	40	30	20	16
Пропускная способность, чel/(м*мин)	84	96	106	102	100	96	90	54	50

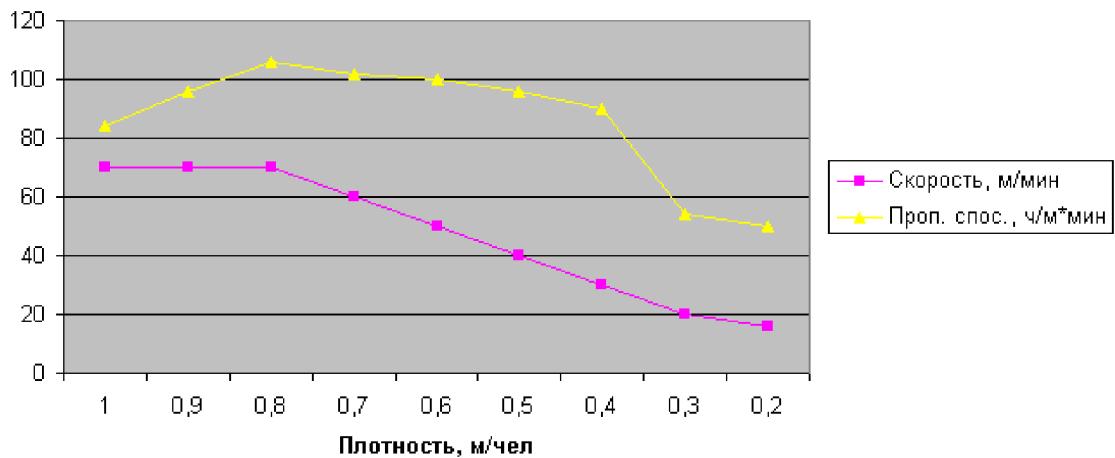


Рис 1.8. Зависимость скорости и пропускной способности от плотности толпы

Вышеописанные данные натурных наблюдений за поведением толпы носят большую практическую ценность и в дальнейшем будут использованы для апробации предлагаемой модели поведения толпы на предмет соответствия ее с реальными толпами.

1.4. Выводы

В процессе изучения предметной области «моделирование поведения толпы», был отмечен набор проблем, которыми обладают большинство из ныне существующих моделей поведения толпы:

1. У большинства моделей отсутствуют данные об исследовании их адекватности в сравнении с реальными толпами. Модели Трюи [98], Хагса [66] и Рейнолдса [88], к примеру, являются фактически не подтвержденными на практике академическими гипотезами. Только модели ADPLV и графоаналитическая имеют под собой исследования на адекватность.

2. Модели ADPLV и графоаналитическая не рассчитаны на гетерогенную конфигурацию толпы, к тому же толпа в этих моделях является непрерывным целым, и из него нельзя выделить поведение отдельных участников толпы.

Путем проведения аналогий с работой Трюи [98] в области представления факторов, действующих на агентов в виде скалярных полей и работами Reynolds как в области мультиагентного подхода к моделированию поведения участников толпы, так и в области гетерогенных толп, было выдвинуто следующее предположение: создание модели поведения гетерогенной толпы на основании мультиагентного подхода и скалярных полей со следующим обучением модели на основании данных о реальном поведении толп позволит приблизить поведение виртуальных толп к поведению реальных.

1.5. Постановка задачи

Целью данного диссертационного исследования является разработка и анализ моделей поведения толпы в интересах создания новых эффективных технологий и программных средств моделирования толпы.

Для достижения цели работы необходимо решить следующие задачи:

1. Проведение анализа существующих моделей поведения толпы.
2. Формулирование мер эффективности поведения толпы.
3. Разработка математической модели поведения толпы на основе локальных скалярных полей.
4. Разработка мультиагентных алгоритмов расчета индивидуальных скалярных полей и вектора движения для отдельных участников толпы, оценка эффективности их работы.
5. Разработка структуры программного обеспечения, реализующего предложенные алгоритмы моделирования поведения толпы.

6. Проведение экспериментальных исследований для оценки практической применимости полученных результатов, проведение натурного эксперимента.

Глава 2. Моделирование поведения толпы

Эта глава представляет собой описание модели синтеза поведения толпы с агентной динамикой. В этом случае толпа представляется как система, в которой каждый элемент пытается минимизировать свою энергию. Каждый агент обладает набором динамических полей, управляющих его движением. Данный подход позволяет объединить в себе процесс локального планирования пути и избегания столкновений между агентами.

Каждый участник толпы не изменяет свой режим поведения дискретно, а пытается локально спланировать свой дальнейший путь с учетом всех внешних условий. К тому же, процесс вычисления скалярных полей и дальнейшая минимизация энергии каждого агента пытается (но не гарантирует) избежать локальных минимумов.

Глобальное планирования пути – идеальное допущение, ведь реальные люди зачастую имеют ограниченное поле видимости, и только частичное знание окружающего ландшафта (или плана помещения), к тому же у каждого элемента толпы могут быть в наличии индивидуальные факторы. С другой стороны, подобное упрощение позволяет уменьшить вычислительную сложность всей системы.

В представленной модели используется локальное индивидуальное планирование пути для каждого агента, под которым понимается следующее:

- каждый агент самостоятельно выбирает направление своего дальнейшего движения;
- толпа – гетерогенная система, каждый элемент которой может иметь индивидуальные характеристики, влияющие на его поведение.

2.1. Структура предлагаемой модели

Предлагаемая в данном диссертационном исследовании модель поведения толпы базируется на следующих подходах к моделированию, рассмотренных в предыдущей главе:

- непрерывный подход на основе континуума, примененный в модели поведения толпы, предложенной в работе Трюи [98];
- мультиагентный подход.

Также в модели необходимо учесть области видимости для каждого участника толпы и предотвратить возможности попадания участников толпы в локальный минимум. Примерная структурная схема модели предложена на рисунке 2.1:

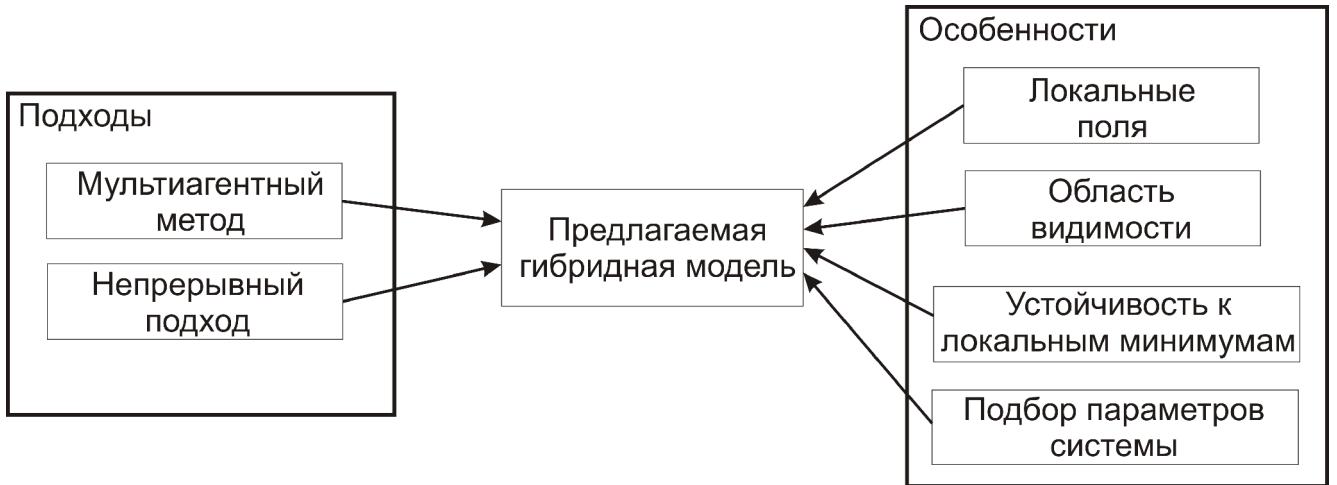


Рис 2.1. Структурная схема предлагаемой модели

Предлагаемая в данной работе модель поведения толпы по сути является гибридной моделью, совмещающей в себе положительные черты нескольких подходов к моделированию поведения толп и расширяющая собой модель Трюи [98], подробнее рассмотренную в параграфе 1.2.6.

Основываясь на структуре модели Трюи [98], в данной работе предлагается вычислять вектор движения \vec{x}_i для каждого агента в соответствии со следующими шагами:

1. Вычисление локальных скалярных полей на основе алгоритма, рассмотренного в главе 3.
2. Формирование критерия $\Phi(x)$.
3. Поиск минимального значения критерия $\Phi(x)$ в рамках заданной области с использованием метода оптимизации роя частиц.
4. Вычисление вектора движения для текущего участника толпы.

Рассмотрим предложенные шаги подробнее.

2.2. Правила поведения людей в толпе

В данном разделе представлено математическое описание модели поведения толпы. Описание базируется на нескольких правилах, которые, в свою очередь, основаны на реальных наблюдениях.

Основная сила, ведущая толпу – желание достичь какой-либо цели. Цель может быть задана как определенная географическая точка, например “Красная площадь, д.1”, или как направление, “двигаться на север”. Также, цель может быть динамической, к примеру “следуй за этим человеком”, “найди незанятый стул” или “исследуй неизвестное пространство”. Сценарии поведения без определенной цели, такие как “прогулка по городу”, в рамках представленной модели не попадают. Модель предполагает процесс назначения цели внешним параметром системы.

Правило 1. Каждый участник толпы пытается достичь определенной географической цели.

Само правило напрямую следует из определения толпы [26] – у каждого участника толпы есть некоторый объект внимания. К примеру, в толпе, возникающей в метро у эскалатора, объектом внимания для большинства участников является выход из метро.

С учетом статистических наблюдений о поведении реальных толп, при отсутствии препятствий и ограничений, отдельный участник толпы движется к цели по прямой линии [95].

В общем виде, скалярное поле, описывающее «желание» участника толпы попасть в точку цели можно описать следующей функцией:

$$G_i(x_i) = s(\|x_i - g_i\|, s_{g,\min}, s_{g,\max}, x_{g,\min}, x_{g,\max}, c_g) \quad (2.1)$$

где s – некоторая постоянная или убывающая функция, описывающая характер изменения влекущей силы от дистанции от точки x_i , в которой находится i -тый участник толпы, до точки цели g_i , ограниченная значениями

$s_{g,min}$, $s_{g,max}$, $x_{g,min}$, $x_{g,max}$, c_g – параметр. Различные типы функции s будут рассмотрены в параграфе 2.3.

Правило 2. Люди двигаются на максимально возможной в текущих условиях скорости. Данное утверждение может быть выражено в виде поля максимальной скорости f , в соответствии с которым агент в точке x , двигающийся в направлении 0 имеет скорость \hat{X} .

Данное правило может быть основано на наблюдениях в работе Предтеченского [31] для экспериментального случая движения толпы без препятствий по широкому коридору. В данном эксперименте замерялась скорость движения людей в толпе в зависимости от плотности толпы. На основании полученных данных был получен набор гистограмм, изображенных на рисунке 2.2.

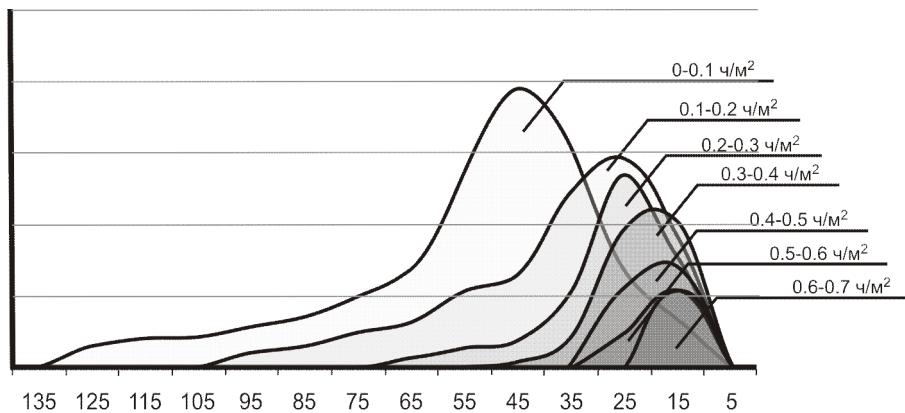


Рис 2.2. Гистограммы распределений возможных скоростей движения людей в потоке различной плотности

Из графика виден обратный характер зависимости скорости участников толпы от плотности: чем выше плотность, тем ниже скорость. Данный характер можно объяснить тем фактом, что сама толпа становится препятствием для своих участников

Правило 3. В реальных толпах каждый человек принимает решение о своем дальнейшем движении на основании своего локального знания о доступном ему фрагменте окружающей среды, ограниченном его областью

видимости, пытаясь избежать столкновений с окружающими людьми и стенами.

Для описания данного утверждения в работе Трюи [98] было предложено ввести дополнительное поле дискомфорта $g(x)$, в соответствии с которым при прочих равных, участник толпы предпочтет находиться в точке x чем в точке x' если $g(x') > g(x)$.

В данной работе предлагается ввести два поля дискомфорта, описывающие соответственно дискомфорт, полученный участником толпы от соседних участников ($P_i(x)$) и от препятствий ($W_i(x)$):

$$P_i(x_i) = \sum_{k,k \neq i} s(\|x_i - x_k\|, s_{p,\min}, s_{p,\max}, x_{p,\min}, x_{p,\max}, c_p) \quad (2.2)$$

$$W_i(x_i) = \sum_k s(\|x_i - w_k\|, s_{w,\min}, s_{w,\max}, x_{w,\min}, x_{w,\max}, c_w), \quad (2.3)$$

где s – некоторая убывающая функция, описывающая дискомфорт, получаемый участником толпы в зависимости от близости к другим участникам толпы (x_k) или препятствиям (w_k), $s_{p,\min}$, $s_{p,\max}$, $x_{p,\min}$ $x_{p,\max}$, $s_{w,\min}$, $s_{w,\max}$, $x_{w,\min}$ $x_{w,\max}$ – величины, ограничивающие функцию s , c_p и c_w – параметры. Различные типы функций s будут рассмотрены в параграфе 2.3.

Правило 4. Каждое используемое поле имеет смысл лишь в рамках видимости конкретного агента. Другими словами, существует видимая область V , на которой могут быть определены все используемые поля.

Изначально мнение о необходимости учета области видимости было высказано в работе Трюи [98] как один из вариантов дальнейшего развития модели и впервые использовано при создании модели поведения толпы в данном диссертационном исследовании.

Область пространства, невидимая участником толпы может быть выражена в виде некоторой области пространства $V \in R^N$, на которой функция $s(x, s_{\min}, s_{\max}, x_{\min}, x_{\max}, c) : R^N \rightarrow R$ будет равна нулю:

$$s(x, s_{\min}, s_{\max}, x_{\min}, x_{\max}, c) = \begin{cases} x \notin V : 0 \\ x \in V : \begin{cases} s_{\text{lin}}(x, s_{\min}, s_{\max}, x_{\min}, x_{\max}, c) \\ s_{\text{exp}}(x, s_{\min}, s_{\max}, x_{\min}, x_{\max}, c) \\ s_{\text{sigm}}(x, s_{\min}, s_{\max}, x_{\min}, x_{\max}, c) \end{cases} \end{cases} \quad (2.4)$$

Как и в случае с целью, поле дискомфорта является внешним фактором для всей системы. Также динамическое поле дискомфорта может быть использовано для повышения эффективности алгоритма избегания столкновений и будет рассмотрено позднее.

В реальных толпах обычный человек предпочитает выбрать направление движения такое, чтобы длина пройденного пути была минимальна. Но это желание зачастую перекрывается стремлением избежать мест с возможными заторами, а также столкновений со стенами, окружающими людьми и другими препятствиями. Ко всему этому люди также пытаются как можно меньше находиться в местах с высоким значением дискомфорта. Эти идеи могут быть совмещены путем предположения, что люди выбирают направление движения в соответствии с минимизацией линейной комбинации трех следующих параметров:

- длина пути;
- время, затраченное на движение;
- ощущенный дискомфорт.

Правило 5. Пусть Π – совокупность всех возможных путей из точки x к заданной цели. С учетом заданных поля скорости F , дискомфорта P, W и цели G , агент в точке x выберет такой путь P из множества Π , чтобы следующая величина была минимальна:

$$\Phi_i(x) = \alpha G_i(x) + \beta P_i(x) + \gamma W_i(x), \quad (2.5)$$

представляющая собой взвешенную сумму полей цели и дискомфорта. В данном случае α, β, γ - веса для отдельных факторов. Изначально идея использовать комбинацию полей была высказана в работе Трюи [98], но для

дальнейшего исследования в данной работе предлагается использовать производное поле $\Phi(x)$, линейно зависящее от базовых полей.

Визуализация линейной суммы полей для простейшей толпы из 4-х участников и двух препятствий показана на рисунках 2.3 и 2.4.

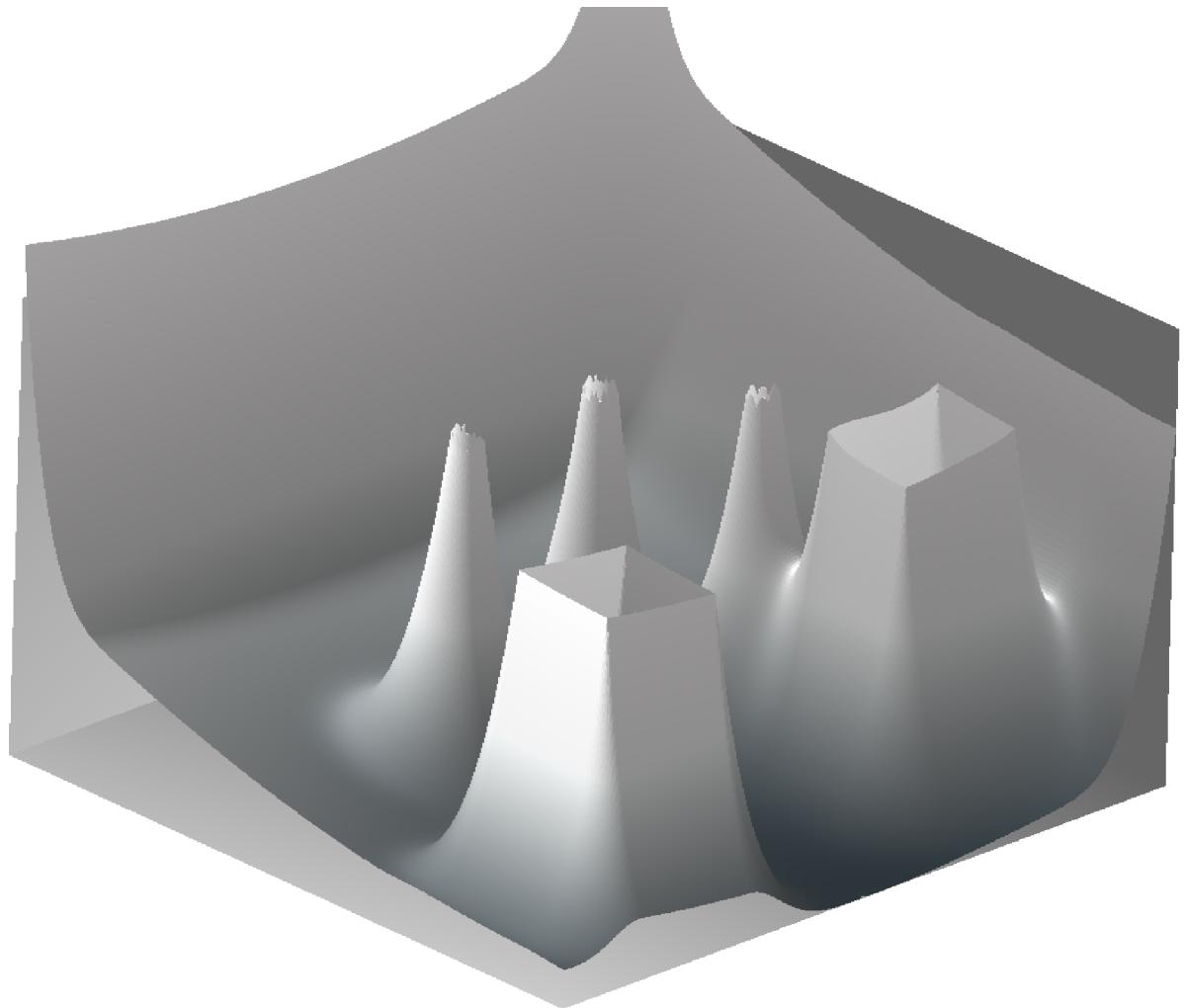


Рис. 2.3. Трехмерная визуализация меры стоимости движения

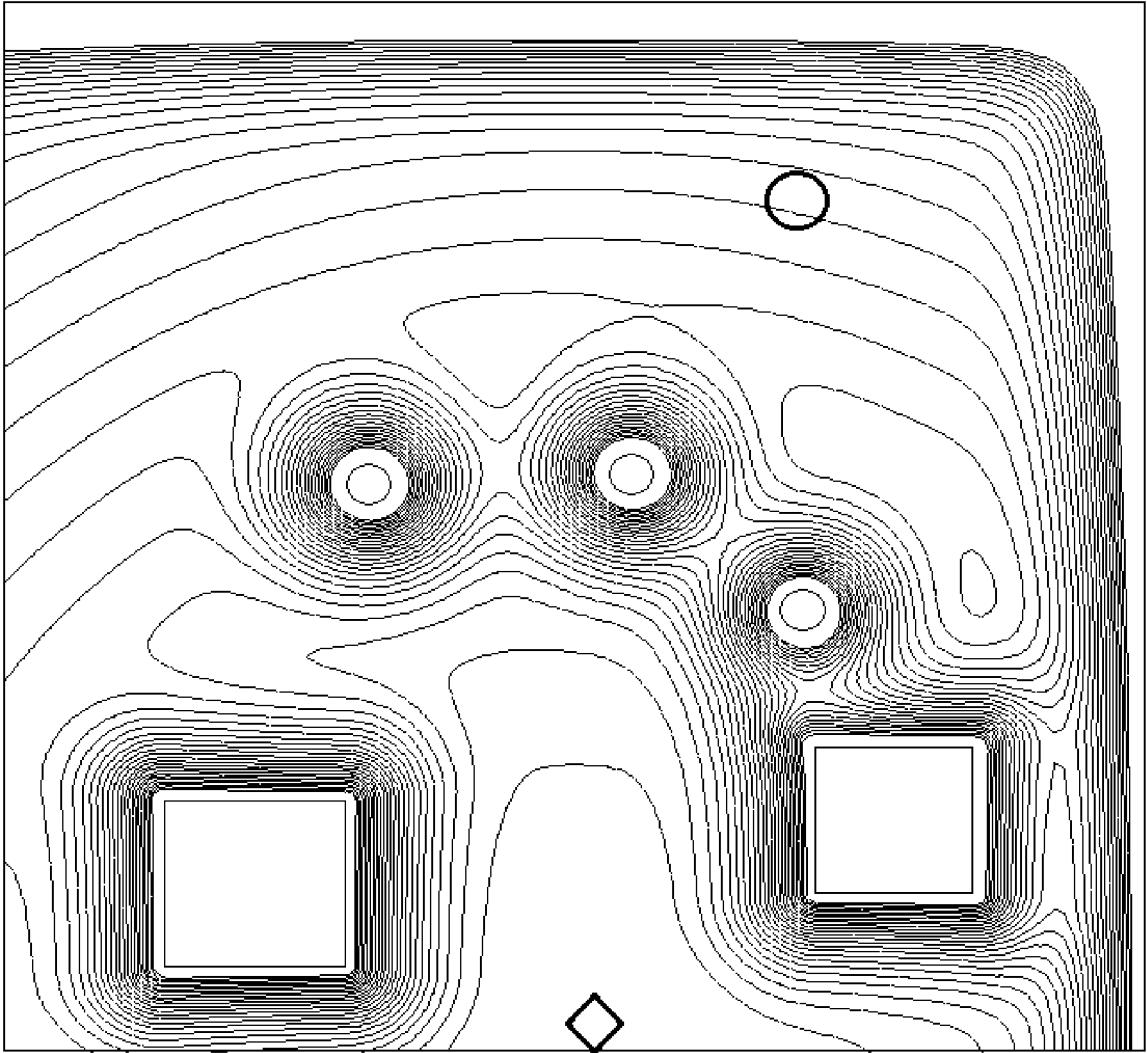


Рис. 2.4. Визуализация меры стоимости движения линиями уровня

Кругом обозначено положение текущего участника толпы, для которого были рассчитаны отображаемые поля, а ромбом – положение цели. Более светлые области означают высокие значения производного критерия стоимости $\Phi(x)$, более темные – низкие значения.

2.3. Типы функций описания полей

Для различных типов полей (и типов сил, действующих на участников толпы) сложно однозначно описать соответствующие им функции взаимодействия. Для решения этой проблемы в данной работе предлагается ввести несколько классов различных функций, а применимость как самой функции, так и величину ее параметров оценивать и подбирать

статистически на большом наборе данных, описывающих поведение реальных толп.

Все подходящие классы функций являются функциями нескольких переменных:

$$s(x \in R, s_{\min}, s_{\max}, x_{\min}, x_{\max}, c \in R) \rightarrow R, \quad (2.6)$$

где, для двухмерного случая, $s_{\min}, s_{\max}, x_{\min}, x_{\max}$ - точки, ограничивающие как аргумент x : $x_{\min} < x < x_{\max}$, так и значения самой функции: $s_{\min} < s < s_{\max}$, пример такого ограничения показан на рисунке 2.5.

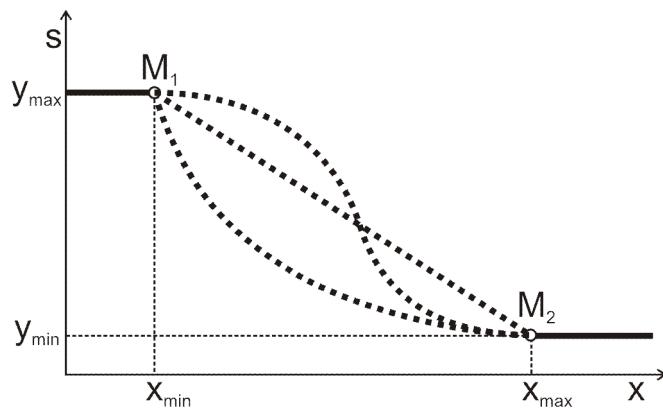


Рис 2.5. Пример ограничения функции s

Функция s может быть представлена в виде разных семейств функций:

1. Линейная функция:

$$s_{lin}(x, s_{\min}, s_{\max}, x_{\min}, x_{\max}, c) = y_{\min} + \frac{(x - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad x_{\max} > x_{\min} > 0 \quad (2.7)$$

2. Степенная функция:

$$\begin{cases} a = y_{\max} - \frac{b}{c + x_{\min}} \\ b = \frac{(y_{\min} - y_{\max})(c + x_{\min})(c + x_{\max})}{x_{\min} - x_{\max}}, \quad x_{\max} > x_{\min}, c > 0, x_{\max} > x_{\min} > 0 \\ s_{exp}(x, s_{\min}, s_{\max}, x_{\min}, x_{\max}, c) = a + \frac{b}{c + x} \end{cases} \quad (2.8)$$

3. Сигмоидальная функция

$$\begin{cases} a = y_{\max} - \frac{b}{1 + e^{-2(x_{\min} + c)}} \\ b = \frac{e^{-2c}(1 + e^{2(c + x_{\max})})(1 + e^{2(c + x_{\min})})(y_{\max} - y_{\min})}{e^{2x_{\max}} - e^{2x_{\min}}}, \quad x_{\max} > x_{\min} > 0, c > 0 \\ s_{sigm}(x, s_{\min}, s_{\max}, x_{\min}, x_{\max}, c) = a - \frac{b}{1 + e^{-2(x + c)}} \end{cases} \quad (2.9)$$

Также на функцию s наложен ряд ограничений:

$$\begin{cases} s(x, s_{\min}, s_{\max}, x_{\min}, x_{\max}, c) = y_{\min}, \text{ при } x \geq x_{\max} \\ s(x, s_{\min}, s_{\max}, x_{\min}, x_{\max}, c) = y_{\max}, \text{ при } x \leq x_{\min} \end{cases} \quad (2.10)$$

Процесс подбора подходящего семейства функции и его параметров будет рассмотрен в параграфе 3.3.

2.4. Поиск оптимального пути

В данном разделе будет рассмотрен способ нахождения оптимального пути движения агента в толпе с учетом меры стоимости, предложенной в формуле 2.5. Предположим, что существует функция $\Phi: R^2 \rightarrow R$ (для двухмерного случая), на всей области определения равная мере стоимости движения определенным путем через заданную точку. Самым простым методом конструирования пути для отдельного агента от начальной точки до цели является движение в обратную сторону от градиента функции Φ , что в итоге должно уменьшать значение Φ , и, при достижении цели, привести к случаю $\Phi=0$.

В работе Трюи [98] на основании этого довода было предложено следующее решение:

$$\|\nabla\Phi(x)\| = C, \quad (2.11)$$

где стоимость движения C вычисляется в направлении градиента Φ . Таким образом, вектор движения в определенной точке выглядит следующим образом:

$$\vec{x} = -f(x, \theta) \frac{\nabla\Phi(x)}{\|\nabla\Phi(x)\|}, \quad (2.12)$$

т.е. каждый агент в толпе движется в сторону, обратную градиенту со скоростью, определенной полем скорости в данной точке.

В работе Трюи был сделан акцент на имитационное моделирование толпы в реальном времени, и по этой причине численное решение

предложенного уравнения считалось достаточным для поиска оптимального пути.

У предложенного решения есть существенный недостаток, выявленный на этапе сравнения различных методов моделирования толпы – возможность попадания системы в локальный минимум. Если агент находится в точке с минимальным градиентом в локальных окрестностях, то он там так и остается. Подобная ситуация показана на рисунке 2.6 – несколько агентов попали в локальный минимум и не могут двинуться дальше. В реальных толпах таких ситуаций не наблюдается – человек, оказавшийся в тупике (что является практическим случаем локального минимума), может вернуться назад для поиска более подходящего пути.

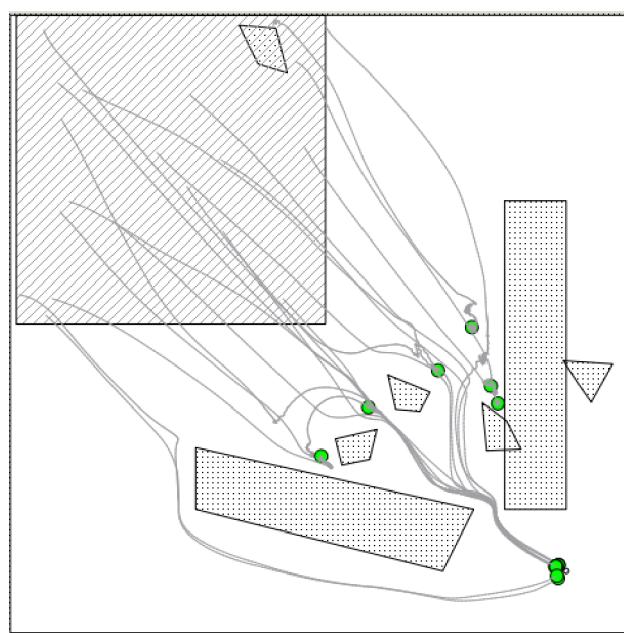


Рис 2.6. Моделирование ситуации возникновения локальных минимумов. 6 агентов попали в локальные минимумы и не дошли до финиша

Выход агента из состояния локального минимума – частный случай одной из задач оптимизации, которую можно решить многими способами, среди которых:

- учет момента;
- имитация отжига;
- оптимизация роя частиц.

Рассмотрим применимость этих методов к моделированию поведения толпы более подробно.

Учет момента (англ. momentum). Данный подход является продолжением метода градиентного спуска, в котором на текущее значение вектора движения агента оказывает влияние предыдущее его значение. При применении процедуры учета момента для моделирования поведения толпы, предлагается следующая формула расчета направления движения участника толпы:

$$\vec{x}_i = -f(x, \theta) \frac{\nabla \phi(x)}{\|\nabla \phi(x)\|} + m\vec{x}_{i-1}, \quad (2.19)$$

где m – константа, описывающая меру такого влияния. Использование данного подхода позволяет изменить характер движения агента на более инерционный, что в некоторых случаях позволит пересекать области с локальным минимумом. Стоит заметить, что данный метод не гарантирует достижения глобального минимума, а только лишь позволяет в некоторых случаях избегать локальных. Данный метод, к тому же, позволит сделать перемещения каждого агента более плавными, без резких поворотов при резкой смене градиента (подобное поведение так же наблюдается и в реальных толпах).

Имитация отжига (англ. simulated annealing). Данный алгоритм основывается на имитации физического процесса, который происходит при кристаллизации вещества из жидкого состояния в твердое, в том числе при отжиге металлов. Предполагается, что процесс протекает медленно при постепенно понижающейся температуре. Переход атома из одной ячейки в другую происходит с некоторой вероятностью, которая уменьшается с понижением температуры. Устойчивая кристаллическая решетка соответствует минимуму энергии атомов, поэтому атом либо переходит в состояние с меньшим уровнем энергии, либо остается на месте.

При помощи моделирования такого процесса применительно к поведению толпы, к предложенному уравнению градиентного спуска в

данной работе предлагается добавить некоторую случайную убывающую компоненту, меняющую характер движения агента на более случайный:

$$\vec{x}_i = -f(x, \theta)A(\vec{n}) + m\vec{x}_{i-1} \quad (2.20)$$

$$\vec{n} = \frac{\nabla \phi(x)}{\|\nabla \phi(x)\|}$$

где оператор A случайным образом модифицирует соответствующий вектор направления движения \vec{n} , в результате чего получается вектор \vec{n}^* с определенной вероятностью $P(\vec{n}, \vec{n}^*)$, которая вычисляется в соответствии с распределением Гиббса:

$$P(\vec{x}^* \rightarrow \vec{x}_{i+1} | \vec{x}_i) = \begin{cases} 1, & F(\vec{x}^*) - F(\vec{x}_i) < 0 \\ e^{-\frac{F(\vec{x}^*) - F(\vec{x}_i)}{Q_i}} & F(\vec{x}^*) - F(\vec{x}_i) \geq 0 \end{cases} \quad (2.21)$$

где $Q_i > 0$ – элементы произвольной убывающей, сходящейся к нулю последовательности, которая задает аналог падающей температуры в кристалле. Предложенный алгоритм похож на градиентный спуск, но за счет случайности выбора промежуточных точек движения агентов, все участники движения должны реже попадать в локальные минимумы (по сравнению с градиентным спуском). Стоит заметить, что данный алгоритм не гарантирует нахождения глобального минимума. Также у данного алгоритма, несмотря на его преимущества по выходу из локальных минимумов, есть и недостатки: отсутствие плавности движения агентов в начале пути из-за большой доли случайной составляющей при выборе дальнейшего направления движения.

Оптимизация роем частиц (англ. Particle Swarm Optimization). Данный алгоритм относится к классу методов прямого поиска оптимального решения целевой функции в определенном пространстве поиска. PSO как метод связан с социальной оптимизацией: существует задача, описываемая определенной фитнес-функцией, также определена и коммуникационная структура социальной сети, каждый индивид которой является решением-кандидатом (в момент инициализации сети эти решения принимают случайные значения), отображенными на пространство поиска – фактически

решение кандидат является частицей, определенным образом итеративно перемещающейся в пространстве поиска. Система запоминает глобальное лучшее найденное решение и локально лучшее решение для каждой частицы. Каждая частица делится своим локальным «лучшим достижением» с соседними частицами (и не только с соседними, схема связей между частицами может быть очень сложной), таким образом, перемещения частиц по пространству поиска основываются на подобных локальных достижениях. Пример различных типов связывания соседних частиц, описанных в работе [56], показан на рисунке 2.8.

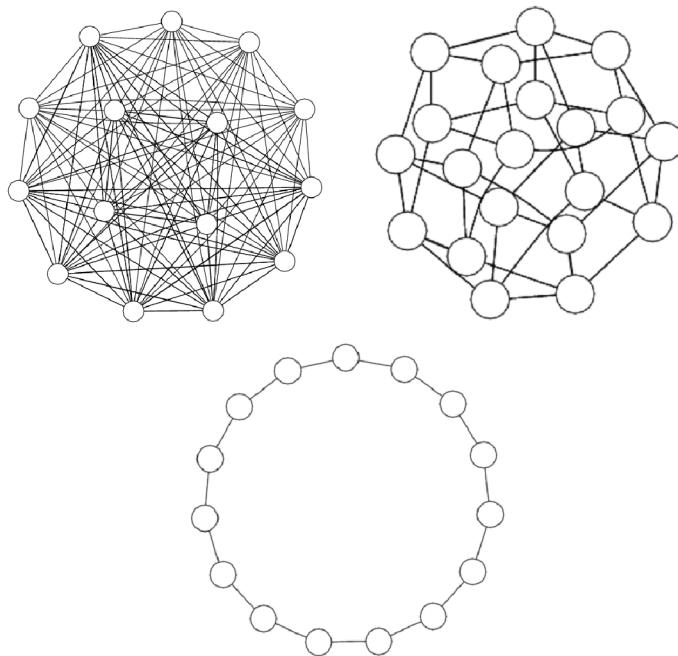


Рис 2.8. Примеры различных типов связывания соседних частиц: полное (вверху-слева), частичное (вверху-справа) и кольцевое (внизу)

В простейшей форме алгоритма положение частицы в многомерном пространстве и ее скорость описываются следующими формулами [56]:

$$\begin{aligned} v_{i,j} &= c_0 v_{i,j} + c_1 r_1 (g_{best_j} - x_{i,j}) + c_2 r_2 (l_{best_{i,j}} - x_{i,j}) + c_3 r_3 (n_{best_j} - x_{i,j}) \\ x_{i,j} &= x_{i,j} + v_{i,j} \\ |x_{i,j}| &< V_i \end{aligned} \quad (2.22)$$

где g_{best} — глобальное лучшее решение, l_{best} — локально лучшее решение, n_{best} — лучшее решение в окрестностях частицы. C_0, c_1, c_2, c_3 — константы, x_{ij} — координаты частицы, v_{ij} — скорость частицы, V_i — окрестность поиска.

Применительно к описываемой модели, задача оптимизации выглядит следующим образом:

$$\Phi_i(x) : X_i \rightarrow R^N, X_i = V_i \cap B_i$$

$$\Phi_i(x) \rightarrow \min_{x \in X_i}$$

причем допустимое множество X_i представляет собой пересечение множества V_i (область видимости i-того участника толпы) и B_i (ближайшие окрестности точки x_i , $\|x - x_i\| < d$).

Применительно к предложенной модели толпы данный алгоритм оптимизации применяется следующим образом: на каждом шаге каждого агента в заданной допустимой области X_i методом оптимизации роем частиц находится точка с минимальным весом целевой функции $\Phi(x)$. Агент на следующем шаге движется именно к этой точке – данный подход позволит успешно перескакивать локальный минимумы. Таким образом, в данной работе предлагается рассчитывать направление дальнейшего движения в соответствии с:

$$\vec{x} = f(x, \theta) \times \vec{O}_{PSO}(x, \Phi(x)) \quad (2.23)$$

где O_{PSO} – функция поиска минимума функции Φ в окрестностях R_i .

Из вышеперечисленных методов расчета дальнейшего движения человека в толпе был выбран метод оптимизации роя частиц, как наиболее подходящий по причине его вычислительной простоты (нет необходимости напрямую вычислять значение градиента $\nabla \phi(x)$).

2.5. Оценка эффективности работы моделей поведения толпы

В данном параграфе автором предложены несколько мер численного сравнения эффективности моделей поведения толпы, которые в дальнейшем будут использованы для сравнения предложенной модели, уже существующих моделей, а также поведения реальных толп.

Впервые идея создания подобных мер была высказана в работе Холщевникова [37] и в ней же был предложен метод проверки адекватности моделей поведения толпы на основе сравнения модельной и реальной плотности толпы в различных условиях.

Но данная мера недостаточна для тестирования моделей поведения толпы по следующим причинам:

1. Рассматривается только одна характеристика толпы (плотность).
2. Нет возможности сравнения индивидуальных характеристик каждого участника толпы.

По этим причинам автором в данной работе предлагается набор новых мер эффективности моделей поведения толпы:

- мера средней дистанции пути;
- мера средней кривизны пути;
- мера среднего затраченного на путь времени;
- мера доли участников толпы, дошедших до цели.

Рассмотрим предложенные меры более подробно.

2.5.1. Мера средней дистанции пути

Исследования поведения реальных людских толп показали [4], что все участники толпы движутся, соблюдая некоторые закономерности:

- пытаются пройти минимальную дистанцию с максимальным комфортом;
- избегают столкновений;
- пытаются избежать резкой смены направления движения (реальным людям в этом помогает сила инерции).

Предположим, что Π_i – совокупность всех путей из текущей точки x_i в точку цели a_i . Каждый i -тый участник толпы при движении в соответствии со своей моделью выбирает путь $P_i \in \Pi$. Таким образом, для

всей толпы мера эффективности модели относительно пройденного пути примет следующий вид:

$$L = \frac{\sum_{i=1..N} \int ds_i}{N}, \quad (2.24)$$

где N – количество людей в толпе, а ds_i обозначает интеграл по длине пути. Выражение 2.24 описывает собой среднюю длину пройденного пути. Данный критерий может быть применен только к непрерывным моделям поведения толпы, например для моделей, основанных на представлении непрерывного континуума [66] и моделях, основанных на динамике жидкости [81].

Для дискретного случая данный критерий может быть применен следующим образом. Пусть путь i -того участника толпы представлен как множество последовательных точек $x_{i,j}$, таким образом мера, предлагаемая в данном диссертационном исследовании, примет вид:

$$L = \frac{\sum_{i=1..N} \sum_j x_{ij}}{N} \quad (2.25)$$

Подобный способ может быть применен для оценки эффективности дискретных моделей поведения толпы, основанных:

- на клеточных автоматах [33] [48];
- на фактических наблюдениях за поведением реальных толп [31].

К тому же, данный метод может быть использован и для непрерывных моделей (путем квантования пути на множество последовательных точек) для грубой оценки средней длины пути в случаях, когда требуется высокая производительность в ущерб точности алгоритма.

2.5.2. Мера средней кривизны пути

Как уже было замечено ранее, люди в реальных толпах при движении к цели пытаются выбрать путь $P \in \Pi$ такой, что средняя кривизна пройденного пути будет минимальной. Другими словами, каждый участник толпы пытается свести количество резких изменений направления движения к

минимуму – в идеальном случае двигаться по наикратчайшему пути, по прямой. Идея данной меры была высказана в работе Трюи [98], где она использовалась для визуальной оценки эффективности работы различных моделей поведения толпы. В соответствии с вышеизложенным, в данной работе предлагается ввести меру средней кривизны пути.

Пусть $\Phi_i(t)$ – вектор-функция, зависящая от времени и описывающая положение i -того участника толпы в момент времени t . Если Φ – непрерывна и дважды дифференцируема, то справедливым будет утверждение, что кривизна пройденного пути для отдельного агента выражается формулой:

$$C_i = \frac{\left| \frac{d\Phi_i(t)}{dt} \times \frac{d^2\Phi_i(t)}{dt^2} \right|}{\left| \frac{d\Phi_i(t)}{dt} \right|^3}, \quad (2.26)$$

тогда для всей толпы мера средней кривизны пройденного пути примет вид:

$$C = \frac{\sum_{i=1..N} C_i}{N} \quad (2.27)$$

Для дискретных моделей поведения толпы формула 2.27 напрямую неприменима из-за ограничений, накладываемых на функцию Φ . Для решения этой проблемы можно либо методом интерполяции (например с использованием сплайнов или кривых Безье) получить функцию Φ' , близкую к исходной Φ , но непрерывную и дважды дифференцируемую, либо ввести меру кривизны, свободную от подобных ограничений. Так как выбор метода интерполяции значительно повлияет на меру кривизны 2.27, более целесообразно использовать такую меру кривизны, вычисление которой не требует наличия второй производной. Таким образом, в данной работе предлагается следующее: пусть путь i -того участника толпы представляет собой множество $x_1 \dots x_j$ при $j \rightarrow \infty$, тогда мера кривизны индивидуального пути представляет собой сумму всех угловых отклонений от прямого пути:

$$C_i = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{j=1..k} \left| \pi - \arccos \frac{|\vec{x}_{j-1} - \vec{x}_{j+1}|^2 - |\vec{x}_{j-1} - \vec{x}_j|^2 - |\vec{x}_j - \vec{x}_{j+1}|^2}{2|\vec{x}_{j-1} - \vec{x}_{j+1}| \times |\vec{x}_{j-1} - \vec{x}_j|} \right| \quad (2.28)$$

Таким образом, для дискретного случая индивидуальная мера кривизны примет вид

$$C_i = \sum_{j=1..N} \left| \pi - \arccos \frac{|\vec{x}_{j-1} - \vec{x}_{j+1}|^2 - |\vec{x}_{j-1} - \vec{x}_j|^2 - |\vec{x}_j - \vec{x}_{j+1}|^2}{2|\vec{x}_{j-1} - \vec{x}_{j+1}| \times |\vec{x}_{j-1} - \vec{x}_j|} \right|, \quad (2.29)$$

где N – количество дискретных участков пути. Причем подобная индивидуальная мера кривизны пути 2.28 и 2.29 будет сопоставима как для дискретных, так и для непрерывных моделей.

2.5.3. Мера затраченного на путь времени

Впервые подобная мера была предложена в ГОСТ 12.1.033-81 [7] и является одним из основных критериев безопасности при эвакуации людей из различных зданий и сооружений. Данная мера изначально основывается на работе [37], в которой предлагается измерять время движения передней и задней граней людского потока на основании его плотности.

В данной работе, исходя из возможности расчета индивидуальных характеристик каждого из участников толпы, предлагается следующая мера:

$$C_t = \frac{\sum_{i=1..N} t_i}{N}, \quad (2.30)$$

где N – количество участников толпы, дошедших до финиша, и данная мера фактически является средним временем, затраченным агентом в толпе на достижение цели.

2.5.4. Мера доли агентов, дошедших до финиша

Как было замечено ранее, при некоторых параметрах окружающей среды и конфигурации самой толпы может возникнуть «тупиковая» ситуация, при которой участник толпы окажется в локальном минимуме $x_{l \min}$, где в соответствии с теоремой Ферма критерий $\Phi'(x_{l \min}) = 0$ и $\Phi'(x_{area}) > 0$ при

$x_{area} \in R_{area}$, т.е. принадлежащей некоторой локальной области, расположенной в окрестностях точки локального минимума.

При тестировании модели в соответствии с данной предложенной мерой целесообразно рассчитывать отношение количества дошедших до финиша участников толпы к общему числу участников толпы, и в соответствии с данным утверждением, в данной работе предлагается использовать следующий критерий:

$$C_f = \frac{c_{fin}}{c_{all}}, \quad (2.31)$$

где c_{fin} - количество участников толпы, дошедших до финиша, а c_{all} - общее количество участников толпы. Что характерно, этот критерий не зависит от внутренней структуры модели и может быть применен как к дискретным моделям, так и к непрерывным.

2.6. Выводы

В этой главе на основании предположений, сформулированных в первой главе, была предложена новая модель поведения толпы на основании локальных скалярных полей, отличающаяся от уже существующих следующими особенностями:

- избегание локальных тупиков для большего соответствия поведению реальных толп;
- использование локальных скалярных полей вместо глобальных, что позволяет моделировать гетерогенные толпы.

Также автором предложен набор метрик (меры средней кривизны пути, средней дистанции пройденного пути, среднего времени прохождения пути, доли агентов, дошедших до финиша), основанных на реальных наблюдениях за поведением толп, позволяющих производить сравнение эффективности различных моделей поведения толпы.

Глава 3. Алгоритмизация процедуры построения набора полей

В данной главе, на основании описанной в Главе 2 модели поведения толпы, описываются алгоритмы расчета различных типов скалярных полей. В частности, рассматривается дискретный и непрерывный подходы к расчету полей, а также приводится алгоритм расчета полей цели, дискомфорта и скорости.

3.1. Алгоритмы полей

Задача описания факторов, влияющих на поведение людей в толпе, не теряет своей актуальности. В этом параграфе рассматривается задача описания действующих на участников толпы факторов с использованием скалярных полей.

3.1.1. Предыдущие работы

Задача создания каждого скалярного поля для каждого из факторов, влияющих на участников толпы, неоднозначна – неизвестно то, насколько агент толпы может потерять индивидуальность в каждом из случаев.

Впервые идея представления толпы как непрерывного континуума была предложена в работе Хагса [66] и более подробно рассмотрена в обзоре данного исследования в главе 1.

В работе Трюи [98] идея Хагса получила дальнейшее развитие: был разработан набор глобальных скалярных полей и критерий, минимизируя который, рассчитывалось направление дальнейшего движения для каждого агента толпы. В этой работе был предложен следующий набор полей:

1. Поле глобальной цели.
2. Поле дискомфорта (рассчитывается из нескольких подполей: поля плотности, поля препятствий).

3. Функция максимальной скорости (рассчитывается в соответствии с рельефом пространства, на котором проводится симуляция).

3.1.2. Расчет дискретных полей

В работе Трюи [98] для упрощения вычислений и возможной работы системы в режиме реального времени, использовался дискретный подход к расчету полей.

Фактически, на основании математических выкладок, описывающих отображение $R^2 \rightarrow R$ для каждого поля, производился процесс дискретизации данного отображения с определенным шагом квантования. По причине небольшого количества полей такие расчеты производить моделирование поведения толп в режиме реального времени с количеством участников до 250 человек. Также по причине полного расчета дискретных полей, существовала возможность визуально их отображать пользователю для демонстрации величины различных факторов, действующих на толпу.

Помимо преимуществ в производительности, у такого подхода существует и следующие минусы:

1. Недостаточность точности в случаях слишком большого шага дискретизации.
2. Необходимость расчета квантованных значений поля на всей области определения этого поля. Значительно выгоднее с точки зрения производительности рассчитывать значения поля по мере необходимости в них.

На рисунке 3.1 показано демонстративное дискретное поле с различными шагами дискретизации.

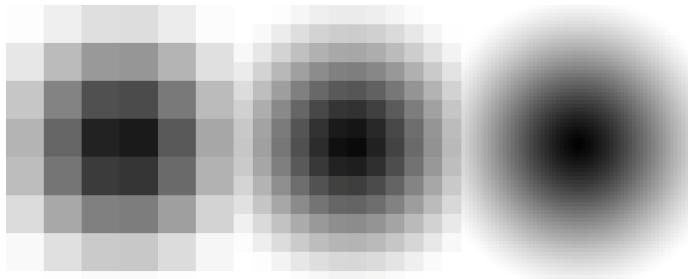


Рис 3.1. Демонстративное поле с шагом дискретизации равным 100, 50, 10 единиц

Алгоритм, занимающийся построением полей в дискретной форме, имеет сложность $O(N^2)$, что при повышении точности вычислений требует больших вычислительных мощностей. Переход к непрерывному представлению полей позволит частично преодолеть эти недостатки.

3.1.3. Расчет непрерывных полей

Большинство современных языков разработки, используемых на практике, реализуют так называемые немедленные вычисления, это означает, что операция выполняется, так только становятся известны значения её операндов. Однако, ясно, что немедленное вычисление дискретных полей целиком не всегда необходимо и рационально с точки зрения производительности, поэтому целесообразно применить решение, позволяющее отложить эти вычисления на тот момент, когда они будут действительно нужны.

В работе М. Фаулера [58] было введено вводит понятие паттерна Lazy Load (загрузка по требованию, ленивая загрузка), суть которого состоит в том, что объект не содержит данные, но знает где их взять, если они ему станут нужны. На основании данного подхода была спроектирована и реализована система классов, позволяющих рассчитывать состояние полей в непрерывной форме. Подробнее данная система описана в Главе 4.

3.2. Алгоритм построения набора полей

Структурная схема алгоритма расчета набора локальных скалярных полей представлена на рисунке 3.2.

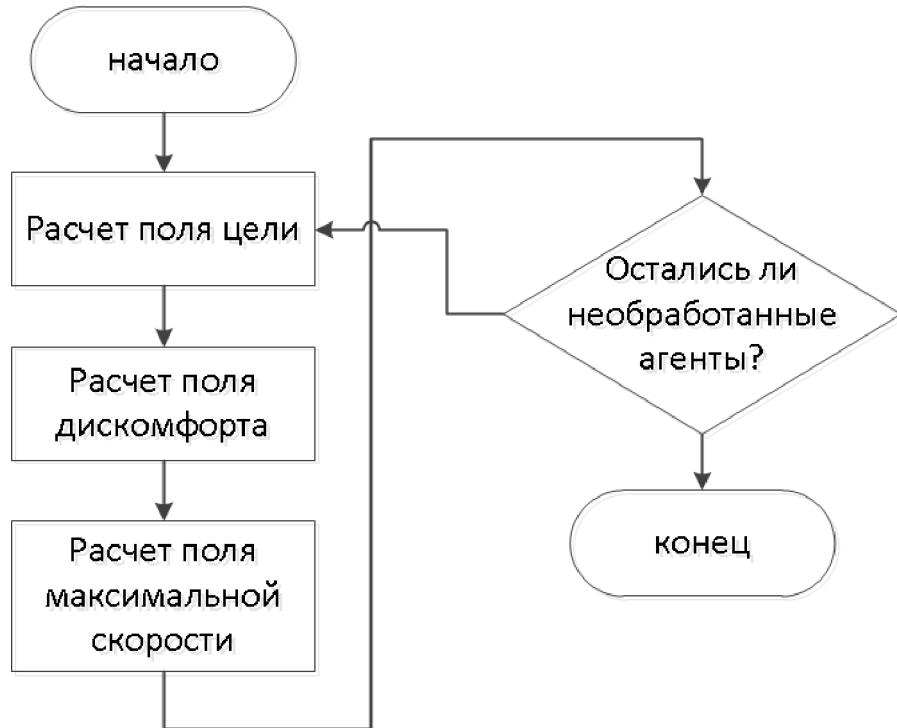


Рис 3.2. Структурная схема алгоритма расчета локальных скалярных полей

A1

Формальное описание алгоритма A1 выглядит следующим образом:

Шаг 1. Расчет поля цели на основании начальных условий и характера ландшафта.

Шаг 2. Расчет поля дискомфорта (для расчета данного поля необходимо также рассчитать поле плотности, которое, к тому же, будет использовано на следующем шаге).

Шаг 3. Расчет поля максимальной скорости на основании данных о плотности окружающей толпы.

Результатом работы алгоритма является набор локальных скалярных полей, рассчитанных для каждого участника толпы.

Рассмотрим предложенные этапы подробнее.

3.2.1. Расчет поля цели

Поле цели описывает желаемое для агента направление движения и для каждого из агентов толпы изначально зависит от следующих факторов:

1. Глобально заданной цели для агента (или для всей толпы), определенной еще до этапа симуляции.
2. Препятствий, расположенных на окружающем ландшафте.

Пусть для i -того агента толпы определена цель g_i . Тогда без учета препятствий скалярное поле, отображающее положение агента на текущее значение поля цели, выглядит следующим образом:

$$G_i(x_i) = s(\|x_i - g_i\|, x_{g,\min}, x_{g,\max}, s_{g,\min}, s_{g,\max}, c_g), \quad (3.1)$$

где x_i – положение i -ого агента. С учетом возникающих на пути участника толпы препятствий, область его видимости показана на рисунке 3.3.

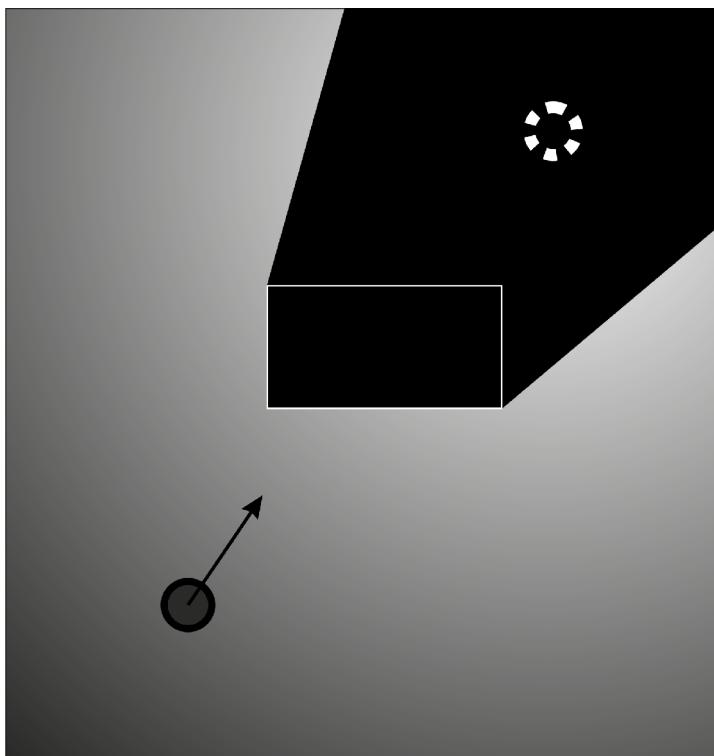


Рис 3.3. Визуальное отображение поля цели при наличии препятствия.

Пунктиром показана заданная цель агента

Агент изначально не может знать о характере поля цели в области, загороженной препятствием – эта область поля находится «в тени». В данной работе предлагается учесть этот фактор, и таким образом, скалярное поле цели, учитывающее препятствия, примет вид:

$$\begin{aligned} \text{при } G_i(x) \in V_i, \quad G_i(x_i) = s(\|x_i - g_i\|, x_{g,\min}, x_{g,\max}, s_{g,\min}, s_{g,\max}, c_g) \\ \text{при } G_i(x) \notin V_i, \quad G_i(x_i) = 0, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где V_i – видимая i -тым агентом область пространства, g_i – точка глобальной цели для i -ого агента, x_i – координата агента. Данная область описывается следующим образом:

$$x_i \in V_i \text{ если } \sum_j \text{cross}(obstacle_j, line(x_i, b_i)) = 0, \quad (3.3)$$

где функция cross возвращает 0, если объекты, являющиеся ее аргументами, не пересекаются и 1 в обратном случае. Функция $line$ возвращает прямую, проходящую через две точки. Другими словами, $x_i \in V_i$ если прямая, проходящая через точку глобальной цели и точку местоположения агента, не пересекает ни одного препятствия.

3.2.2. Расчет поля дискомфорта

Поле дискомфорта описывает влияние на агента всех внешних факторов, в числе которых:

1. Плотность окружающей толпы.
2. Препятствия и стены.

Впервые характер влияния данных факторов в форме полей был рассмотрен в работе Трюи [98], и поле дискомфорта было представлено в виде линейной суммы двух подполей, отражающих факторы плотности и препятствий, причем это поле рассчитывалось глобально и было общим для всех участников толпы. В данной работе предлагается перейти к локальному представлению данного поля и рассчитывать поле дискомфорта индивидуально для каждого участника толпы. В таком случае поле дискомфорта примет следующий вид:

$$D(x_i) = P(x_i) + W(x_i), \quad (3.4)$$

где P – поле плотности окружающей толпы, способ расчета которого предложен в параграфе о расчете поля максимальной скорости, а W – поле окружающих препятствий.

Поле окружающих препятствий фактически принимает максимальное значение в точках, расположенных внутри стен и препятствий и минимальное на некотором удалении от них. На всех промежуточных областях поле спадает пропорционально удалению от препятствий (характер спада определяется типом функции s , выбор которой объясняется в параграфе 3.3). Таким образом, поле окружающих препятствий рассчитывается следующим образом:

$$W_i(x_i) = \sum_k s(\|x_i - w_k\|, s_{w,\min}, s_{w,\max}, x_{w,\min}, x_{w,\max}, c_w), \quad (3.5)$$

где $s_{w,\min}$, $s_{w,\max}$, $x_{w,\min}$, $x_{w,\max}$, c_w – константы.

Поле плотности формируется образом, подобным полю окружающих препятствий W_i – при приближении к области с высокой плотностью окружающей толпы оно принимает максимальные значения, при удалении – минимальные. Таким образом, данное поле можно выразить в виде:

$$P_i(x_i) = \sum_{k,k \neq i} s(\|x_i - x_k\|, s_{p,\min}, s_{p,\max}, x_{p,\min}, x_{p,\max}, c_p). \quad (3.6)$$

3.2.3. Расчет функции максимальной скорости

Поле скорости описывает максимально возможную скорость движения агента толпы. Сама скорость зависит от нескольких параметров:

- от параметров рельефа (характера возвышенностей);
- от плотности окружающей толпы.

При низкой плотности толпы скорость определяется рельефом, а при увеличении плотности скорость начинает в большей степени зависеть от характера движения окружающих людей (подобное допущение можно сделать на основании наблюдений за реальными толпами, рассмотренных в

главе 1), скорость понижается при движении против потока, но не изменяется при движении в потоке.

В модели Трюи [98], рассмотренной в главе 1, максимальная скорость была выражена в виде следующей системы:

$$\begin{aligned} f_T(x, \theta) &= f_{\max} + \left(\frac{\nabla h(x)n_\theta - s_{\min}}{s_{\max} - s_{\min}} \right) (f_{\min} - f_{\max}) \\ f_U(x, \theta) &= u(x + rn_\theta)n_\theta \\ f(x, \theta) &= f_T(x, \theta) + \left(\frac{p(x + rn_\theta) - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}} \right) (f_U(x, \theta) - f_T(x, \theta)), \end{aligned} \quad (3.7)$$

где $f_T(x)$ – топографическая скорость, имеющая смысл при минимальной плотности окружающей толпы и зависящая только от собственных максимальных и минимальных ограничений скорости для отдельного участника толпы (f_{\min} и f_{\max}), а также от характеристики наклона поверхности (s_{\min} , s_{\max} , $\nabla h(x)n_\theta$). $f_U(x)$ – скорость в потоке (запись вида $x + rn_\theta$ описывает ориентированное положение текущего агента с упреждением в один шаг, пример такого упреждения показан на рисунке 3.4), $f(x)$ – промежуточная скорость.

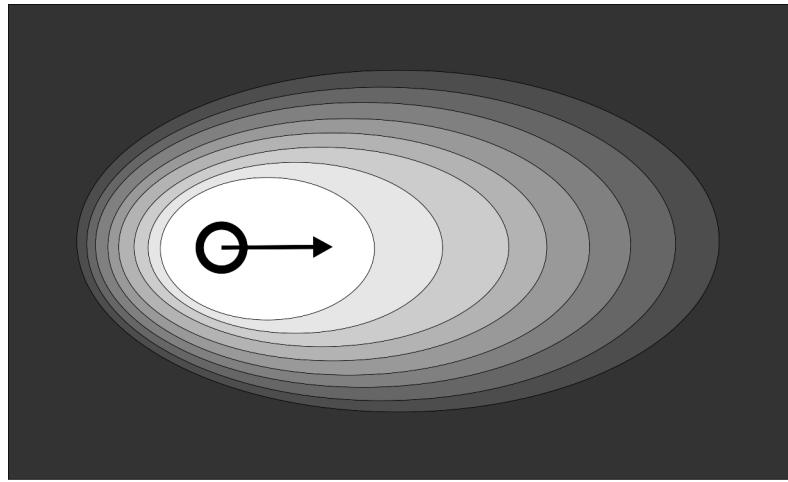


Рис 3.4. Масштабирование поля плотности в соответствии с направлением вектора скорости

Фактически, величина скорости при таком подходе линейно масштабируется от $f_U(x)$ до $f_T(x)$. В данном диссертационном исследовании

предлагается видоизменить этот подход путем ввода более гибкого подхода к расчету промежуточной скорости, а именно выразить ее в виде

$$f(x, \theta) = s(p(x + rn_\theta), p_{\min}, f_T(x, \theta), p_{\max}, f_U(x, \theta), c_f) \quad (3.8)$$

Данный подход, путем подбора параметров p_{\min} , p_{\max} , с и типа функции s , вычислить наиболее соответствующую реальным данным переходную скорость.

Таким образом, система, описывающая функцию скорости в модели поведения толпы, предложенной в данном диссертационном исследовании, можно выразить следующей системой:

$$\begin{cases} f_T(x, \theta) = f_{\max} + \left(\frac{\nabla h(x)n_\theta - s_{\min}}{s_{\max} - s_{\min}} \right) (f_{\min} - f_{\max}) \text{ при } p < p_{\min} \\ f_U(x, \theta) = u(x + rn_\theta)n_\theta \text{ при } p > p_{\max} \\ f(x, \theta) = s(p(x + rn_\theta), p_{\min}, f_T(x, \theta), p_{\max}, f_U(x, \theta), c_f) \text{ при } p_{\min} \leq p \leq p_{\max} \end{cases}, \quad (3.9)$$

которая представляет собой расширение области вычисления скорости в модели Трюи.

3.3. Обучение системы

В предлагаемой модели существует набор констант, величина которых может весьма сильно повлиять на поведение самой системы. В соответствии с постановкой задачи и пунктом о максимальном приближении поведения виртуальной толпы, основанной на предлагаемой модели к поведению реальных толп, было предпринято решение произвести их подбор при помощи генетического алгоритма.

Для проверки адекватности подбора параметров и исключения «подгонки», модель с этими параметрами будет сравнена с поведением реальной толпы в главе 4.

В качестве функции фитнеса $q(x)$ использовалась линейная сумма ошибок по всему набору экспериментов по апробации модели, представленных в главе 4.

Условно, процесс подбора параметров можно разделить на два этапа:

1. Подбор типов преобразующих функций s .
2. Подбор внутренних параметров и ограничений системы.

На первом этапе были сформированы группы преобразующих функций в соответствии с их положением внутри модели. Для трех возможных функций преобразования существует 4 точки их использования, таким образом существует $3^4 = 81$ вариант их размещения.

Для каждого набора преобразующих функций был сформирован ген, состоящий из следующих наборов параметров:

1. $s_{g,min}, s_{g,max}, x_{g,min}, x_{g,max}$ – параметры, ограничивающие поле цели.
2. $s_{w,min}, s_{w,max}, x_{w,min}, x_{w,max}$ – параметры, ограничивающие поле дискомфорта у стен.
3. $s_{p,min}, s_{p,max}, x_{p,min}, x_{p,max}$ – параметры, ограничивающие поле плотности окружающей толпы.
4. c_g, c_w, c_p – параметры преобразующих функций (если они присутствуют – к примеру, у линейной функции такого параметра нет).
5. p_{min}, p_{max} – граничные величины плотности для промежуточной скорости.

Стоит заметить, что внутри каждой группы функций размерность гена была одинакова, но могла отличаться между разными группами. Соответственно, размерность варьировалась от 14 до 17 измерений.

Для каждой группы функций был проведен подбор параметров модели методом генетического алгоритма со следующими начальными настройками:

- популяция – 500;
- доля мутаций для отдельного поколения – 20%;
- количество поколений – 100.

Подробные результаты подбора параметров и их финальные значения представлены в приложении Г.

3.4. Оценка вычислительной трудоемкости

Для применения алгоритмов построения набора полей на практике, необходимо оценить их трудоемкость – это требуется для анализа возможной максимальной численности моделируемой толпы.

Фактически в алгоритме используется три поля, каждое из которых строится для отдельного агента в толпе. Каждое поле линейно зависит от количества агентов в толпе. Таким образом, сложность алгоритма можно оценить следующим образом:

$$O(N * N) = O(N^2)$$

С учетом ограничения области видимости, накладываемой на каждого агента, каждое локальное поле будет зависеть только от части окружающих агентов и препятствий, таким образом, сложность алгоритма может быть сведена к следующей форме:

$$O(N \log N) \quad (3.10)$$

Хотя класс предложенного алгоритма и относится к Р-полным, его сложность достаточно высока, что может отразиться на трудоемкости моделирования толп с большим числом участников.

Однако стоит учесть, что на практике редко проводится имитационное моделирование толп с числом участников более нескольких тысяч – поэтому предложенная сложность была сочтена допустимой.

3.5. Алгоритм расчета вектора движения для участника толпы

На основании рассмотренных выше алгоритмов расчета полей и модели поведения толпы становится возможным предложить структурную схему алгоритма расчета вектора движения для каждого участника толпы.

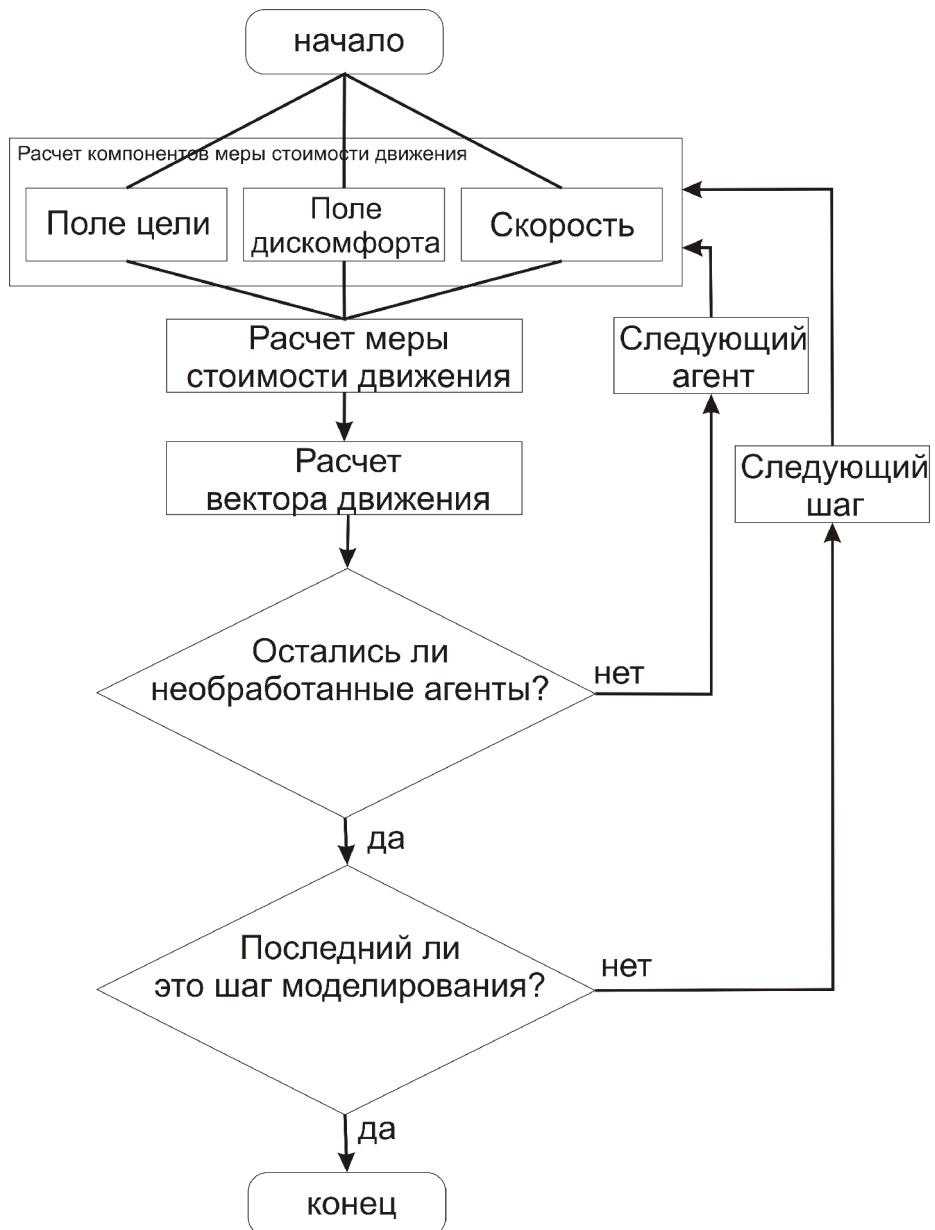


Рис 3.5. Структурная схема алгоритма расчета вектора движения для каждого участника толпы

Алгоритм расчета вектора дальнейшего движения на следующий шаг (структурная схема которого показана на рисунке 3.5), выглядит следующим образом:

Шаг 1. Для текущего участника толпы производится расчет поля плотности и поля цели на основании существующей конфигурации толпы.

Шаг 2. На основе поля плотности и дополнительных сведений о текущем состоянии толпы рассчитывается функция максимальной скорости и поле дискомфорта.

Шаг 3. На основе полученных полей производится расчет меры стоимости движения в различных направлениях.

Шаг 4. Из рассчитанных возможных направлений движения выбирается то, которое обладает минимальной мерой стоимости.

Шаг 5. В случае, если в моделируемой толпе остались необработанные агенты, то следует перейти к шагу 1.

Шаг 6. В случае, если не произведен последний шаг моделирования, то следует перейти к шагу 1.

Как видно из представленной структурной схемы, алгоритм расчета поведения толпы итеративно повторяет следующий набор вычислений для каждого агента и на каждом временном шаге:

1. Расчет полей плотности, цели, скорости и дискомфорта.
2. Расчет меры стоимости движения.
3. Расчет вектора движения.

3.6. Сравнение с существующими моделями поведения толпы

Для проведения сравнения с существующими моделями толпы были выбраны следующие модели:

1. Модель Boids, предложенная в работе [88] (подробнее рассмотрена в Главе 1). Выбор данной модели был обусловлен ее широтой распространения, а также тем фактом, что это – одна из базовых научно-исследовательских разработок в области агентного подхода к моделированию поведения толпы.
2. Модель Continuum Crowd, предложенная в работе [98]. Выбор данной модели был обусловлен тем фактом, что изыскания, предложенные в ней, частично легли в основу настоящего исследования.
3. Модель, предложенная в данном диссертационном исследовании.

Само тестирование заключалось в следующем:

1. Формировался набор случайных ландшафтов с разным количеством препятствий (препятствие в данном случае представляло собой случайный четырехугольник, ограниченный по максимальной площади и максимальной длине стороны) в количестве 100 штук для каждого уровня числа препятствий.
2. Виртуальной толпе, управляемой каждой из тестируемых моделей поведения, ставилась задача пересечения каждого из сгенерированных на предыдущем шаге ландшафтов.
3. В процессе моделирования фиксировались показатели кривизны пути и количества дошедших до цели участников толпы.

В процессе генерации тестовых ландшафтов, использовались следующие принципы:

- ландшафт имеет форму квадрата;
- в одном из его углов расположена область начального расположения агентов, в которой случайным образом размещены участники толпы;
- в противоположном углу расположена цель, которую пытается достичь толпа.

Пример подобных ландшафтов для разного количества препятствий приведен на рисунке 3.6.

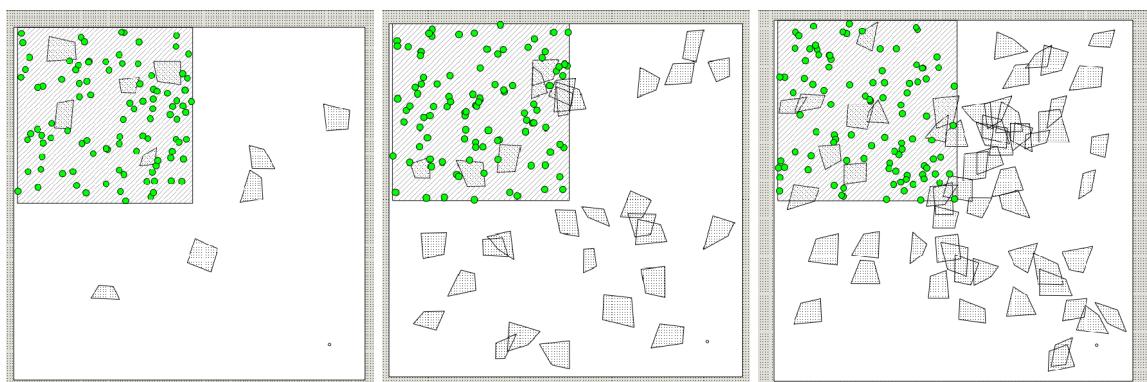


Рис 3.6. Примеры сгенерированных тестовых ландшафтов
для 10, 30 и 60 препятствий

Полученная зависимость между количеством препятствий и кривизной пути показана на рисунке 3.7.

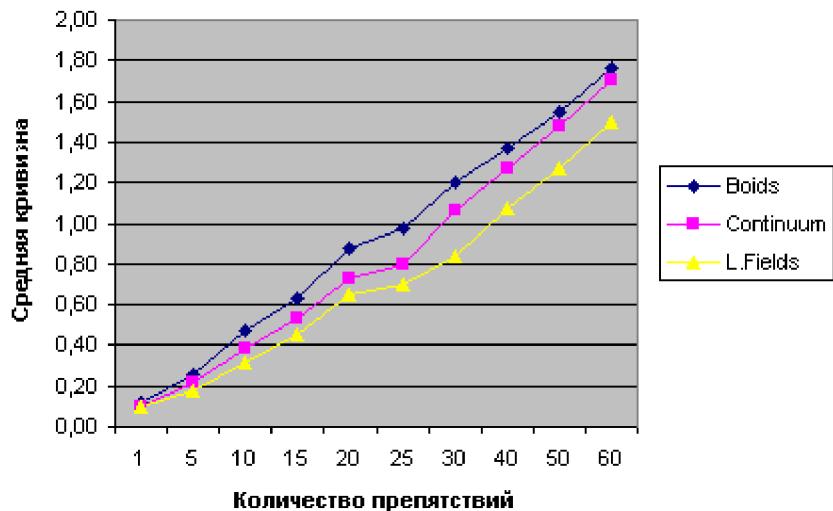


Рис 3.7. Зависимость кривизны пройденного пути от количества препятствий для разных моделей поведения толпы

Как видно из приведенного графика, предложенная в данном диссертационном исследовании модель на основе локальных полей (на графике она обозначена как «L.Fields») имеет в среднем более низкий показатель кривизны пути на всем протестированном диапазоне количества препятствий среди всех исследуемых моделей.

На рисунке 3.8 показана зависимость между количеством препятствий и количеством дошедших до цели участников толпы.

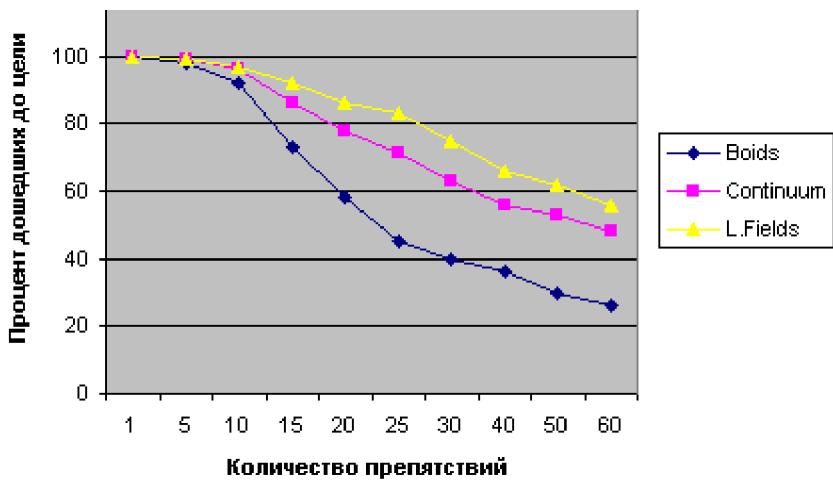


Рис 3.8. Зависимость меры дошедших до финиша участников толпы от количества препятствий

В этом teste предложенная в данной работе модель поведения толпы на основе локальных полей показала положительный результат – в среднем

процент дошедших до финиша участников толпы на 6,6% больше по сравнению с моделью Continuum Crowds и на 21,8% больше по сравнению с моделью Boids.

3.7. Выводы

В данной главе представлены алгоритм расчета локальных скалярных полей, используемых в описанной в предыдущей главе модели поведения толпы, а также алгоритм расчета вектора движения для каждого участника толпы.

Разработан алгоритм расчета функции скорости и следующих локальных полей:

- поле плотности;
- поле дискомфорта;
- поле цели.

В данном алгоритме учитывается упреждающий дискомфорт и области видимости отдельных участников толпы.

На основании вышеперечисленных полей разработан итеративный алгоритм расчета вектора движения для каждого участника толпы.

В заключение была проведена серия тестирований алгоритма с целью показать его адекватность в сравнении с другими, уже существующими алгоритмами (основанными на других моделях поведения толпы). В результате тестирования было показано, что предложенный алгоритм имеет преимущество по сравнению с конкурентами.

Глава 4. Программная реализация модели поведения толпы

В этой главе описана программная реализация предложенной ранее модели поведения толпы, позволяющая экспериментально оценить её эффективность на различных экспериментальных ситуациях, а также рассмотрен процесс обучения модели на статистических данных о поведении реальных толп. Приводится описание натурного эксперимента с использованием предлагаемой модели.

4.1. Структура программного обеспечения

В соответствии с поставленными этапами решения исходной задачи создания модели поведения толпы, для разработки требуемого программного обеспечения (в дальнейшем – ПО) можно выделить следующие его структурные элементы:

1. Пользовательский интерфейс конструктора внешней среды и начальных параметров для тестирования модели.
2. Модуль системы расчета поведения толпы на основе созданных конструктором данных
3. Модуль визуализации полученных результатов
4. Модуль сбора статистических сведений о различных сессиях моделирования толпы, анализа полученных результатов, а также сравнения эффективности различных методов моделирования толпы.

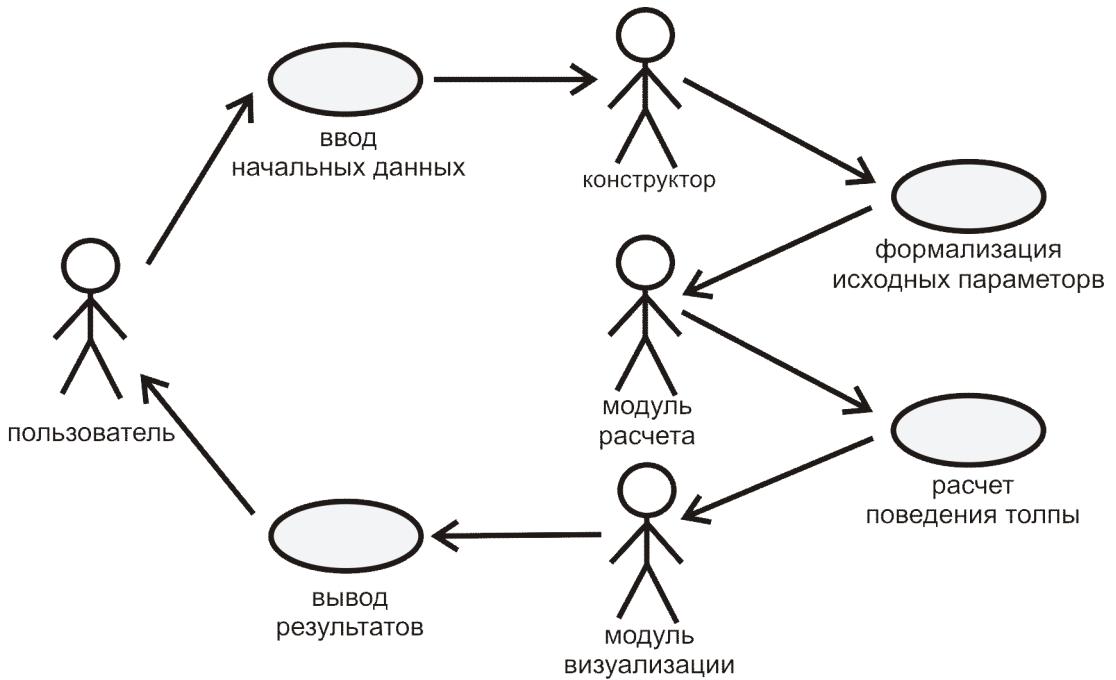


Рис 4.1. Основная диаграмма вариантов использования программной реализации системы моделирования поведения толпы

Перечисленные программные элементы разрабатываемого комплекса предлагается разделить на несколько независимых расширяемых модулей, каждый из которых обладает своим интерфейсом пользователя. Данный подход позволяет проводить более глубокое тестирование и проверки на возникновение ошибок на всех уровнях моделирования толпы. На основе предложенной структуры было принято решение реализовать следующие модули программного комплекса:

1. Конструктор внешней среды и начальных условий модели поведения толпы на основе скалярных полей, в дальнейшем именуемый как конструктор.
2. Модуль расчета поведения толпы на основе предложенной модели (а также нескольких других уже существующих моделей), в дальнейшем именуемый как рендерер.
3. Модуль визуализации полученных результатов моделирования, сбора статистических сведений о различных сессиях моделирования толпы, анализа полученных результатов, а также

сравнения эффективности различных методов моделирования толпы, в дальнейшем именуемый как визуализатор.

Диаграмма вариантов использования предложенного программного комплекса, построенная на основе вышеизложенных предложений, представлена на рисунке 4.1. Структура самого программного комплекса показана на рисунке 4.2.

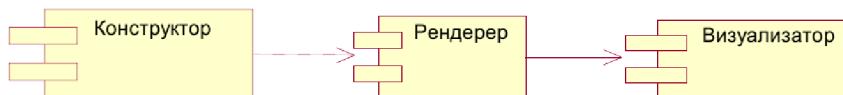


Рис 4.2. Компонентная структура программной реализации системы моделирования поведения толпы

К самому программному комплексу также выдвигаются следующие дополнительные требования:

1. Возможность расширения списка поддерживаемых моделей и алгоритмов поведения толпы.
2. Возможность добавления новых мер для оценки эффективности моделирования поведения толпы.
3. Возможность введения новых статистических данных о поведении реальных толп для проверки адекватности исходных моделей поведения толпы.

Для реализации требования о возможности расширения функционала было принято решение о проектировании предложенного программного комплекса с использованием объектно-ориентированного программирования (в дальнейшем - ООП) и паттерна модель-представление-контроллер (в дальнейшем – MVC, Model-View-Controller, впервые описанном в работе [99]).

Подход к проектированию предложенного программного обеспечения с использованием ООП позволяет свести к минимуму дублирование кода и добавляет инструментарий для дальнейшего расширения функционала проекта.

Паттерн проектирования MVC позволяет разделить код на набор непересекающихся взаимодействующих модулей с особым функционалом:

1. Модель – набор классов (Actor, Crowd, Obstacle), представляющих собой элементы разрабатываемой модели, каждый из которых реализует часть общего функционала системы.
2. Представление – набор классов (ViewerWidget, ConstructorWindow), визуализирующих процессы, происходящие с моделью. Каждый из этих классов возвращает пользователю информацию из системы.
3. Контроллер – набор классов (CrowdController, Solver, Seeder), производящих некоторые операции над элементами модели.

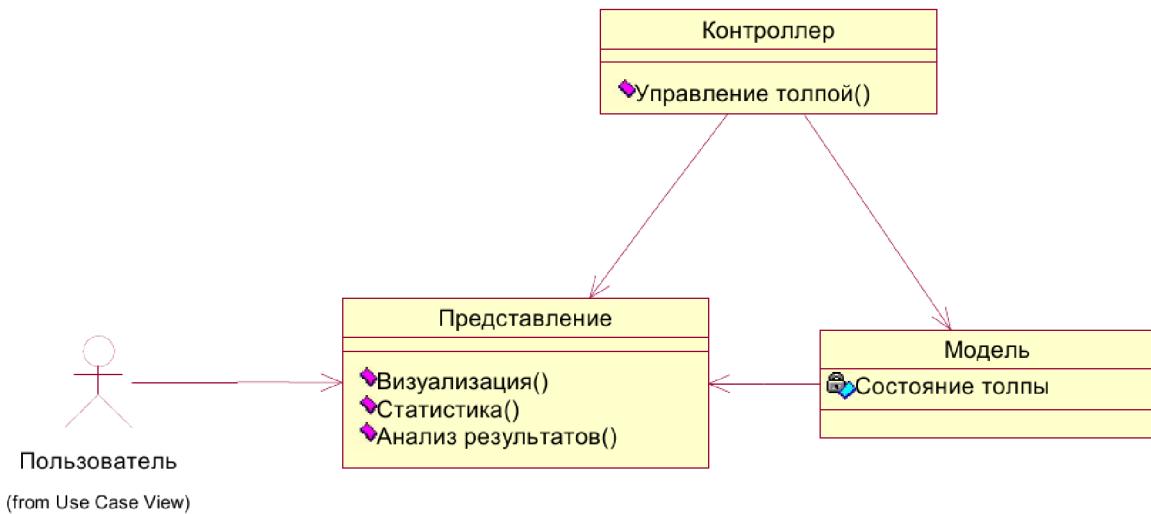


Рис 4.3. Структура программного обеспечения в соответствии с паттерном проектирования MVC (Model-View-Controller)

Данный подход позволяет четко разделить функционал системы на взаимодействующие блоки с прозрачными интерфейсами, что позволяет свести к минимуму количество возможных ошибок в дальнейшем программировании. К минусам данного подхода можно отнести некоторое увеличение объема программного кода проекта. Внутренняя структура программного обеспечения в соответствии с предложенным паттерном проектирования показана на рисунке 4.3.

4.2. Программная платформа

Для разработки предложенного программного обеспечения был выбран язык программирования C++ и библиотека классов Nokia Qt.¹ Выбор данной платформы был обусловлен следующими преимуществами:

1. Открытость и свободность платформы (библиотека классов Qt обладает лицензией с открытыми исходными кодами GNU Lesser General Public License, что позволяет использовать его в любых, в т.ч. закрытых проектах)
2. Мультиплатформенность. Фреймворк Qt поддерживает широкий набор аппаратных (Intel x86/x86_64, ARM, Sparc, PowerPC и т.д.) и программных платформ (Microsoft Windows, Apple MacOS X, Linux, Solaris, BSD, AIX и т.д.)
3. Расширяемость платформы, возможность написания собственных классов, интегрируемых в саму библиотеку классов (драйверы для доступа к данным, элементы пользовательского интерфейса и т.д.)
4. Наличие большого количества документации для разработчиков программного обеспечения.
5. Наличие большого количества средств разработки (библиотека классов Qt интегрируется с многими средами разработки: с Microsoft Visual Studio, Eclipse и QtCreator).

¹ Qt: A cross-platform application and UI framework. Modular class library. URL: <http://qt.nokia.com/products/library> (дата обращения: 01.04.2011)

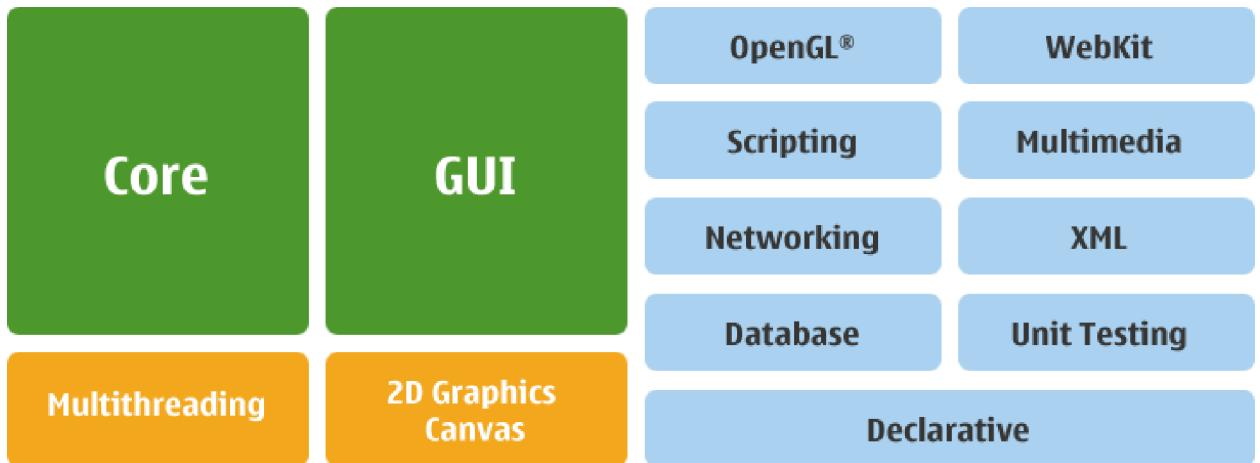


Рис 4.4. Диаграмма модулей библиотеки Qt

Примерная структура библиотеки классов Qt показана на рисунке 4.4.

Целевой платформой для работы программного обеспечения, описанного в данной главе, является ОС GNU/Linux, но работа ПО также проверялась на ОС Windows XP/Vista/7.

4.3. Программная реализация

Исходя из набора поставленных задач и требований к разрабатываемому комплексу программ, для каждого из элементов комплекса была предложена собственная диаграмма классов.

4.3.1. Модуль «Конструктор»

Базовая диаграмма классов для данного модуля представлена на рисунке 4.5.

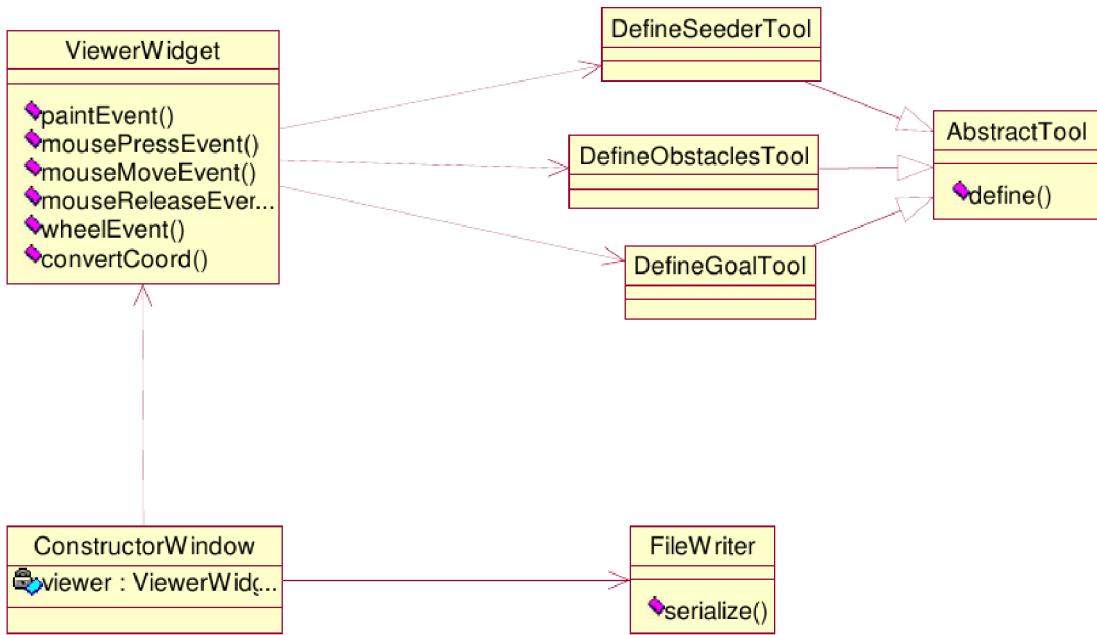


Рис 4.5. Диаграмма классов модуля «Конструктор»

В данном модуле определено несколько классов инструментов, задающих различные начальные параметры предложенной модели поведения толпы:

1. `DefineSeederTool`, задающий начальное положение и состояние толпы.
2. `DefineObstaclesTool`, задающий положение препятствий и помех на пути движения толпы.
3. `DefineGoalTool`, задающий цель движения толпы.

Все эти классы инструментов унаследованы от абстрактного класса `AbstractTool`. Данный подход позволяет при необходимости расширять набор используемых инструментов новыми инструментами, а также уменьшить количество дублируемого кода.

Класс `ViewerWidget` является классом представления данных и позволяет производить визуализацию процесса задания начальных параметров предложенной модели поведения толпы.

Класс `ConstructorController` генерирует набор классов модели с учетом начальных условий, заданных вышеописанным инструментарием и передает их в класс `FileWriter`, который сериализует набор классов модели в файл

формата XML, предназначенный для обмена между модулями программного комплекса.

4.3.2. Модуль «Рендерер»

Диаграмма классов данного модуля представлена на рисунке 4.6.

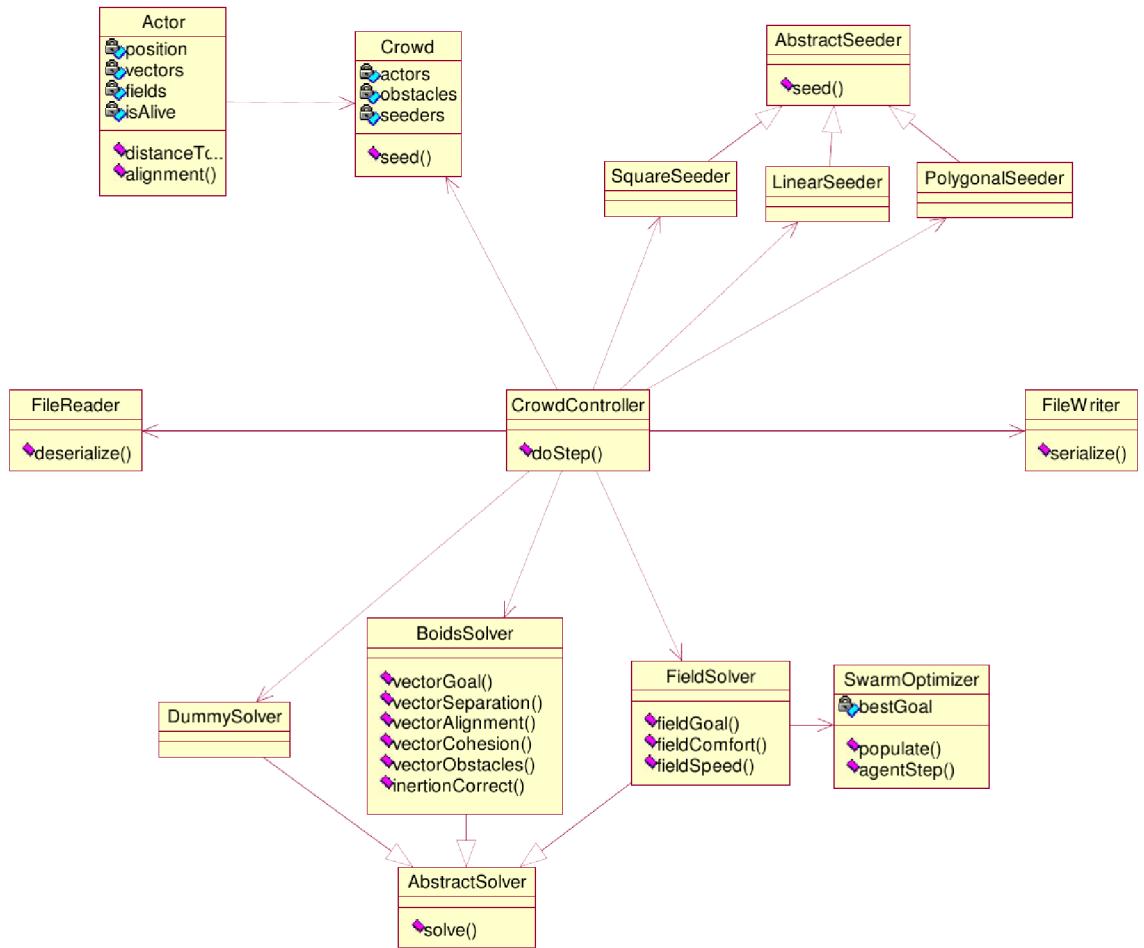


Рис 4.6. Диаграмма классов компонента «Рендерер»

Данный модуль осуществляет сам процесс моделирования поведения толпы на основании предложенной модели. В данном модуле определен набор классов, описывающих элементы и сущности предложенной модели – классы Actor и Crowd.

Предложен набор классов, задающих начальное положение для участников толпы по различным определенным алгоритмам, начальные условия которых заданы в модуле «Конструктор»: SquareSeeder,

LinearSeeder, PolygonalSeeder, унаследованные от абстрактного класса AbstractSeeder.

Предложен набор классов, реализующих алгоритмы поведения толпы: FieldSover, ContinuumSolver, BoidsSolver, DummySolver. Класс, реализующий предложенный в данной работе метод моделирования поведения толпы на основе локальных скалярных полей – FieldSolver.

Класс-контроллер CrowdController импортирует данные из модуля «Constructor», производит процесс имитационного моделирования поведения толпы на основании заданных условий и экспортирует данные в файл формата XML для передачи в модуль «Визуализатор»

4.3.3. Модуль «Визуализатор»

Диаграмма классов данного модуля представлена на рисунке 4.7.

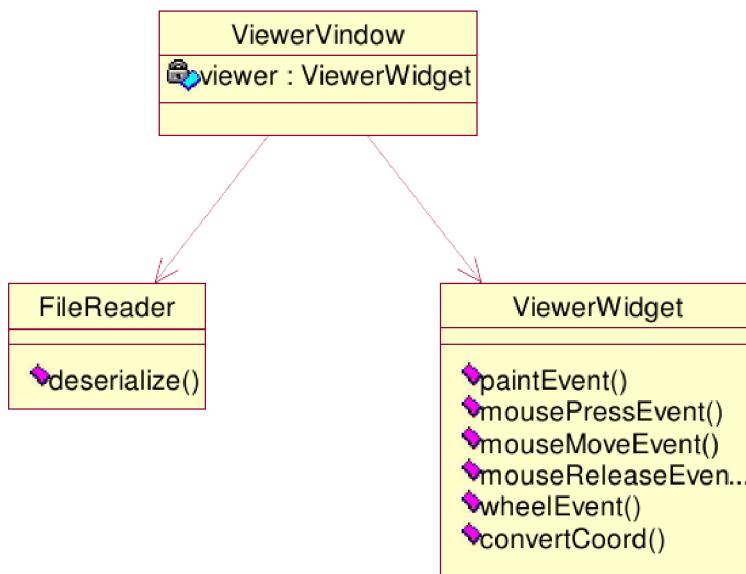


Рис 4.7. Диаграмма классов компонента «Визуализатор»

Данный модуль импортирует данные, полученные в модуле «Рендерер», визуализирует и анализирует их с использованием класса ViewerWidget.

4.3.4. Формат обмена данными между модулями

Как было замечено ранее, каждый из реализованных модулей является независимым программным продуктом, взаимодействующий с другими модулями с использованием особого формата файлов для обмена данными. Структура передаваемых данных выглядит следующим образом:

- Начальный блок
 - Определение целей движения толпы
 - Определение препятствий
 - Определение алгоритмов начального расположения участников толпы
- Расчетный блок
 - Параметры первого участника толпы
 - Положение
 - Дополнительные данные, полученные в результате работы алгоритма моделирования поведения толпы (набор векторов движения, локальных полей и т.д.)
 - Параметры следующего участника толпы.

По причине древовидной структуры данных, было принято решения использовать XML в качестве формата хранения подобных данных. Для обработки данного формата файлов использовался класс QDomDocument модуля QDom библиотеки классов Qt.

Подробное описание формата файла хранения и передачи внутренних данных представлено в приложении А.

На этапе работы модуля «Конструктор», заполняется начальный блок файла предложенного формата. На этапе работы модуля «Рендерер», к файлу добавляется расчетный блок с информацией о проведенном процессе моделирования поведения толпы. На заключительном этапе модуль «Визуализатор» визуально демонстрирует смоделированный процесс поведения толпы и анализирует результаты.

4.4. Графический интерфейс

Графический интерфейс программного комплекса представляет собой набор окон, каждое из которых существует для решения определенного круга задач. Каждое из окон программного комплекса принадлежит отдельным программным модулям. Стоит заметить, что модуль Рендерер графического интерфейса не имеет.

4.4.1. Окно «Визуализатор»

Данное окно позволяет визуально инспектировать поведение виртуальной толпы после процесса расчета в окне «Конструктор». Окно состоит из нескольких блоков: блок просмотра поведения виртуальной толпы, блок наложения статистики, а также блок управления анимацией.

Блок просмотра поведения виртуальной толпы позволяет отображать структуру помещения, в котором происходит симуляция движения толпы, участников толпы, точки начала и конца движения. Для удобства анализа поведения агентов данный блок также позволяет накладывать визуальное отображение различных полей для выбранного агента. Параметры наложения задаются в блоке наложения статистики.

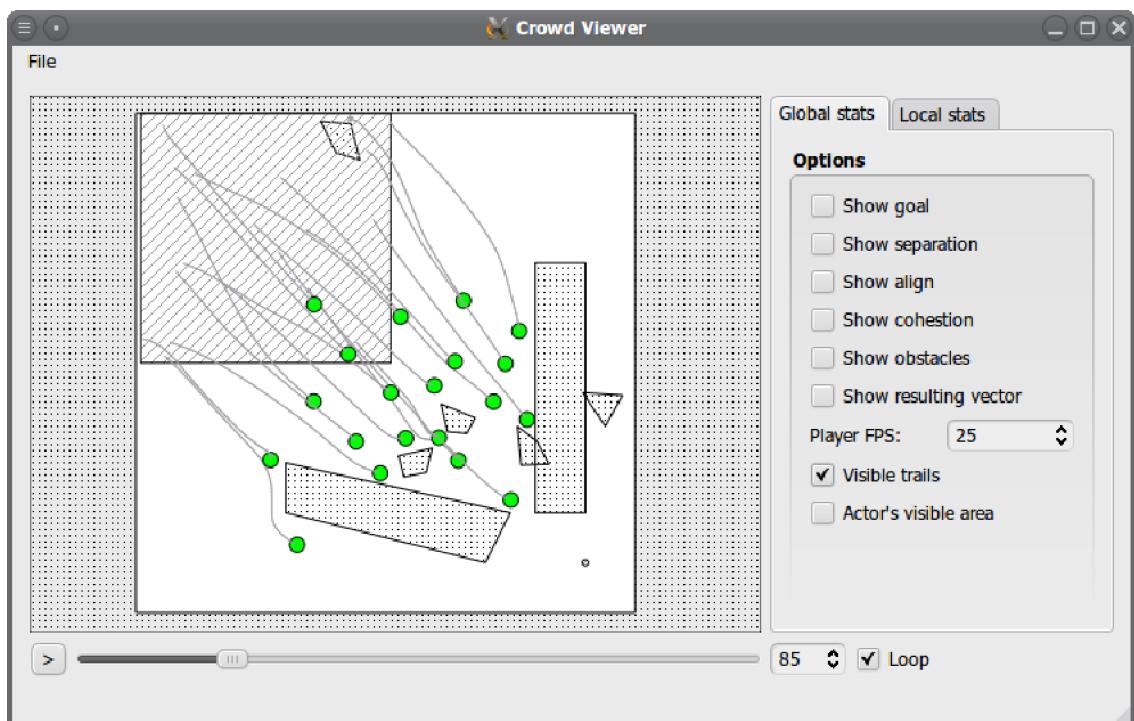


Рис 4.8. Окно «Визуализатор»

Пример работы окна «Визуализатор» показан на рисунке 4.8. В данном случае производится визуализация движения толпы из 20 участников через узкий проход и несколько небольших препятствий с отображением пройденных путей.

4.4.2. Пример визуализации процесса моделирования

На рисунке 4.9 предложен пример работы программного комплекса, иллюстрирующий поведение толпы в некоторых условиях.

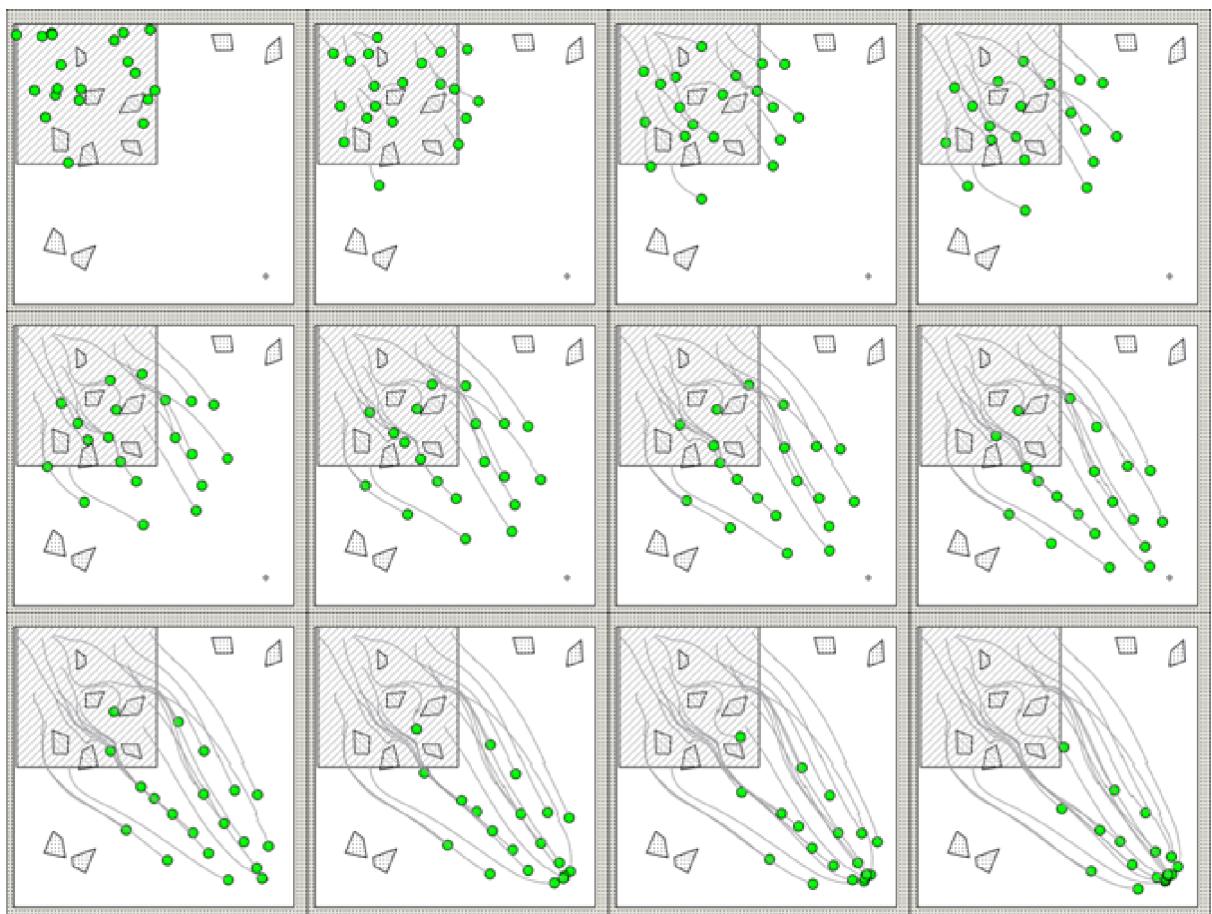


Рис 4.9. Пример визуализации движения толпы в соответствии
с предложенной моделью

На данном рисунке показано, как толпа, состоящая из 20 человек движется по гладкому ландшафту с десятью препятствиями небольшого размера.

4.5 Обучение модели

В процессе анализа задачи имитационного моделирования поведения толпы был выделен набор паттернов, характерных для поведения реальных толп, выраженных в таблицах зависимости некоторых параметров толпы друг от друга. Среди них:

- зависимость скорости от плотности толпы;
- зависимость пропускной способности от плотности толпы.

К тому же помимо выраженных численно закономерностей поведения реальной толпы, существует несколько наблюдаемых паттернов поведения:

- образование колонн при движении двух пересекающихся толп;
- образование заторов в местах с недостаточной пропускной способностью.

Также в главе 2 были введены два критерия, оценивающих относительную эффективность модели:

- средняя длина пути;
- средняя кривизна пути.

На основании вышеперечисленных мер поведения как реальных толп, так и виртуальных, возможно провести процесс обучения предложенного алгоритма моделирования поведения толпы путем подбора внутренних параметров системы на экспериментальных данных.

В процессе исследования было проведено два обучающих эксперимента:

1. Движение толпы в обычных условиях по сужающемуся коридору.
2. Движение толпы в экстремальных условиях через стандартный дверной проем.

Задача обучения модели, представляющая собой задачу условной нелинейной оптимизации, заключалась в следующем:

$$f(p_1 \dots p_n) : X^n \rightarrow R, \quad X = \{p \mid p_{i,\min} < p_i < p_{i,\max}, i=1 \dots n\} \subset R^n$$
$$f(p_1 \dots p_n) \rightarrow \min_{p \in X} \quad (4.1)$$

где f – функция фитнеса, $p_{i,min}$ и $p_{i,max}$ – ограничения, накладываемые на выбор параметра p_i .

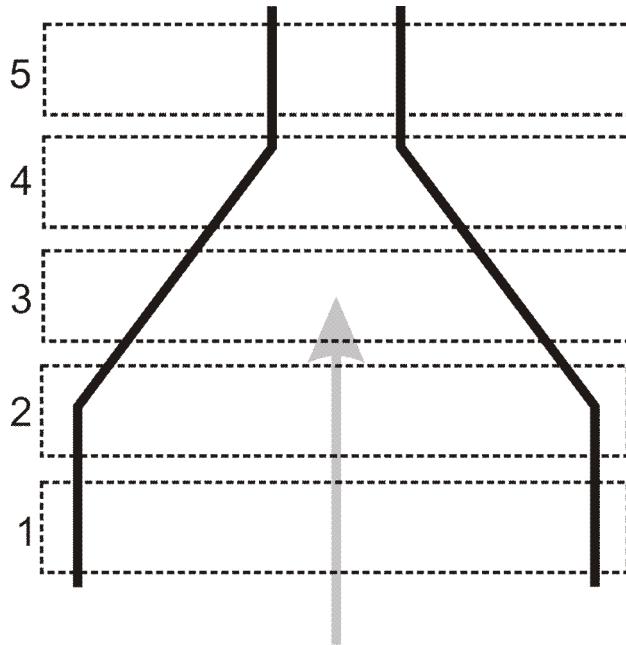


Рис 4.10. Схема тестового сужающегося коридора и пяти измерительных зон.

Направление движения толпы показано стрелкой

Первый эксперимент заключался в следующем:

1. Для сужающегося коридора, изображенного на рисунке 4.10, был выделен набор измерительных зон.
2. Формировался начальный вектор внутренних параметров системы.
3. В коридор запускалась виртуальная толпа, действующая на основе предложенной модели, и на каждой зоне производились замеры пар значений плотность-скорость толпы.
4. Из полученных данных для каждого диапазона плотностей и для каждой модели был построен набор гистограмм и сравнен с эталонными распределениями, представленными в работе Предтеченского [31]. Один из вариантов набора подобных промежуточных гистограмм показан на рисунке 4.11.
5. СКО, полученная в результате сравнения, использовалась как функция фитнесса для алгоритма обучения, пытающегося ее минимизировать.
6. Шаги 2-5 повторялись до наступления условия останова.

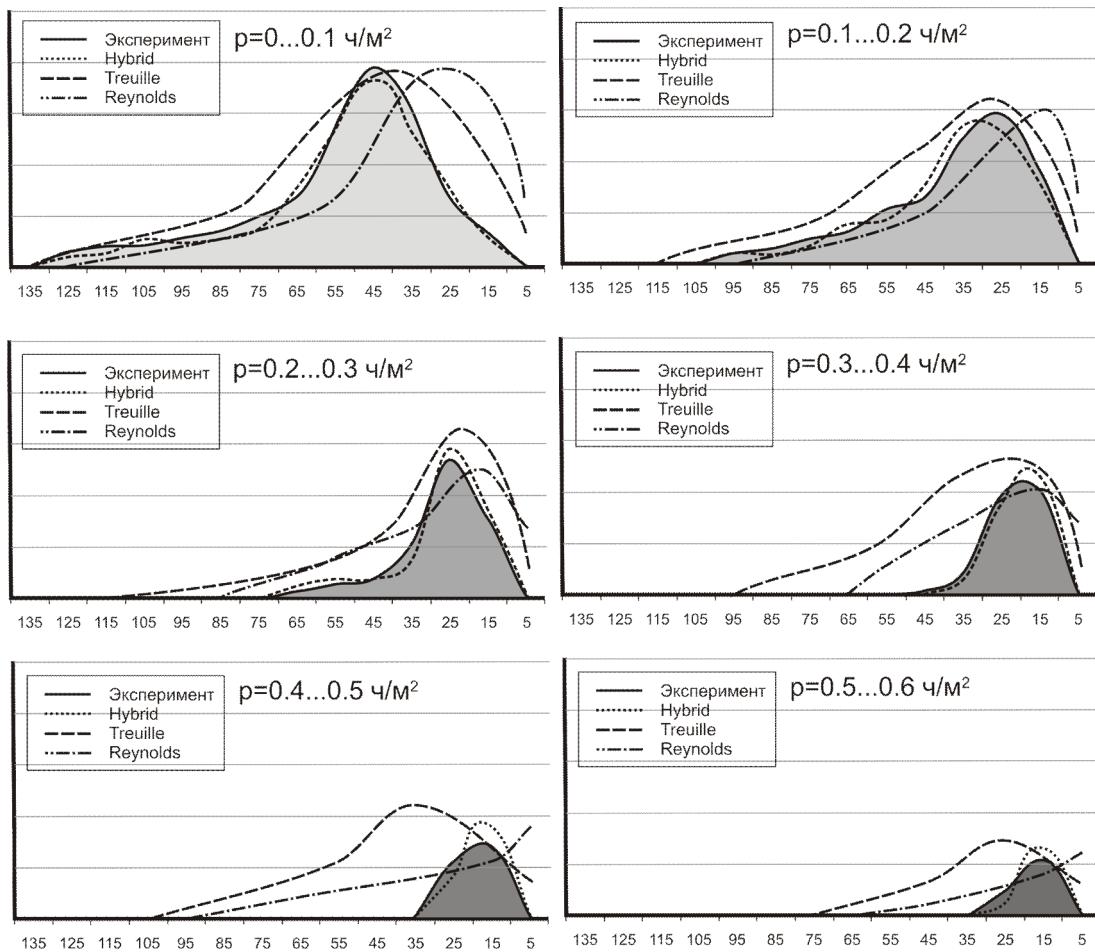


Рис 4.11. Гистограммы распределения скоростей для каждого диапазона плотности толпы

Помимо поведения толпы в нормальных условиях, для дальнейшего обучения необходимо произвести эксперимент-сравнение поведения виртуальной толпы, поведение которой определяется в рамках рассматриваемых моделей, и реальной толпы в экстремальных условиях.

В качестве исходных данных была использована информация, представленная в работе Предтеченского [31] о поведении реальной толпы в экстремальных условиях при прохождении через стандартный дверной проем 2000x800мм. Тестовый ландшафт представлен на рисунке 4.14, пунктиром обозначена зона измерения скорости.

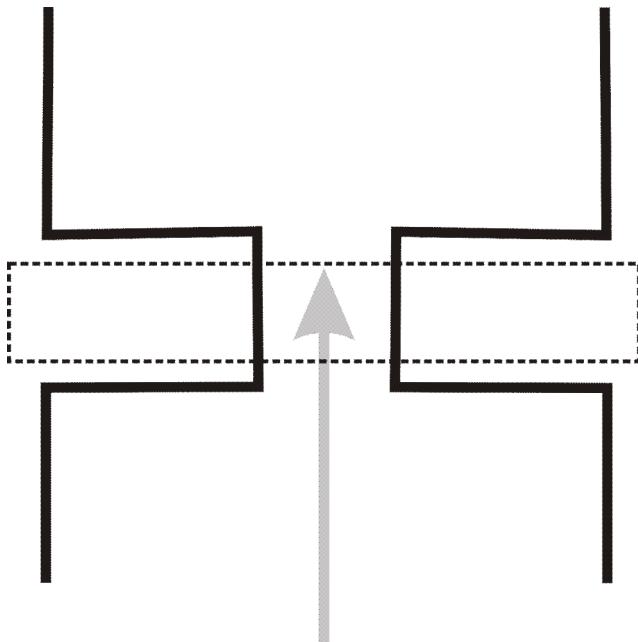


Рис 4.14. Схема тестового дверного проема

В процессе данного эксперимента производилось измерение средней скорости прохождения толпой измерительной зоны в зависимости от ее плотности. Последовательность действий при проведении эксперимента 2 такая же, как и в эксперименте 1.

4.6. Натурный эксперимент

Для подтверждения адекватности модели, предлагаемой в данном диссертационном исследовании, был проведен эксперимент с реальной толпой. Суть эксперимента состояла в следующем: толпа проходила через дверные проемы различной ширины (0.5 м, 0.7 м, 1.4 м). Сам процесс прохождения толпой дверного проема фиксировался на видеокамеру, а впоследствии на полученной видеозаписи замерялась скорость каждого участника толпы, а также плотность некоторой области толпы, находящейся внутри дверного проема. Задача эксперимента состояла в измерении времени покидания помещения толпой. В дальнейшем было проведено моделирование данной ситуации с использованием предложной модели поведения толпы, модели Treuille, Reynolds и сравнение модельных и реальных результатов. Структурная схема помещения для проведения эксперимента показана на рисунке 4.17.

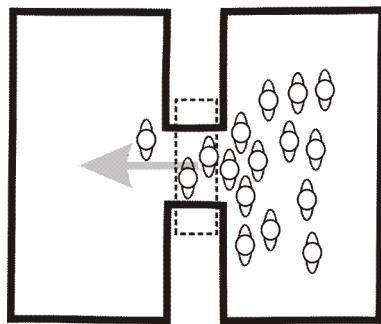


Рис. 4.17 Структурная схема помещения для проведения эксперимента

Для проведения эксперимента была организована толпа из 50 студентов ФКН ВГУ. Каждый этап эксперимента для каждого размера прохода был повторен 35 раз.

Результаты эксперимента показаны в таблицах 4.1-4.3.

Таблица 4.1. Скорость покидания помещения, D=0,5м»

	Реальн.	Гибрид.	Рейнолдс	Трюи
Среднее	38,5142	36,7757	46,1855	46,5781
Стандартное отклонение	2,6939	2,7166	1,7973	1,5669
Доверит. интервал (95,0%)	0,9253	0,9332	0,6174	0,5382

Таблица 4.2. Скорость покидания помещения, D=0,7м

	Реальн.	Гибрид.	Рейнолдс	Трюи
Среднее	33,7428	32,1777	39,0034	38,4340
Стандартное отклонение	1,0666	2,1417	2,1676	2,3930
Доверит. интервал (95,0%)	0,3664	0,7357	0,7446	0,8220

Таблица 4.3. Скорость покидания помещения, D=1,4м

	Реальн.	Гибрид.	Рейнолдс	Трюи
Среднее	18,0857	21,2225	21,4712	20,7588
Стандартное отклонение	2,4539	1,4569	2,7074	2,0747
Доверит. интервал (95,0%)	0,8429	0,5004	0,9300	0,7127

Как видно из приведенных таблиц 4.1-4.3 с результатами, предложенная в данной работе гибридная модель поведения толпы показала результат,

наиболее близкий к реальным данным. Подробное описание результатов эксперимента представлено в приложении В.

4.7. Выводы

В результате проделанной работы, в данной главе была предложена практическая реализация программного обеспечения, реализующего алгоритм расчета индивидуальных скалярных полей и позволяющего проводить имитационное моделирование толпы, поведение которой основывается на предложенной модели.

Была проведена серия экспериментов по сравнению полученной модели как с уже существующими моделями поведения толпы, так и с реальными толпами.

Результаты, полученные в ходе экспериментов, позволили подтвердить исходное предположение о том, что переход от глобальных полей к локальным позволит приблизить поведение виртуальных толп к толпам реальным.

Заключение

После проведения в рамках диссертации теоретических и практических исследований, были получены следующие результаты, обладающие практическим и научным значением:

1. Предложена математическая модель поведения толпы на основе индивидуальных скалярных полей, расширяющая существующие модели на основе континуума при помощи агентного подхода, что позволило добиться большего соответствия к поведению реальных толп.
2. В соответствии с моделью разработан алгоритм расчета скалярных полей, позволяющий математически учитывать множество

различных внешних и внутренних факторов, влияющих на поведение человека в толпе.

3. Проведен сравнительный анализ различных алгоритмов, описывающих поведение толпы, даны рекомендации по их использованию.
4. Произведено экспериментальное подтверждение адекватности представленной модели.
5. Спроектирована структура программного обеспечения, реализующего алгоритм построения индивидуальных скалярных полей, а также позволяющего производить имитационное моделирование толпы в соответствии с предложенной моделью.

Литература

1. Андреев А.О. Экспресс-оценка возможностей первичных средств пожаротушения в управленческих решениях при осуществлении государственного пожарного надзора // Дис. канд. техн. наук. – М., 2000.
2. Айбуев З.С. Формирование людских потоков на предзаводских территориях крупных промышленных узлов машиностроительного профиля // Дис. канд. техн. наук. – М., 1989.
3. Аптуков А.М., Моделирование групповой динамики толпы, паникующей в ограниченном пространстве / Аптуков А.М., Брацун Д.А. // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика, 2009. – №3. – с. 18-23.
4. Беляев С.В. Эвакуация зданий общего назначения // М.: 1938.
5. Богданов К.Ю. Динамика паникующей толпы // М.: Квант, 2005. – №5. – с. 2-7.
6. Вайдлих В. Социодинамика: системный подход к математическому моделированию в социальных науках // М: Едиториал УРСС, 2005. – 480с.
7. ГОСТ 12.1.033-81. ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. Термины и определения.
8. Гребенников Р.В. Модель поведения толпы на основе локальных потенциальных полей // Вестник ВГУ, Системный Анализ и информационные технологии. – Воронеж: 2009. – Т.1. – с. 46-50.
9. Гребенников Р.В. Модель поведения толпы на основе локального планирования пути // Вестник ВГТУ – Часть 9, Т.5. – Воронеж: ВГТУ, 2009 – с. 77-81.
10. Гребенников Р.В. Решение задачи об оптимальном управлении толпы с использованием метода оптимизации роя частиц //

- Вестник ВГУ, Системный Анализ и информационные технологии.
– Т.2. – Воронеж: ВГУ, 2009. – с. 87-91.
- 11.Гребенников Р.В. Разработка индивидуальных характеров поведения при моделировании толпы // Вестник ВГУ, Системный Анализ и информационные технологии. – Т.2. – Воронеж: ВГУ, 2008. – с. 41-44.
- 12.Гребенников Р.В. Апробация различных методов поведения толпы / Гребенников Р.В., Тюкачев Н.А. // Сборник работ участников конференции «ИТ-2010». – Н.Новгород: 2010. – с. 10-12.
- 13.Гребенников Р.В., Метод имитационного моделирования групповой динамики толпы // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2010», Вычислительная математика и кибернетика. – Москва: МГУ, 2010. – с. 47-48.
- 14.Гребенников Р.В. Гибридная модель поведения толпы // Прикладная Информатика. – Москва: Маркет ДС, 2010. – Т.4. – с. 14-22.
- 15.Гребенников Р.В. Обзор и анализ существующих математических моделей поведения толпы с точки зрения социальной психологии // Сборник работ участников конференции «Гибридный Интеллект 2010». – Воронеж: МИКТ, 2010. – с. 13-19.
- 16.Гребенников Р.В. Обзор классических методов моделирования поведения толпы // Межвузовский сборник научных трудов. Серия: Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах. – Воронеж: ВГТУ, 2010. – с. 50-53.
- 17.Гребенников Р.В. Обзор ADPLV и графоаналитических методов моделирования толпы // Межвузовский сборник научных трудов. Серия: Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах. – Воронеж: ВГТУ, 2010. – с. 210-214.

- 18.Дмитриченко А.С. Новый подход к расчету вынужденной эвакуации людей при пожарах / Дмитриченко А.С., Соболевский С.А., Татарников С.А. // Пожаровзрывобезопасность. – 2002. – №6.
- 19.Иванов И.П. Физика сложных систем – динамика паникующей толпы // Научная сеть, 2009. URL: <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1181350&uri=page2.html> (дата обращения: 01.04.2011).
- 20.Исаевич И.И. Разработка основ многовариантного анализа планировочных решений станций и пересадочных узлов метрополитена на основе моделирования закономерностей движения людских потоков // Дис. канд. техн. наук. – М., 1990.
21. Капица С., Модель роста населения земли и экономического развития человечества // Вопросы экономики. – 2000. - №12.
- 22.Копылов В.А. Исследование параметров движения людей при вынужденной эвакуации // Дис. канд. техн. наук. – М., 1974.
23. Лебон Г. Психология народов и масс. / Пер. с фр.; Предисл. И. Владимирова. – М.: ТЕРРА – Книжный клуб, 2008. – 272с.
- 24.Литvak Б. Групповая динамика. Общая характеристика толпы // Клуб Кросс, 2009. – URL: http://www.cross-club.ru/harakteristika_tolpy.html (дата обращения: 01.04.2010).
- 25.Манилов Е.А. Автоматизированная система прогнозирования поведения паникующей толпы // Обозрение прикладной и промышленной математики. – М: 2008. – №15(3). – с. 500-501.
- 26.Мокшанцев Р.И. Социальная психология. / Мокшанцев Р.И., Мокшанцева А.В. // Учебное пособие. Серия «Высшее образование». – Новосибирск: 2001. – 408с.
- 27.Назаретян А.П. Психология стихийного массового поведения // Лекции. – М.:ПЕРСЭ, 2001. – с 101-112.

- 28.Письмиченко Д.В. Мультиагентная модель поведения толпы / Письмиченко Д.В., Божич В.И. // Известия ТГРТУ. – Таганрог: 2002. – №26(3). – с 19-22.
- 29.Овсянников А.Н. Закономерности формирования структуры коммуникационных путей в крытых зреищных сооружениях // Дис. канд. техн. наук. – М., 1983.
- 30.Овсянников А.Н. Закономерности маршрутизации людских потоков в зреищных сооружениях / Овсянников А.Н., Холщевников В.В. // Исследования по функциональным физико-техническим и эстетическим проблемам архитектуры. – Томский госуниверситет, 1988.
- 31.Предтеченский В.М. Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков. / Предтеченский В.М., Мишинский А.И. // Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., доп. и перераб. – М: Стройиздат, 1979. – 376 с.
- 32.Ройтман М.Я. Вынужденная эвакуация людей из зданий // М: Стройиздат, 1965. – 111с.
- 33.Степанцов М.Е. Математическая модель направленного движения группы людей // Математическое моделирование, 2004. – т. 16(3). – с. 43-49.
- 34.Таранцев А.А. Моделирование параметров людских потоков при эвакуации с использованием теории массового обслуживания.// Пожаровзрывобезопасность. – М: Пожнаука, 2002. – №6.
- 35.Таранцев А.А. Об одной задаче моделирования эвакуации с использованием теории массового обслуживания.// Пожаровзрывобезопасность. – М: Пожнаука, 2002. – №3.
- 36.Тростянский С.Н. Имитационное моделирование формирования эффекта толпы / Тростянский С.Н., Панов А.В. // Системы

- управления и информационные технологии. – 2007. – №3.2(29). – с. 299-302.
- 37.Холщевников В.В. Эвакуация и поведение людей при пожарах / Холщевников В.В., Самошин Д.А. // Учеб. пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – 212с.
- 38.Холщевников В.В. Рекомендации по расчету путей эвакуации из зальных помещений и из зданий спортивных сооружений / Холщевников В.В., Овсянников А.Н., Голубинский А.П., Швейцер И.С. // Справочное пособие к СНиП. – М: Стройиздат, 1991.
- 39.Холщевников В. В. Обзор компьютерных программ моделирования эвакуации зданий и сооружений / Холщевников В. В., Самошин Д.А., Галушка Н.Н. // Пожаровзрывобезопасность. – М: Пожнаука, 2002. – №5.
- 40.Холщевников В.В. Расчет оптимальных вариантов пешеходных путей в городских узлах // На стройках России. – 1983. – №3.
- 41.Холщевников В.В. Моделирование и анализ движения людских потоков в зданиях различного назначения / Холщевников В.В., Никонов С.А., Шамгунов Р.Н. // М: МИСИ, 1986.
- 42.Шурин Е.Т. Выделение групп населения по мобильным качествам и индивидуальное движение в людском потоке как основа моделирования движения "смешанных" людских потоков при эвакуации / Шурин Е.Т., Апаков А.В. // Проблемы пожарной безопасности в строительстве. - М.:АГПС МВД России, 2001. - с.36-42
- 43.Aitken M. The Lord of the Rings: the visual effects that brought middle earth to the screen / Aitken M., Butler G., Lemmon D., Saïndon E., Peters D., Williams G. // ACM SIGGRAPH 2004 Course Notes (Los Angeles, CA, August 08 - 12, 2004). SIGGRAPH '04. - New York: ACM, 2004.

- 44.Al-Gadhi S.A. Simulation of crowd behavior and movement: fundamental relations and application / Al-Gadhi S.A., Mahmassani H.S. // Transportation Research Record number 1320, 260. – 1991. – c. 268
- 45.Aoki I. A simulation study on the schooling mechanism in fish // Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 48. – 1982. – c. 1081–1088.
- 46.Ball P. The physical modeling of human social systems // Complexus, 1. – 2003. – 190-206.
- 47.Barraquand J. A random Sampling Scheme for Path Planning / Barraquand J., Kavraki L., Latombe J.C. // International Journal of Robotics Research, 16(6). – 1997. – 759-774.
- 48.Blue V.J. Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways / Blue V.J., Adler J.L. // Transp. Res. B 35. – 2001. – 293-312.
- 49.Blue V.J. Emergent fundamental pedestrian flows from cellular automata microsimulation / Blue V.J., Adler J.L. // Transportation research board, 1644. – 1998. – 29-36.
- 50.Bovy P. Route choice: way finding in transport networks / Bovy P., Stern E. // Berlin: Kluwer, 1990.
- 51.Bradley G.E. A proposed mathematical model for computer prediction of crowd movements and their associated risks // Engineering for crowd safety. Amsterdam: Elsevier, 1993. – 442pp.
- 52.Braun A. Modeling Individual Behaviors in Crowd Simulation / Braun A., Musse S.R., de Oliveira Bardo L.P.L., Bodmann E. J. // Av. Unisinos, 950. – Sao Leopoldo.
- 53.Capin T.K. Integration of Avatars and Autonomous Virtual Humans in Networked Virtual Environments / Capin T.K., Pandzic I.S., Thallmann D. // Proceedings of ICSI89. – IOS Press, Amsterdam Netherlands, 1998. – c. 326-333.

- 54.Daly P.N. Pedestrian speed/flow relationships for underground stations / Daly P.N, McGarth F., Annesley T.J. // Traffic Eng. Control 32, 1998. – c. 75-78.
- 55.Dogbe N.O. Modeling crowds by the mean-field limit approach // Mathematical and Computer modeling, 2010. – Volume 52, Issues 9-10. – c. 1506-1520.
- 56.Dorigo M.. Particle swarm optimization // Scholarpedia, 2008, 3(11). – c. 1486.
- 57.Erdmann M. On multiple Moving Objects / Erdmann M., Lozano-Perez T. // AI Memo 883. – Boston: AIL MIT, 1986.
- 58.Fowler M. Patterns of Enterprise Application Architecture // Addison-Wesley, 2003. – c. 200-214.
- 59.Fruinn J.J. Designing for pedestrians: a level of service concept // Highw. Res. Rec. 355, 1971. – c.1-15.
- 60.Funge J. Cognitive modeling: knowledge, reasoning and planning for intelligent characters / Funge J., Tu X., Terzopoulos D. // Proceedings of SIGGRAPH99, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference series. – 1999. – c. 29-38.
- 61.Greenshields B.D. A study of traffic capacity. // Proc. Highw. Res. Board 14. – 1934. – c. 448-77.
- 62.Helbing D. Simulating dynamical features of escape panic / Helbing D., Farkas I., Vicsek T. // Nature 407. – 2000. – c. 487.
- 63.Helbing D. Social force model for pedestrian dynamics / Helbing D., Molnar P. // Phys. Rev. E., 51. – 1995. – c. 42-82.
- 64.Helbing D. Self-organizing pedestrian movement / Helbing D., Molnar P., Farkas I.J., Bolay K. // Environment and Planning B, 28. – 2001. – c. 261-384.
- 65.Henderson L.F., The statistics of crowd fluids // Nature 229. – 2001. – c. 381-384.

66. Hughes R.L. A continuum theory for the flow of pedestrians. *Transp. Res.* B 36. – 2002. – 507-35
67. Kennedy J. Particle Swarm Optimization / Kennedy J., Eberhart R.C. // In Proceeding of the IEEE International Conference on Neural Networks. – Perth: IEEE Service Center, 1995. – c. 12-13.
68. Kirchner A. Simulation of competitive egress behavior: comparison with aircraft evacuation data / Kirchner A, Klupfel H, Nishinari K, Schadschneider A, Schreckenberg M. // *Physica A* 324. – 2003. – c. 689-97.
69. Koga Y. Planning motions with intentions / Koga Y., Kondo K., Kuffer J., Latombe J.C. // Proceedings of ACM SIGGRAPH'94. – New York: ACM, 1994. – c. 395-408.
70. Lamarche F. Crowd of virtual humans: a new approach for real-time navigation in complex and structuder environments / Lamarche F., Donikan S. // Computer graphics forum 51(3). – 2004. – c. 509-518.
71. Latombe J.C. Robot Motion Planning // Boston: Kluwer, 1991.
72. Lerner A. Crowds by example / Lerner A., Chrysanthou Y., Dani L. // Computer Graphics Froum 26(3). – 2007. – c. 655-664.
73. Li T.Y. Simulating Virtual Human Crowds with a Leader-Follower Model / Li T.Y., Jeng Y.J., Chang S.I. // Proceedings of IEEE Computer Animation Conference 2001. – Seoul: IEEE, 2001.
74. Li T.Y. Interactively directing virtual crowds in a virtual environment. / Li T.Y., Lin J.W., Liu Y.L., Hsu C.M. // Proceedings of the tenth International Conference on Artificial Reality and Tele-existance. – Taipei, 2000.
75. Lighthill M.J. On kinematic waves: I. Flood movement in long ricers; II. Theory of traffic flow on long crowded roads / Lighthill M.J, Whitham G.B. // Proc. R. Soc. London Ser. A 229. – 1955. – 281-345.
76. McFarland D. Problems of Animal Behavior // New York: Longman Sci. Technol., 1989. – c. 158.

77. Mendzic I.S. Autonomous actors in networked collaborative virtual environments. / Mendzic I.S., Capin T.K., Lee E., Magnenat-Thallmann N., Thallmann D. // Proceedings of IEEE Multimedia Modeling'98. – 1998. – c. 138-145.
78. Moroshita S. Evacuation of billboards based on pedestrian flow in the concourse of the station / Moroshita S, Shiraishi T. // Lecture notes in computer science. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. – №4173. – c. 716-719.
79. Musse, S. R. Hierarchical Model for Real Time Simulation of Virtual Human Crowds / Musse, S. R., Thalmann, D. // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2001. – №7 (2). – c. 152-164.
80. Musse S.R. Guiding and Interaction with virtual crowds in real-time / Musse S.R., Garant F., Thallmann D. // Proceedings of Eurographics Workshop on animation and simulation'99. – Milan: Springer, 1999. – c. 23-34.
81. Nalluri C. Civil Engineering Hydraulics (4-е изд.) / Nalluri C., Featherstone R.E. – Oxford: Blackwell, 2001. – c. 194-53.
82. Navin F. Pedestrian flow characteristics / Navin F., Weeler R.J. // Traffic Engineering 69(6). – 1969.
83. Neumann J. The general and logic theory of automata // Cerebral Mechanics in Behavior. -- New York: Wiley, 1951. – c. 1-31.
84. Partridge B. L. The Structure and Function of Fish Schools // Scientific American, June 1982. – 1982. – c. 114-123.
85. Perez G.J. Streaming, disruptive interference and power-law behavior in the exit dynamics of confined pedestrians / Perez G.J, Tapang G., Lim M., Saloma C. // Physica A 312. – 2002. – c. 609-618.
86. Potts, W. K. The Chorus-Line Hypothesis of Maneuver Coordination in Avian flocks // Letter in Nature 309. – 1984. – c. 344-345.
87. Pushkarev B. Capacity of walkways / Pushkarev B., Zupan J.M. // Transp. Res. Board. – 1975. – №538. – c. 1-15.

88. Reynolds C.W. Flocks, herds and Schools: A distributed behavioral model // Computer Graphics 21(4) SIGGRAPH'87 conference proceedings. – 1987. – c. 25-34.
89. Reynolds C.W. Steering Behaviors for autonomous characters // Proceedings of game developers conference'99. – 1999.
90. Roodzemand D.A. Using intelligent agents for pro-active, real-time urban intersection control // European Journal of Operational Research. – 2001.
91. Shao, W. Autonomous pedestrians / Shao W., Terzopoulos D. // In SCA'05: Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer Animation. – New York: ACM Press, 2005. – c. 19-28.
92. Schelling T. Dynamic Models of Segregation // Journal of Mathematical Sociology. – №1. – 1971.
93. Smith R.A. Engineering for crowd safety // Amsterdam: Elsevier, 1993. – 442c.
94. Surti H. Investigation of the capacity of the white house sidewalk for orderly demonstrations // Highway Res. Rec. 355. – c. 1625.
95. Terzopoulos D. Artificial Fishes: Autonomous Locomotion, Perception, Behavior, and Learning in a Simulated Physical World / Terzopoulos D., Tu X., Grzeszczuk R. // Artificial Life. – 1994. – V.1. №4. – c. 327–351.
96. Thallmann D. Virtual humans behavior: individuals, groups and crowds / Thallmann D., Musse S.R., Kallmann M. // Proceedings of digital media futures. – 1999. – c. 13-15.
97. Toshiyuki A. Prediction systems of passenger flow // Smith&Dickie, 1993. – c. 249-58.
98. Treuille, A. Continuum crowds / Treuille, A., Cooper, S., Popović, Z. // In ACM SIGGRAPH 2006 Papers. SIGGRAPH '06. –New York: ACM, 2006. – c. 1160-1168.

99. Trygve M. H. Reenskaug/MVC // XEROX PARC. – 1978-79.
100. Varas A. Cellular automata model for evacuation process with obstacles / Varas A, Cornejo MD, Mainemer D, Toledo B, Rogan J, Munoz V. // Physica A 382. – 2007. – c. 631-642.
101. Zhao D.L. Exit dynamics of occupant evacuation in an emergency / Zhao D.L, Yang L.Z, Li J. // Physica A 363. – 2006. – c. 501-512.

Приложение А

Структура файла обмена данными

Файл обмена данными между элементами представленного в данной работе ПО представляет собой XML-документ с простейшей древовидной структурой. Структурная схема содержимого подобного файла представлена на рисунке 5.1.

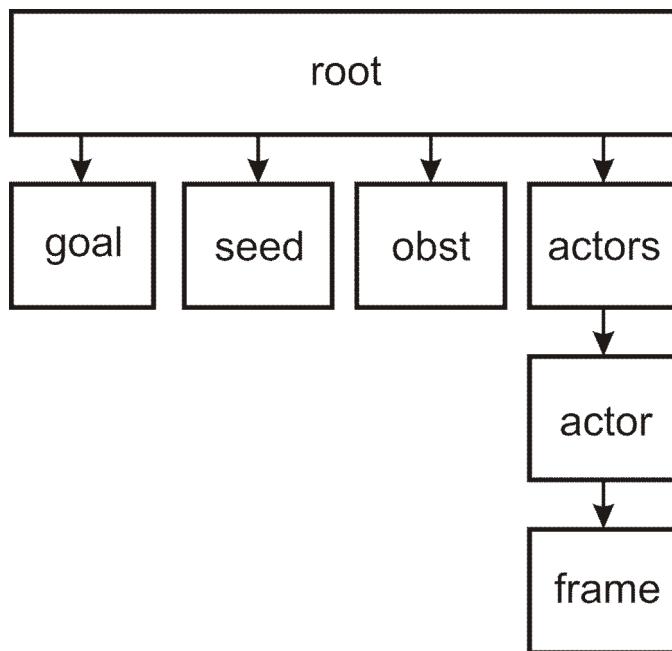


Рис. 5.1. Структурная схема файла обмена данными

В данном файле содержится информация, описывающая исходный ландшафт, препятствия, область изначального расположения участников толпы, цель движения, а также координаты положения каждого участника толпы в определенный момент времени.

Для каждого участника толпы на каждый квант времени создается отдельный xml-узел **frame** с текущими его координатами.

Причиной выбора формата XML для хранения данных послужила его стандартизированность и наличие множества библиотек для его чтения и записи. В разработанном в данной работе ПО используется библиотека QtXML, входящая в фреймворк Qt.

Пример данного файла показан на рисунке 5.2.

```

- <root>
  - <goal>
    <point x="0.9" y="0.2" />
  </goal>
  - <seedarea type="square">
    <point x="0.01" y="0.5" />
    <point x="0.51" y="1" />
  </seedarea>
  - <obstacles>
    - <obstacle>
      <point x="0.5" y="0.5" />
      <point x="0.6" y="0.5" />
      <point x="0.6" y="0.6" />
      <point x="0.5" y="0.6" />
    </obstacle>
  </obstacles>
  - <actors>
    - <actor>
      - <frame>
        - <position>
          <point x="0.48" y="0.74" />
        </position>
      </frame>
      - <frame>
        - <position>
          <point x="0.49" y="0.75" />
        </position>
      </frame>
    </actor>
  </actors>
</root>

```

Рис. 5.2. Пример файла обмена данными

В данном примере рассматривается файл обмена данными, в котором содержится следующая информация:

1. Цель движения единственного агента – точка с координатами (0.9, 0.2).
2. Изначально агент был создан в рамках прямоугольной области с координатами верхней левой точки (0.01, 0.5) и нижней правой (0.51, 1)
3. Существует единственное препятствие, описанное многоугольником, составленных из точек (0.5, 0.5), (0.6, 0.5), (0.6, 0.6), (0.5, 0.6).
4. Движение единственного участника толпы описано двумя фреймами движения с точками (0.48, 0.74) и (0.49, 0.75).

Приложение Б

Результаты эксперимента №1 по обучению предложенной модели поведения толпы.

В данном эксперименте использовался набор статистических данных о поведении реальной толпы, предложенный в работе Предтеченского [31]. Эти данные представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Распределение скоростей в толпе

Скорость, м./мин.	Линейная плотность, чел./м.								
	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9
140-130	6								
130-120	14								
120-110	19								
110-100	22	3							
100-90	28	11							
90-80	36	16							
80-70	50	24	2						
70-60	64	32	4						
60-50	134	53	13	1					
50-40	194	65	19	3					
40-30	152	124	56	22	11	4			
30-20	72	146	135	98	53	25	4		
20-10	34	92	78	104	71	54	57	51	14
10-0	9	18	31	29	30	16	5	6	21

В данной таблице содержится информация о проведенных в работе [13] измерениях скорости в толпе для различных значений плотности толпы. На основе накопленных данных можно восстановить примерную форму распределения скоростей участников толпы.

Приложение В

Результаты эксперимента №2 по обучению предложенной модели поведения толпы

В данном эксперименте использовался набор статистических данных о поведении реальной толпы в экстремальных условиях при прохождении через дверь, предложенный в работе Предтеченского [31].

В процессе эксперимента для каждого заданного значения плотности из тестовых данных рассчитывалась средняя скорость движения участника толпы в области дверного проема и вычислялась среднеквадратичная ошибка. Результаты эксперимента представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Средняя скорость в экстремальных условиях

Плотность	Скорость, м./мин.				Ошибка модели		
	Реальн.	Гибрид.	Трюи	Рейнолдс	Гибрид.	Трюи	Рейнолдс
0,02	90	95	84	79	5	6	11
0,10	72	66	63	61	36	81	121
0,20	53	49	45	42	16	64	121
0,30	37	38	37	33	1	0	16
0,40	29	32	30	24	9	1	25
0,50	24	26	28	20	4	16	16
0,60	21	23	26	18	4	25	9
0,70	18	19	23	15	1	25	9
0,80	14	15	20	11	1	36	9
0,90	11	11	16	8	0	25	9
1,00	9	8	14	6	1	25	9
					7,090909	27,63636	32,27273

Приложение Г.

Результаты натурного эксперимента по сравнению различных моделей поведения толп с реальными данными.

Таблица 5.3. Время эвакуации для дверного проема 0.5 м

	Реальн.	Гибрид.	Рейнолдс	Трюи
	38	38,56471975	44,66217301	45,3815674
	36	33,21024895	44,74718602	47,48302778
	39	37,83594874	45,86619895	44,08364552
	41	36,75095021	43,96060546	45,40354527
	41	36,21813347	43,42208551	49,50099962
	42	37,76151389	47,12266557	46,58938846
	34	30,48220909	51,34732912	47,06662741
	38	40,56573674	46,5842992	45,0603327
	41	37,12329043	46,07042203	43,70208536
	36	36,09831136	43,39124566	45,84161362
	37	37,97764292	48,03405242	47,15406802
	35	35,65435839	44,52573509	44,61575469
	35	38,41854681	45,3995165	48,02930727
	36	37,83723274	46,39524547	44,92127165
	37	36,03019489	47,83721194	47,07546121
	34	35,61575364	45,59836969	46,52651347
	37	36,29982512	46,86721428	48,43651565
	38	42,17143699	48,10981833	45,61935581
	39	33,01925452	46,84384864	45,84730831
	38	37,71857267	43,92034067	49,14468524
	38	42,23095505	47,36500063	50,69167625
	38	40,11292789	44,85743997	47,24996012
	42	34,64914415	44,05496258	45,4111838
	38	34,95583427	46,14820333	46,32698612
	38	34,57752462	48,43035232	47,22806676
	37	38,88098398	47,92724458	46,38847063
	43	38,62768666	45,79574096	44,67930982
	40	36,01135835	45,91614733	46,54964034
	44	34,91526116	46,35677245	47,63159271
	37	36,27108584	49,48223752	46,57287185
	42	40,77684156	45,00985016	47,92849721
	35	36,28408848	46,84534132	44,2976088
	40	34,48754963	44,83355162	47,86277288
	41	38,23550031	44,51191832	46,95950692
	43	30,7798807	48,25494292	46,97493892
Среднее	38,51428571	36,77572868	46,18557913	46,57817593
Стандартное отклонение	2,693908472	2,716694102	1,797376223	1,56693558
Уровень надежности(95,0%)	0,925389938	0,933217075	0,617420335	0,538261204

Таблица 5.4. Время эвакуации для дверного проема 0,7 м

	Реальн.	Гибрид.	Рейнолдс	Трюи
	35	32,40069402	37,43873034	38,75438073
	35	34,97269228	33,83138821	35,94137521
	34	32,49395488	38,99968814	40,26014453
	35	32,90886272	38,37742665	37,39629065
	33	37,46376626	40,43988937	39,05189761
	34	32,25052462	41,38149924	41,14848339
	34	35,61618962	39,38598254	40,43174313
	32	35,50397107	40,37969196	41,19834105
	34	32,45264617	39,13427926	33,86456613
	33	30,40878875	38,4848424	33,50448481
	34	31,16408608	37,42403541	36,43610028
	35	33,28567074	38,01968373	37,05479933
	33	30,55021354	41,59139823	41,14524643
	33	31,57587727	39,00429314	38,1433794
	34	27,46084085	40,75815249	37,76362732
	36	32,22914076	41,67364292	41,19502463
	32	30,8152996	33,98919008	37,86869607
	33	33,3385806	40,81765573	37,22318482
	33	29,9108213	37,79586708	36,75267602
	35	32,02597401	42,05036313	36,75047743
	33	30,62757189	37,72557485	35,78209135
	34	31,4834275	37,87909926	36,9184179
	33	28,6127268	41,50023684	37,73810249
	33	31,3882678	44,08186188	36,54564833
	35	30,54332285	37,2040856	39,457699
	33	31,85640946	36,44455896	37,38323686
	35	37,07656308	39,75346587	35,78394029
	33	31,10053514	36,29332238	37,25215852
	33	31,02575903	39,88317334	39,09228809
	32	32,91299856	39,17168632	41,39179046
	36	32,20856799	39,41087251	43,3930952
	34	29,55216934	37,05769356	37,6174211
	33	31,68858058	38,84043437	41,92007185
	33	33,6828931	40,62877744	42,23582112
	34	33,63366033	38,26977624	40,79370518
	Реальн	Гибрид	Рейнолдс	Трюи
Среднее	33,74285714	32,17777282	39,00349484	38,43401162
Стандартное отклонение	1,066684174	2,141716502	2,167644668	2,39304155
Уровень надежности(95,0%)	0,366418834	0,735705359	0,744611996	0,822038534

Таблица 5.5. Время эвакуации для дверного проема 1,4 м

	Реальн.	Гибрид.	Рейнолдс	Трюи
	21	20,58685834	23,6516486	17,94824226
	16	23,35973318	23,41584741	20,58542172
	22	19,68852712	23,5610557	19,2276789
	17	22,51304705	22,10179542	24,89692939
	20	19,3232479	19,26105056	21,04166241
	18	20,57166921	22,08364704	24,73793744
	18	19,53016249	21,3229529	20,48545924
	17	20,33758233	19,56407682	24,89884843
	20	22,97447122	23,23918407	19,27738428
	16	20,43298378	16,72858335	20,99737111
	13	23,14446943	21,46141208	19,21799738
	16	20,57691472	25,9089692	22,79220027
	20	20,94875424	22,55945797	20,4426456
	15	20,03488771	15,55384979	20,72169711
	16	22,35666227	25,50543787	20,47828686
	17	20,42230858	27,79216511	19,31165102
	18	21,45283657	18,74292534	20,72069681
	19	21,70575511	22,24511225	21,94142061
	20	21,27222456	23,6314465	19,12257102
	14	20,18167675	25,16643408	22,37137054
	18	20,83548293	21,1197161	19,48419375
	17	22,05160581	20,25596037	21,75542305
	18	21,037534	18,9181947	24,02726165
	22	22,64834234	18,08956786	22,22538484
	21	21,00073357	22,32953864	19,78060772
	15	19,20817408	20,87072262	23,52238304
	19	22,70070536	19,50370993	19,71029912
	24	20,85442714	20,60527536	21,47701922
	19	22,98005097	21,47988767	21,35490151
	17	17,81481228	24,14220808	18,07716295
	17	23,88182861	23,5489089	20,36492953
	19	22,15868688	19,13022902	17,06853797
	21	23,68601895	20,75746952	20,22769222
	15	21,48126737	17,21534928	20,01280361
	18	19,03308044	20,03145469	16,25323645
	Реальн	Гибрид	Рейнолдс	Трюи
Среднее	18,08571429	21,22250067	21,47129271	20,7588374
Стандартное отклонение	2,453945545	1,45690044	2,707412138	2,074761777
Уровень надежности(95,0%)	0,842959788	0,500462811	0,930028609	0,712705606