

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КРАСНОЯРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» (ФИЦ КНЦ СО РАН)

ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК –
ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ФИЦ КНЦ СО РАН (ИВМ СО РАН)

На правах рукописи



Витова Татьяна Брониславовна

**ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ**

Специальность 05.13.18 — математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
к. ф-м. н. Кирик Екатерина Сергеевна

Красноярск — 2017

Содержание

Введение	4
1 Современное состояние проблем, связанных с моделированием движения людей	13
1.1 Сведения о движении людей	13
1.2 Классификация моделей движения людей и примеры	19
1.3 Клеточно-автоматные модели движения людей	24
1.4 Верификация и валидация	31
1.5 Выводы	32
2 Клеточно-автоматная стохастическая модель движения людей	36
2.1 Предварительные сведения из теории клеточных автоматов	36
2.2 Постановка задачи	38
2.3 Правила переходов	40
2.4 Переходные вероятности	48
2.5 Параметры модели	54
2.6 Статическое поле	55
2.7 Выводы	59
3 Результаты исследования модели на тестовых задачах	61
3.1 Предварительные замечания	61
3.2 Программный комплекс	64
3.3 Квадратная комната. Исследование влияния параметров k_S , k_P и r	77

3.4	Сравнение стратегий «кратчайшего пути» и «быстрого пути»	82
3.5	Пересечение потоков	93
3.6	Слияние потоков	97
3.7	Растекание потока	103
3.8	Модельная задача	104
3.9	Выводы	106
4	Построение фундаментальных диаграмм. Сравнение с данными натуральных экспериментов	108
4.1	Построение фундаментальных диаграмм	108
4.1.1	Прямые участки пути	109
4.1.2	Участки пути движения с поворотами	113
4.1.3	Сужения	117
4.2	Уточнение скорости движения. Сравнение с данными натуральных экспериментов	123
4.3	Малый концертный зал и Камерный зал Красноярской краевой филармонии	129
4.4	Выводы	136
	Заключение	138
	Список литературы	140
	Приложение А. Результаты численных исследований на тестовых задачах	154
	Приложение В. Копии документов о внедрении результатов диссертационной работы	169

Введение

Актуальность работы. Задача моделирования движения людей возникла в связи с проблемами обеспечения безопасной эвакуации из зданий и сооружений. В настоящее время область применения таких моделей расширяется. Они служат для анализа процесса эвакуации из существующих и строящихся зданий и сооружений (расчёт времени эвакуации, выявление участков повышенной плотности, определение наилучшей геометрии пространства, разработка планов эвакуации, обучение персонала эффективной (безопасной) стратегии эвакуации и т. п.) и для организации движения (маршрутизации) движения людских потоков в местах массового скопления людей (стадионы, аэропорты, вокзалы, метрополитены, торговые центры, учебные заведения, офисные здания и т.д.) и при проведении больших спортивных, религиозных, культурных и других мероприятий.

Под движением людей понимается направленное движение людей в зданиях или на местности (эвакуация из зданий или сооружений, движение людей в общественных местах).

Для решения практических задач модели движения людей реализуются программно. Программные продукты могут решать задачи только пешеходного движения (исследование работы вокзалов, аэропортов, торговых комплексов и т.д. (AnyLogic, INCONTROL, СИГМА ПБ)) либо содержать подпрограммы, моделирующие развитие чрезвычайных ситуаций (пожар), и, соответственно, решать задачи моделирования эвакуации при чрезвычайных ситуациях (ASERI (V. Shneider), buildingEXODUS (J. Parke, S. Gwynne, E. R. Galea, P. Lawrence), СИГМА ПБ (Е.С. Кирик, А.А. Дектерев и др.), FDS+EVAC (T. Korhonen, S. Hostikka)).

Первые модели были поточными: рассматривалось не индивидуальное движение человека, а перемещение всей массы (Предтеченский В. М., Миллинский А. И. (1979), Холщевников В. В., L. F. Henderson (1971), D. Helbing (1992), R. L. Hugles (2000)).

В последние десятилетия наибольший интерес представляют имитационные модели, где рассматривается движение каждого человека и которые позволяют визуализировать движение каждого человека. В этой области наиболее популярными являются два подхода.

Модель социальных сил (Social Force model), предложенная D. Helbing, P. Molnar, I. Farcas, T. Vicsek, основана на том, что движение людей описывается при помощи системы N (количество людей) дифференциальных уравнений. Движение отдельного человека подчинено второму закону Ньютона со сложной правой частью, учитывающей силы взаимодействия человека с другими людьми и с препятствиями. Привлекательность этого подхода состоит в том, что описывается движение каждого отдельного человека с заданными индивидуальными характеристиками в непрерывном пространстве. Но с другой стороны необходимо решать N дифференциальных уравнений и корректно определять силы.

Другой подход, основанный на клеточных автоматах, способствует более быстрому компьютерному вычислению и предпочтителен при моделировании больших групп людей (более тысячи человек), когда требуется индивидуальное представление каждого человека, участвующего в движении (V. J. Blue, J. L. Adler, M. Fukui, Y. Ishibashi, Г. Г. Малинецкий, М. Е. Степанцов, К. Nishinari, J. Was, A. Kirchner, A. Schadschneider, M. Schreckenberg, S. Bandini и др.).

В начале двухтысячных на основе вероятностного клеточного автомата появилась Floor Field (FF) модель (C. Burstedde, K. Klauck, A. Schadschneider, J. Zittartz, К. Nishinari, A. Kirchner, A. Namazi и др.). В её основе лежит использование поля расстояний до выхода для моделирования движущей силы, что явилось существенным улучшением над другими моделями и поз-

волило легко воспроизводить направленное движение людей. Используется экспоненциальная форма расчёта переходных вероятностей.

Движение людей — случайный процесс. Траектория одного и того же человека при прохождении одинакового маршрута каждый раз будет (хоть немного) отличаться от предыдущих. Поэтому введение в модель элементов случайности «покрывает» проблему «прямого» математического описания случайных (в том числе непредсказуемых) действий людей.

Поле расстояний является главной движущей силой для людей в модели, т.е. люди стремятся идти к выходу кратчайшим путём. В результате преобладающим образом реализуется стратегия кратчайшего пути. В простых геометриях пространства (прямой коридор, комната без дополнительных препятствий) и при малых плотностях людей в области моделирования динамика движения может моделироваться адекватно. Но при наличии поворотов на пути к выходу преобладание этой стратегии приведёт к нереалистичным заторам на поворотах и к неадекватной оценке как самой динамики движения, так и времени эвакуации.

В клеточно-автоматных моделях, люди всегда перемещаются на новую позицию при наличии свободной соседней ячейки, что может приводить к дополнительным метаниям.

В оригинальной FF модели существуют ограничения на линейные размеры расчётной области из-за способа учёта поля расстояний.

Развитие FF модели с целью более точного и полного воспроизведения свойств и особенностей движения человека является фокусом исследований настоящей работы.

В настоящее время не сложилось единой базы тестовых задач для валидации и верификации моделей движения людей. Тестирование некоторых коммерческих программных продуктов, реализующих модели движения людей, показали, что не всегда модели удовлетворяют данным натурального эксперимента даже на простых геометриях пространства (С. Rogsch). Поэтому разработка тестовых задач и тестирование моделей в различных

пространственных ситуациях является важной задачей.

Кроме этого, так как время и пространство в FF модели дискретны, для практического применения модели и для сравнения модельных результатов с натурными данными необходимо определить время дискретного шага. Обычно, оно определяется по известной формуле как отношение длины пути к скорости движения. И, если длина пути известна заранее, то определение скорости движения остаётся открытым вопросом.

Цель исследований: совершенствование клеточно-автоматной стохастической модели движения людей для моделирования движения людей в зданиях и сооружениях различной геометрии.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи:**

- 1) выделены основные свойства движения людей (индивидуальные и групповые);
- 2) проведён анализ существующих моделей движения людей;
- 3) модифицирована клеточно-автоматная стохастическая модель движения людей: вероятности и правила переходов. Формализованы следующие свойства движения людей: стратегия «кратчайшего пути», стратегия «быстрого пути», взаимодействие с препятствиями, стратегия «терпеливого человека»;
- 4) разработаны и программно реализованы алгоритмы численной реализации модели;
- 5) разработан набор тестовых задач для валидации модели;
- 6) проведены качественные и количественные исследования модели;
- 7) проведено уточнение скорости движения для перевода дискретного времени в естественные единицы измерения и проведены сравнения с данными натуральных экспериментов.

Объект исследования — процесс движения людей-пешеходов.

Предмет исследования — моделирование движения людей на основе клеточных автоматов (задачи определения переходных вероятностей и правил переходов клеточного автомата для моделирования движения людей,

валидации модели, перевода дискретного времени в естественные единицы измерения).

Методы исследований. В работе используются методы клеточных автоматов, теории вероятностей и математической статистики, вычислительный эксперимент, включающий в себя следующие этапы: математическая формулировка задачи, построение численного алгоритма решения, программная реализация алгоритма, проведение расчетов, анализ полученных результатов.

Научная новизна:

- 1) разработана клеточно-автоматная стохастическая модель движения людей, отличающаяся от известных тем, что введены и формализованы понятия стратегии «терпеливого человека», стратегии «кратчайшего пути» и стратегии «быстрого пути», что позволило улучшить качество воспроизведения движения людей;
- 2) предложено уточнение скорости движения для перевода дискретного времени в естественные единицы измерения в клеточно-автоматных моделях движения людей: используется не фиксированное значение скорости движения, а зависимость скорости от плотности людей в области. Такое уточнение позволяет оценивать время движения ближе к данным натурального эксперимента;
- 3) предложен набор новых тестовых задач для исследования модели: растекание потока, построение фундаментальных диаграмм не только на прямых участках пути и в сужениях, но и при наличии на пути движения поворотов, что позволяет адекватно оценивать возможности модели;
- 4) предложен новый способ учёта поля расстояний, снимающий ограничение на линейные размеры расчётной области в сравнении с аналогичными моделями.

На защиту выносятся результаты, соответствующие четырём пунктам паспорта специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование,

численные методы и комплексы программ» по техническим наукам.

Пункт 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.

1. Формула переходных вероятностей, учитывающая взаимодействие с другими частицами (плотность частиц в направлении) и с препятствиями и позволяющая осуществлять стратегии «кратчайшего пути» и «быстрого пути».
2. Правила переходов, позволяющие осуществлять стратегию «терпеливого человека».
3. Формализация правил переходов.

Пункт 4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

4. Способ учёта поля расстояний, снимающий ограничение на линейные размеры расчётной области.
5. Программный комплекс, реализующий численные алгоритмы разработанной модели.

Пункт 6. Разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента.

6. Тестовые задачи для исследования модели (растекание потока, построение фундаментальных диаграмм при наличии поворотов).
7. Уточнение скорости движения для перевода дискретного времени в естественные единицы измерения, на основе которого были проведены сравнения с данными натуральных экспериментов.

Пункт 8. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

8. Программный комплекс, реализующий численные алгоритмы разработанной модели, предназначенный для проведения исследований модели и визуализации движения частиц.

Достоверность результатов подтверждается решением большого количества тестовых задач. Результаты имитационного моделирования движения людей с помощью разработанного комплекса программ согласуются с данными соответствующих натуральных экспериментов (из литературных источников), с результатами других авторов по данной тематике.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии дискретного стохастического подхода, основанного на методах клеточных автоматов, в задаче моделирования движения людей. Нововведения (стратегии движения, способы учета плотности других людей, близость стен, поля S) позволяют улучшить качество воспроизведения движения людей в модели и расширить область её применения. Предложенный способ уточнения скорости движения для перевода дискретного времени в естественные единицы измерения позволяет точнее (ближе к данным натурального эксперимента) оценивать время движения.

Практическая значимость. Результаты работы использовались при создании дискретно-непрерывной модели движения людей (модель Sigma-Eva). Разработанная модель может быть использована для исследования процесса движения людей, когда не требуется точное воспроизведение пространства (массовые мероприятия), для демонстрации процесса движения людей в различных зданиях и сооружениях в качестве одного из способов обучения правилам эвакуации из различных зданий (школ, офисных зданий и т.д.).

Значимость работы подтверждается актами внедрения. Результаты работы использовались при выполнении ГК № 09.0708.11.014 «Разработка модели информационно-управляющей системы принятия решений при возникновении угроз пожарной безопасности на объектах сферы науки и образования на основе оценки рисков и моделирования последствий воздействия опасных факторов в условиях дефицита времени и пространства» от 19.03.2010 г. в рамках ФЦП «Пожарная безопасность в Российской Федерации на период до 2012 года»; в ФГБУ ВНИИПО МЧС России при раз-

работке рекомендаций по организации поэтапной эвакуации из высотных и многофункциональных зданий с применением вариативного компьютерного моделирования различных сценариев эвакуации.

Личный вклад автора состоит в ключевой роли на всех этапах исследования: совершенствование клеточно-автоматной стохастической модели движения людей и способа уточнения скорости для перевода дискретного времени в естественные единицы измерения; разработка программы, реализующей модель (блок модели и численные исследования); разработка тестовых примеров для тестирования модели. Непосредственно автором были проведены численные исследования модели с последующей обработкой и интерпретацией полученных результатов.

Апробация. Результаты работы были представлены на следующих научных конференциях:

1. VIII и XVI Всероссийские конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям (г. Новосибирск, 2007 г.; г. Красноярск, 2015 г.).
2. V, VI, VIII и IX Всесибирский конгресс женщин – математиков (г. Красноярск, 2008 г., 2010 г., 2014 г., 2016 г.).
3. XIV и XVI Всероссийский семинар «Моделирование неравновесных систем» (ИВМ СО РАН, г. Красноярск, 2011 г. и 2013 г.).
4. Конференции молодых ученых Института вычислительного моделирования СО РАН (г. Красноярск, 2010 г., 2011 г. и 2016 г.).
5. Конференции молодых ученых Красноярского научного центра СО РАН (г. Красноярск, 2011 г. и 2016 г.).
6. XII Международный симпозиум по непараметрическим методам в кибернетике и системному анализу (г. Красноярск, 2010 г.).
7. Международная конференция по финансово-актуарной математике и эвентоконвергенции технологий (г. Красноярск, 2011 г.).
8. The Summer Computer Simulation Conference (США, г. Сан-Диего, 2007 г.).
9. European Conference on Complex System (Германия, г. Дрезден, 2007 г.).

10. Pedestrian and evacuation dynamics (Германия, г. Вупперталь, 2008 г.; США, г. Гайзерсбург, 2010 г.).
11. Рабочий семинар «On Complex Collective Systems» (Польша, г. Вроцлав, 2009 г.).
12. Рабочий семинар «Crowds and cellular automata» (Италия, г. Асколи-Пичено, 2010 г.; Греция, Санторини, 2012 г.; Польша, г. Краков, 2014 г.).

Развёрнутые доклады по результатам диссертационной работы представлялись на различных научных семинарах институтов Сибирского Отделения РАН.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 печатные работы [121] - [144], из них 8 — в изданиях, рекомендованных ВАК, 5 — в других рецензируемых изданиях, 11 — в трудах и тезисах международных и всероссийских конференций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 144 наименований и двух приложений. Полный объём работы составляет 171 страницу, включая 95 рисунков и 5 таблиц.

Глава 1

Современное состояние проблем, связанных с моделированием движения людей

1.1 Сведения о движении людей

Данные о движении людей можно получить из личного ежедневного опыта и в ходе специальных экспериментов и наблюдений. В экспериментальном и теоретическом исследовании движения людских потоков стоит особо отметить вклад российских исследователей [1] - [3]. Эти работы позволили раскрыть многие закономерности, которым подчиняется сложный процесс движения людей. Результатами их экспериментов пользуются во всем мире. Данные зарубежных исследователей представлены в работах [4] - [17].

Движение людей разделяют на массовое и одиночное (при малых плотностях, например, в квартирах или офисных кабинетах); согласованное (одинаковый ритм, равная длина шага и скорость) и несогласованное (каждый участник движения имеет индивидуальные характеристики, переменная скорость); беспорядочное (например, на рыночных площадях) и поточное (движение, сохраняющееся длительное время); свободное, комфортное (незначительная скорость при незначительных плотностях) и стесненное (плотность потока ограничивает свободу движения); длительное (постепенно начинается и постепенно заканчивается) и кратковременное (при эвакуа-

ации); нормальное (движение, протекающее в обычных условиях при выполнении людьми обычных функций) и аварийное или вынужденное (при чрезвычайных ситуациях) [2].

На движение человека влияют как физические факторы, так и психические, социальные.

Решив начать движение, человек намечает свой маршрут, то есть ту последовательность участков пути, которую ему предстоит пройти для того, чтобы попасть с места его нахождения в то место, куда он наметил придти. Прогнозирование выбора маршрута пути является сложной и не в полной мере разрешимой задачей.

Данная работа посвящена именно моделированию движения людей к заданным целям. Свойства движения людей должны учитываться по ходу движения, поэтому остановимся на них подробнее. Рассмотрим отдельно свойства при индивидуальном движении и массовом.

«Пространство, необходимое для движения можно условно разделить на две зоны: зона движения и зона восприятия. Зона движения — это зона, необходимая для выполнения шага. Зона восприятия — информационное пространство, необходимое для движения. Пешеход с помощью органов зрения отслеживает скорости и траектории движения окружающих людей, оценивает расстояния до объектов и предметов и корректирует скорость своего движения для избежания столкновений и выполнения маневров» [1].

У каждого человека есть зона комфорта. Чем выше плотность людей в помещении, тем она меньше [2]. В обычных условиях, когда жизни ничего не угрожает, люди стараются избегать излишнего контакта друг с другом и выбирают свои траектории таким образом, чтобы как можно меньше задевать соседей. Такое же отталкивание происходит и по отношению к стенам и другим препятствиям.

К психическим и социальным аспектам движения людей относятся «стадный инстинкт» (когда человек выбирает направление движения, основываясь на поведении других людей (все бегут туда же, «куда и все»)) и эффект

группы (люди могут составлять группы по разным принципам, например, члены одной семьи, компании).

При свободном движении люди передвигаются с индивидуальной скоростью. Эта скорость имеет нормальное распределение со средним значением 1,34 м/с и средним квадратичным отклонением 0,26 м/с [4]. В [2] средняя скорость движения составляет 1,6 м/с. В общем случае скорость движения зависит от плотности потока, в котором происходит движение. Скорость — случайная величина [1], [2].

Траектория человека в потоке напоминает ломанную линию. При свободном движении человек двигается прямолинейно по кратчайшему пути к цели следования. При наличии альтернативных путей для достижения цели, человек выбирает тот, по которому он сможет как можно дальше двигаться прямо, никуда не сворачивая. При условии, что альтернатива не является более привлекательной из-за меньших задержек в пути, лучшей освещенности, большей безопасности, меньшего шума и т. д. В случае, если на пути встречаются стоящие или передвигающиеся с небольшой скоростью люди, человек не всегда меняет направление движения, а остается на некоторое время на прежнем месте и ждёт, пока путь освободится.

Динамика движения людей зависит от вида пути, т.е. геометрии пространства, и вида движения. Различают следующие виды пути [1], [2]: прямой путь, сужения (проёмы), повороты, лестницы. Виды движения людских потоков: слияние, разделение, пересечение (встречное движение).

Часто можно наблюдать образование скопления людей (пробку, давку) и задержку движения, что обычно происходит на границе смежных участков пути: в дверных проемах, при сужении прохода («бутылочное горлышко»). Скопления возникают в тех случаях, когда приток людей превышает вместимость пространства или при наличии на пути непреодолимого препятствия (например, колонна или человек, который не движется или движется, но с меньшей скоростью).

Люди, подходя к более узкому участку пути, заранее корректируют на-

правление своего движения к центру. В результате появляются образования людей в виде арок и создается «эффект ложного проема» (уменьшение действительной ширины проема) [2].

При повороте структура людского потока изменяется, происходит перераспределение параметров движения и деформация траекторий, по которым перемещаются люди. Каждый человек, достигнув угла, поворачивает не сразу, а плавно огибает угол по кривой, близкой к окружности. При этом, несмотря на различную длину пути, время движения примерно одинаково за счёт разных скоростей движения вокруг поворота. Пропускная способность пути также заметно не изменяется [2]. Тем не менее, повороты отрицательно сказываются на режиме процесса движения, особенно в аварийных условиях.

При пересечении путей следования происходит расчленение или слияние людских потоков. Одновременный подход головных частей потоков к месту слияния на практике встречается редко. Как правило, люди выходят из боковых в общий проход без слияния, либо вклиниваясь в поток идущих людей [1].

Если имеется несколько источников людских потоков и несколько мест их притяжения, возникает пересечение людских потоков. Частным случаем являются противотоки (встречное движение). В этих ситуациях часто возникают фрикционные явления, когда два или более человека «претендуют» на одно место.

При движении людских потоков весьма вероятны случаи, когда объединенный поток имеет несколько частей с различной плотностью. Переформирование людского потока — процесс выравнивания параметров движения в различных частях потока. В результате, вне зависимости от исходных параметров, каждая часть потока приобретает параметры впереди идущей части. Растекание есть частный случай переформирования людских потоков, происходящее тогда, когда головная часть потока, имея впереди свободный путь, увеличивает скорость движения до величины, соответствующей

ющей условиям свободного движения [1], [2]. «... для аварийных условий необходимо обязательно учитывать так называемое растекание потока и, следовательно, постепенное изменение его плотности» [2].

Множество людей, одновременно идущих по общим путям в одном направлении, образует людские потоки. Людской поток характеризуется следующими параметрами:

- количество людей в потоке N ;
- плотность ρ ;
- скорость V ;
- величина потока J .

Плотность потока ρ определяется двумя способами:

$$\rho = \frac{N}{b l} [1/\text{м}^2], \quad \rho = \frac{N f}{b l} [\text{м}^2/\text{м}^2].$$

В первом случае, ρ определяется как отношение количества людей в потоке N к площади занимаемого им участка, имеющего ширину b (для простоты вычислений ширину потока принимают равной ширине участка) и длину l (общемировая практика [18]). Во втором случае предполагается, что свободное пространство в потоке зависит не только от количества человек, но и от площади, занимаемой каждым из них [19] (отечественная практика). Поэтому в расчёт ρ вводится площадь, которую занимает человек, т.е. его горизонтальная проекция f . Величина проекции f может изменяться в зависимости от возраста, комплекции, одежды человека [2].

Плотность потока определяет свободу движений людей в нём, и, как следствие, соответствующий уровень комфортности. Изменения плотности оказывают сильнейшее влияние на характер движения людей в потоке, меняя его от свободного, при котором человек может выбирать скорость и направление своего движения, до стесненного в результате дальнейшего увеличения плотности потока, при котором он испытывает все возрастающие силовые воздействия окружающих его людей.

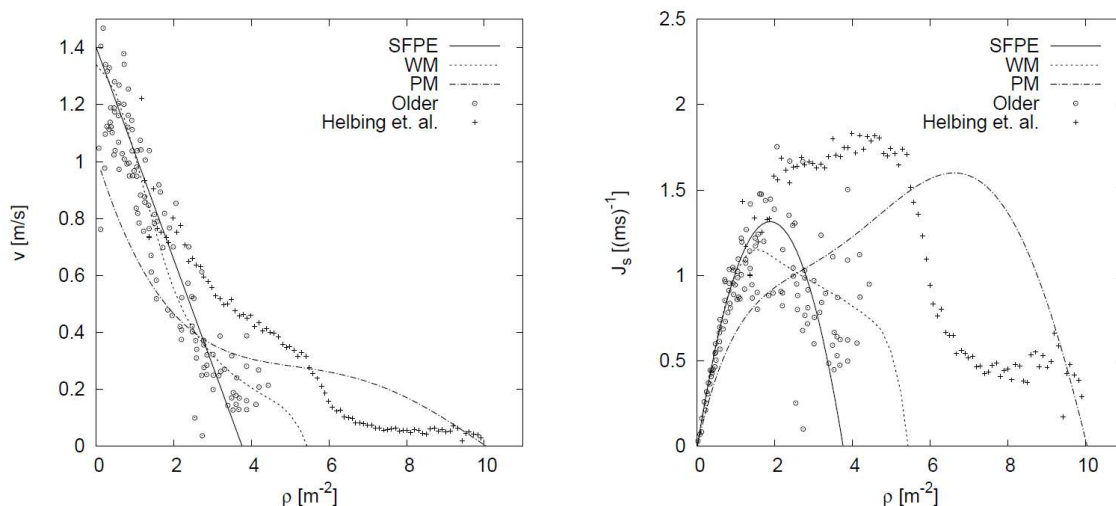


Рисунок 1.1 – Фундаментальные диаграммы для различных данных натурального эксперимента [18]

Величина потока — это количество человек, пересекающих фиксированную область за единицу времени. Поток J [1/с] через область шириной b определяется с помощью средней плотности ρ и средней скорости V потока людей:

$$J = \rho V b = J_s b, \quad (1.1)$$

где $J_s = \rho V$ [1/(с·м)] — поток за единицу ширины, называемый удельным потоком или интенсивностью движения [2], [18].

Основной зависимостью, определяющей динамику людского потока, является зависимость между скоростью его движения и плотностью. Факт общей качественной зависимости скорости от плотности общеизвестен: при увеличении плотности скорость снижается. Другим видом зависимости, определяющей динамику людского потока, является зависимость величины потока от плотности. Данные зависимости были названы *фундаментальными диаграммами* (ФД), [18].

ФД, полученные разными учеными в разных странах, отличаются друг от друга, рисунок 1.1 (графики взяты из работы [18]). Происходит это в силу того, что движение человека обусловлено многими факторами, зависит от окружающей обстановки и психологического состояния. В [2] ФД различаются по категориям движения: комфортное, спокойное, активное и по-

вышенной активности. На сегодняшний день нет договоренности о едином виде ФД. Тем не менее, у всех ФД есть одно общее свойство: с ростом плотности поток растет и, достигнув максимума при определенном значении плотности, начинает убывать; скорость уменьшается с ростом плотности. Наличие максимума в функции, описывающей зависимость интенсивности движения от плотности людского потока, является критерием оценки приемлемости видов функций, предлагаемых для описания зависимости скорости от плотности. Отсутствие максимума означало бы неограниченность пропускной способности поперечного сечения пути [1].

Говоря о движении людей, нельзя не упомянуть о панике. Паника (от греч. *panikon* — безотчетный ужас) — это психологическое состояние, выраженное в чувстве острого страха, охватывающего людей и вызывающее неконтролируемое и неудержимое стремление быстрее уйти (убежать) из опасной ситуации. Заметим, что нужно различать поведение в аварийной ситуации и паническое поведение, которое не всегда связано с реальной опасностью [1]. Во многих ситуациях, где в большой толпе гибнут люди, нет паники. Доступное пространство является недостаточным для передвижения большого количества человек. В таких случаях правильнее будет говорить об опасности толпы. Выделяют также асоциальное поведение людей — поведение, возникающее в ситуациях, когда люди осознанно борются за свою жизнь, при этом страдают другие.

Данные сведения далеко не полные, а лишь отражают некоторые наиболее важные свойства движения людей.

1.2 Классификация моделей движения людей и примеры

В настоящее время существует достаточно большое количество моделей движения людей и предложены их различные классификации [18], [20] — [22].

Наиболее общая и часто используемая классификация предложена в работе [18]. Модели можно классифицировать по следующим характеристикам:

- *микроскопические* и *макроскопические* (или *индивидуальные* и *поточные* [21]). В первом случае каждый человек рассматривается отдельно от остальных. Такой подход позволяет назначать частицам индивидуальные характеристики. Например, такие, как масса, рост, возраст, пол, скорость, роль в процессе эвакуации, эвакуационный выход и т. д. Во втором случае рассматривается лишь движение массы людей с определенными однородными характеристиками (например, плотностью частиц и средней скоростью передвижения всей группы);
- *дискретные* и *непрерывные*. Характеризуется то, каким образом описываются время, пространство, скорость передвижения и т.д. в модели.
- *детерминированные* и *стохастические*. В детерминированных моделях в каждой определенной ситуации при всех прочих равных условиях модель предписывает одинаковые действия людям. Однако, движение людей по своей природе — случайный процесс. Даже один и тот же человек в одинаковых ситуациях может отклониться (пусть немного) от предыдущей траектории. Введением элементов случайности в модель сглаживается недостаток знаний о процессе принятия решений людьми во время движения, особенно в экстренных случаях. Использование стохастических моделей дает возможность воспроизводить и изучать не единственную реализацию эвакуации, а распределение с выделением наиболее популярных маршрутов, минимального, максимального и среднего времени эвакуации и т. п.

Необходимо отметить, что нельзя четко классифицировать модели по представленным характеристикам. Некоторые модели могут включать обе альтернативные характеристики.

В [21] выделяют также:

- *поведенческие* модели, которые учитывают не только движение частиц по направлению к цели (выходу), но и другую активность (могут включать различные способы принятия решений и действия, обусловленные условиями в зданиях);
- *частично поведенческие* модели, которые в первую очередь рассчитывают перемещение. Поведение имитируется посредством введения распределения времени задержки начала эвакуации, использования индивидуальных характеристик частиц, влияния задымления и т.д.;
- модели *движения*, перемещающие частиц от одной точки пространства к другой. Используются для демонстрации областей скопления частиц, формирования пробок в узких местах.

Первые модели движения людей были макроскопическими и описывали изменения плотности людей и их скорости во времени. Обычно макро модели — детерминированные и непрерывные. В макроскопическом подходе выделяются несколько направлений.

Модели на основе гидродинамики и молекулярно-кинетической теории: L.F. Henderson [23], D. Helbing [24], R.L. Hughes [25]. Самым проблемным местом этих моделей является невозможность корректного описания движения потока людей при малых плотностях [24], то есть в помещениях с развитой (сложной) внутренней инфраструктурой (например, лекционные и зрительные залы, учебные классы, торговые залы и т.п.).

Модели из отечественных норм определения расчётных величин пожарного риска [26], [27]: упрощённая аналитическая модель движения людского потока (приложение 2 [26]), имитационно-стохастическая модель движения людских потоков (приложение 4 [26]). Все пути эвакуации делятся на элементарные участки. Затем на каждом элементарном участке рассматривается однородный людской поток со своими характеристиками (плотность, скорость, интенсивность движения) и находится время движения по элементарному участку. Не учитываются такие свойства потока как растекание, переформирование, разуплотнение потока [28].

Также к макро моделям относятся поточная модель первого порядка [29] (основана на фундаментальной диаграмме); модель Bruno [30] (основана на уравнении сохранения массы, учитываются свойства движения людей, но направление движения назначается заранее); модель Colombo-Rosini [31] (основана на LWR модели дорожного трафика [32], [33], может применяться для моделирования панических ситуаций, но рассматривается только однонаправленное движение).

С развитием вычислительной техники наибольшую популярность приобрели микроскопические модели.

В [34], [35] была предложена Social-force модель, в которой взаимодействия между отдельными частицами осуществлялись посредством использования идеи социальной силы или социального поля [36]. Она относится к детерминированным непрерывным моделям. Применительно к динамике передвижения людей, социальная сила представляет влияние окружения (других людей, инфраструктуры) и изменяет скорость частицы (различают желаемую и действительную скорость). Эта сила ответственна за величину ускорения каждой частицы. Движение частиц происходит согласно уравнению 2-го закона Ньютона. Поскольку такое уравнение движения имеет место для каждой частицы, то на самом деле имеем дело с огромной системой связанных уравнений.

Модель социальных сил получила широкое распространение и остаётся одним из приоритетных направлений развития моделей движения людей [37] - [39].

Частным аналогом модели социальных сил является модель оптимальной скорости [40]. Здесь не учитываются физические взаимодействия людей, а только отклонение скорости от желаемой вследствие наличия других людей на пути, при этом влияние «впереди» стоящих людей выражено более сильно.

В [41] — модель на основе магнитных сил, где частицы и их цели рассматриваются как полюса противоположного знака.

К микро моделям относятся также и модели, на основе теории клеточных автоматов. Рассмотрим их отдельно в следующей главе.

На основе моделей движения людей разрабатываются программные продукты (в том числе и коммерческие). Набор возможностей и особенностей любой программы определяется в первую очередь базовой математической моделью, но и сама компьютерная программа может быть начинена определенным функционалом, полезным для пользователя, но не имеющим отношение непосредственно к расчету эвакуации и качеству результата. Выбор софта осуществляется на основе тех задач, которые предстоит решать пользователю. В работах [20], [21] отражено положение дел в сфере программных продуктов по расчету эвакуации, реализующих ту или иную математическую модель.

Такие программы используются для демонстрации областей скопления частиц, формирования очереди и пробок в узких местах в пределах рассматриваемого здания. Поведение моделируется с помощью задания определенных откликов отдельным индивидуумам или группе на окружающую обстановку. В программе может использоваться различное время задержки начала эвакуации, задаваться индивидуальные характеристики людей (скорость, плотность и т.д.), учитываться условия видимости, особенности выбора людьми маршрутов эвакуации, условия информированности, индивидуальные сценарии эвакуации (выполнение инструкций, задание ролей).

К сожалению, в большинстве случаев непосредственно математическая модель эвакуации является черным ящиком для пользователя, поскольку программный продукт является коммерческим. Проведенные исследования [42] подтверждают, что, не смотря на обширный полезный функционал программы, тестирование на простых примерах как прямой коридор, комната с одним выходом дает, например, слабую зависимость времени эвакуации от плотности потока (что противоречит свойствам фундаментальной диаграммы [2]). Частично такое положение дел есть следствие того, что в настоящий момент еще не сформировалась универсальная база тестов мо-

делей эвакуации. Разработчики моделей, как правило, на свое усмотрение тестируют модели, проверяя воспроизведение одних явлений, свойственных движению людей, и упуская другие.

Большинство программных продуктов имеют зарубежное происхождение. Рынок российских программных продуктов по расчету эвакуации не так уж велик и представлен продуктами компаний «СИТИС» (г. Екатеринбург) [43], [44], AnyLogic (г. Санкт-Петербург) [45] и разработкой Института вычислительного моделирования СО РАН (г. Красноярск) Сигма ПБ [46] - [48]. В последнем комплексе реализована полевая дискретно-непрерывная стохастическая модель движения людей [49], [50], которая основана на результатах данной работы.

1.3 Клеточно-автоматные модели движения людей

Клеточные автоматы (КА) являются дискретными динамическими системами [51], [52]. В таких моделях время и пространство дискретны, все величины принимают значения из конечного набора. Дискретность времени означает, что позиция частиц обновляется при четко определенных шагах. Пространство представляется равномерной сеткой, каждая ячейка которой содержит несколько битов данных. Обычно каждая ячейка в клеточном автомате (КА) может быть занята только одной частицей (*принцип исключения*). В каждый дискретный шаг времени частица может переместиться в одну из соседних ячеек. Соседями данной ячейки называются ячейки, расположенные рядом с ней. Набор соседей и их расположение относительно данной ячейки образуют окрестность. Например, в случае ортогональной двумерной сетки можно назвать соседями четыре ячейки, имеющие с данной общую сторону (окрестность фон Неймана), или добавить к ним ещё четыре, лежащие по диагонали (окрестность Мура). Перемещение частиц от одной ячейки к другой осуществляется на основе правил и вероятностей перехода. Обновление положения частиц происходит либо последовательно, либо синхронно (параллельно).

Первые КА-модели движения людей основывались на моделях дорожного трафика [53] - [57]. Динамика таких моделей в основном была детерминистическая.

В [55], [58] изучалось двунаправленное движение в длинном коридоре. Обновление положения частиц происходило последовательно. Частицам задавалось направление для перемещения и только, если желаемая ячейка была занята другой частицей, двигающейся в противоположном направлении, тогда частица могла случайным образом выбрать себе другую ячейку для перемещения.

В [54] движение частиц рассматривалось как аналогия многополосному дорожному движению.

В дальнейшем появились расширения и вариации, например, различные типы обновления положения частиц [59]; возможность обратного шага [60]. Влияние формы частиц исследовалось в [61], другие геометрии — в [62], [63], обобщения для полноценного двухмерного движения — в [57], [60], в [64] передвижение частиц не ограничивалось только близлежащими клетками, частицы могли передвигаться на 2, 3 или 4 клетки за один шаг.

В [65] каждой ячейке пространства назначались очки на основе её близости к частицам. Эти очки представляли отталкивающие взаимодействия, а само передвижение определялось посредством конкуренции между этими силами отталкивания и их рост приближал частицу к цели. Чтобы избежать конфликтов между частицами, которые пытались двигаться в одну и ту же позицию, обновление положения частиц происходило последовательно.

В [66], [67] были предложены модели динамики движения людей на основе модели решётчатого газа [68]. В [69] модель из [67] была изменена: введено поле расстояний до выхода.

Отметим российский вклад в развитие КА-методов моделирования движения людей. В работе [70] было введено понятие радиуса видимости. Это дало возможность учитывать наличие частиц и препятствий не только в соседних ячейках, но и на заданном расстоянии, увеличив степень влияния

окружающей среды на выбор траектории. Динамика модели стохастическая, но всем частицам заранее задавалось предпочтительное направление движения. Вероятности перемещения в этом направлении придавался больший вес. Такое определение переходных вероятностей затрудняет моделирование движения в пространствах со сложной планировкой.

Полевая КА-модель (Floor Field CA model). Широкое распространение получила полевая модель Floor Field (FF) [71] - [74]. В её основе лежит использование так называемых полей для моделирования движущей силы и взаимодействия с другими частицами.

В модели используются два поля: динамическое D и статическое S . Эти поля имеют такую же дискретную структуру, как и само пространство, по которому передвигаются частицы в КА моделях. Динамическое поле D соответствует виртуальному следу, который создается движением частиц по одной и той же ячейке и оказывает влияние на движение других. Оно имеет свою собственную динамику, а именно: рассеивание и забывание. Статическое поле S или поле расстояний не изменяется со временем, представляет своего рода карту местности, где каждая ячейка содержит обратное расстояние до ближайшего выхода с учетом всех недвижимых препятствий. То есть значение S увеличивается с приближением к выходу. Поле S не зависит от наличия или отсутствия частиц в рассматриваемой области.

Переходные вероятности для всех частиц зависят от значений полей S и D в соседних клетках. Формула вычисления вероятностей устроена так, что наибольшая вероятность придается направлениям с наибольшими значениями поля.

Влияние обоих полей на движение частицы контролируется константами k_S и k_D соответственно. Чем больше значение k_S , тем более направленное движение к выходу и более короткий путь выбирают частицы. При сильном привязывании к динамическому полю, то есть при увеличении k_D , наблюдается все ярче выраженное «стадное» поведение, когда индивидуумы пытаются следовать за другими.

Классическая формула переходных вероятностей (например, в направлении ϕ) имеет вид:

$$p_\phi = Norm^{-1} e^{k_D D_\phi} e^{k_S S_\phi} (1 - f_\phi) w_\phi, \quad (1.2)$$

где $Norm$ – нормализатор (сумма всех переходных вероятностей), k_S, k_D – параметры модели, S_ϕ, D_ϕ – значения статического и динамического полей в ячейке по направлению ϕ , f_ϕ обозначает занятость или свободность ячейки (если $f_\phi = 0$ – ячейка свободна, если $f_\phi = 1$ – занята), w_ϕ указывает на наличие ($w_\phi = 1$) или отсутствие ($w_\phi = 0$) стены и других недвижимых препятствий в рассматриваемом направлении. Таким образом, перемещение в занятую ячейку или ячейку с препятствием запрещено, частица может остаться на прежнем месте только в случае, когда все соседние клетки заняты.

Правила переходов устроены следующим образом: вычисляется статическое поле S , динамическое поле D в начальный момент времени имеет нулевое значение, для каждой частицы и для каждого направления перемещения определяются переходные вероятности и на основе полученного ряда распределения возможных направлений выбирается направление для перемещения. В модели используется синхронное обновление положения частиц, поэтому возникают конфликты, связанные с тем, что на одну ячейку может претендовать несколько частиц. После разрешения таких конфликтов частицы перемещаются на новые позиции, динамическое поле обновляется.

В настоящее время динамическое поле D практически не учитывается при моделировании ($k_D = 0$) [75], [76]. Но идея использования поля расстояний S для моделирования движущей силы явилась существенным улучшением над другими моделями и позволила легко воспроизводить направленное движение людей.

На основе FF подхода было построено много моделей. Анализ работ показывает, что FF-модели различаются следующим особенностям:

- способ дискретизации пространства: размеры ячеек, форма ячеек;
- шаблон соседства;
- скорость движения частиц (одна ячейка или несколько);
- способ вычисления поля S ;
- режимы работы КА: синхронный, асинхронный;
- вероятности переходов;
- правила переходов;
- способ разрешения конфликтов.

Размер ячеек варьируется: $0,4 \times 0,4 \text{ м}^2$ [71], [77] - [79] $0,5 \times 0,5 \text{ м}^2$ [80], [81] (описание модели взято из [21]). Естественная пространственная дискретизация может быть получена из максимальной плотности, наблюдаемой в плотном потоке, что дает минимальное пространство, которое может занимать человек. В этом случае размер ячейки соотносится с минимальным пространством для одного человека. Иногда используется более мелкая дискретизация [75], [82], [83], тогда частицы могут занимать более одной ячейки. Также модели могут различаться формой ячеек: квадратные (наиболее популярные) или шестиугольные ячейки [84] - [86].

Шаблон соседства (или окрестность ячейки) определяет соседей текущей ячейки. Обычно используется окрестность фон Неймана (четыре соседние ячейки) [73], [79], и окрестность Мура (восемь соседних ячеек) [71], [78], [87], [88].

Скорость движения частиц в моделях $v_{max} = 1$ ячейка. В [75] исследовались большие скорости движения частиц. Увеличение скорости движения приводит к усложнению правил переходов.

При вычислении статического поля S (поля расстояний до выхода из любой точки пространства) могут использоваться несколько альтернативных методов. Для самых простых геометрий пространства (коридор, комната без дополнительных препятствий и поворотов) в [73] поле S вычислялось посредством евклидова расстояния. Но для более сложных геометрий такой способ не подходит, так как необходимо учитывать препятствия и стены

на пути к выходу. В [89] рассматривались различные способы вычисления поля расстояний (манхэттенское расстояние, расстояние Чебышева, применение алгоритма Дейкстры [90] и др.). Алгоритм Дейкстры более точен по сравнению с другими методами. Значения поля S влияют на динамику движения частиц в модели. В [91] сравнивались манхэттенское расстояние и алгоритм Дейкстры, при использовании алгоритма Дейкстры динамика движения частиц более правдоподобная. В FF моделях обычно используется обратное поле расстояний, т.е. значения поля S увеличиваются при приближении к выходу.

В FF моделях обычно используется синхронный режим работы КА: все частицы перемещаются на новые позиции одновременно. При таком режиме происходят конфликтные ситуации, когда две или более частицы претендуют на одну ячейку. Асинхронный режим исключает возникновение конфликтных ситуаций. Частицы для перемещения выбираются случайным образом [78], [86].

В работах [92]-[95] исследуются способы разрешения конфликтных, возникающие при синхронном режиме работы КА. Идея состоит в следующем. С вероятностью $\mu \in [0, 1]$ одной из частиц, которая выбирается случайно из всех кандидатов, разрешается переместиться в спорную ячейку, остальные остаются на месте. Это позволяет описывать эффект затруднения движения между частицами. Параметр μ можно интерпретировать, как некоторый вид локального давления между частицами. Если значение μ близко к единице, тогда соседние частицы могут сильно мешать друг другу достичь желаемых ячеек. μ называют фрикционным параметром. В простейшем случае при возникновении конфликтной ситуации случайным образом выбирается одна частица для перемещения, остальные остаются на прежних местах [70], [87] и др.

Правила переходов описаны выше и мало изменяются.

Формула для вычисления вероятностей переходов — самая вариативная деталь моделей движения людей. В классическую формулу не только

вводятся новые элементы, но и изменяется сама формула. Но всегда используется компонента с полем S .

В [96] - [98] был введен эффект инерции. В [94], [96] коэффициент k_S берётся с отрицательным знаком, чтобы частицы двигались в сторону понижения поля S . В [99] вероятность перехода в занятую ячейку не равна нулю, а уменьшается в два раза, по сравнению с вероятностью в случае свободной ячейки, и приписывается текущей ячейке, что даёт возможность частице остаться на прежнем месте (в FF моделях запрещается переход в занятую ячейку и вероятность перехода в этом случае равна нулю). В [87] введён элемент паники, когда некоторой части частиц запрещают передвигаться.

В [86], [96], [100] и др. присутствуют компоненты психологического отталкивания от стен и от других частиц. Влияние стен определяется их близостью к текущей частице ([96], [86]), при этом задаётся максимальное расстояние, на котором стены могут влиять на выбор направления. Влияние частиц определяется посредством плотности частиц или с помощью специального поля, в котором отражена некоторая мера близости ячейки до других частиц ([86], [100]). В [96] плотность определяется как количество частиц, находящихся в окрестности Мура от рассматриваемой. В [101] — количество частиц в направлении.

В [98] предложена такая форма расчёта переходных вероятностей, где к тому же учитывается принадлежность частицы к определённой группе (например, семья).

В моделях, где время дискретно, важным является вопрос о переводе модельных временных шагов в естественные единицы измерения. В [75], [78] предполагается, что один дискретный шаг осуществляется за 0,3 секунды, исходя из того, что средняя скорость человека составляет около 1,3 м/с и размер ячейки равен $0,4 \times 0,4 \text{ м}^2$. В [98] скорость 1,2 м/с и шаг равен 0,33 секунды. В [79], [87] один дискретный шаг осуществляется за 0,4 секунды (размер ячейки — $0,4 \times 0,4 \text{ м}^2$, средняя скорость движения 1 м/с).

1.4 Верификация и валидация

В [21] приведён следующий список того, как проводится проверка моделей движения людей:

- проверка на соответствие национальным стандартам;
- сравнение с учебными тренировками эвакуации из зданий;
- сравнение с данными фундаментальных диаграмм (зависимость скорости от плотности или потока от плотности) и с другими данными натурального эксперимента;
- сравнения с результатами других моделей.

В области исследования моделей необходимо отметить работы [42], [102] - [104], где были предложены тесты для исследования моделей и проведены сами исследования некоторых моделей.

В [42] были исследованы коммерческие программные продукты, где моделируется движение людей (Exodus [105], [106], PedGo [107], ASERI [108], [109], Simulex [83],[110]) и показано, что не всегда модели соответствуют заявленным свойствам (например, данным фундаментальных диаграмм).

Единой базы тестовых задач для моделей движения людей не найдено. Так же не найдено единых количественных критериев для оценки адекватности моделей. На сегодняшний день, единственным таким критерием может считаться удовлетворение данным фундаментальных диаграмм. Существуют аналитические выражения вида ФД [1], [2], [4], [111] и табличные [112]. Несмотря на различие численных значений ФД, качественное выполнение свойств ФД считается базовым критерием адекватности математических моделей движения людей.

В [104] отмечается, что разработка тестовых примеров для исследования моделей остаётся открытым вопросом.

Анализ работ (в частности, сборников трудов конференций PED — Pedestrian and Evacuation Dynamics [113], [114]) показывает, что авторы исследуют модели по своему усмотрению. Рассматривается движение людей в раз-

личных геометриях пространства в зависимости от расположения и плотности людей (частиц) в области. Приводятся снимки эвакуации в моменты времени t . Исследуются количественные характеристики: фундаментальные диаграммы (зависимости потока от плотности, скорости от плотности, потока от ширины сужения), время эвакуации, число вышедших в зависимости от времени и т.д.

Когда работа модели показывается на больших сложных объектах (самолеты, корабли, офисные, высотные здания и др.) трудно оценить работу модели в других пространственных условиях. Очень важно для понимания динамики модели проверять её на различных тестовых задачах.

1.5 Выводы

Модели движения людей микроскопического (индивидуального) типа должны воспроизводить как индивидуальные свойства движения людей при малых плотностях людского потока, так и массовые при больших плотностях. Учёт индивидуальных свойств движения людей при моделировании должен обеспечивать выполнение закономерностей движения потока при различных плотностях в различных геометриях пространства (прямой путь, сужения, повороты и т.д.) для различных видов движения людских потоков (слияние, пересечение и т.д.).

Из всего многообразия свойств, присущих движению людей, выделяется следующий минимум:

- цель движения — достижение цели следования;
- движение людей — случайный процесс. Траектория одного и того же человека при прохождении одинакового маршрута каждый раз пусть немного, но отличается от предыдущих;
- психологическое отталкивание: люди стараются избегать излишнего контакта друг с другом и не приближаться близко к стенам;
- люди выбирают кратчайший путь к цели следования. Если использо-

вание кратчайшего пути невозможно, то человек использует альтернативный путь. То есть при движении человек старается минимизировать длину пути или время пути. Такие особенности движения были названы *стратегиями кратчайшего и быстрого пути* [125].

Стратегия «кратчайшего пути» — стратегия, при которой люди движутся к цели только кратчайшим путём.

Стратегия «быстрого пути» — стратегия, при которой люди движутся к цели быстрым путём: кратчайшим или альтернативным (который не равен кратчайшему);

- в скоплениях (например, при выходе из лекционного зала) люди в основном стоят и ждут, когда место в желаемом направлении освободится, и не совершают не нужных метаний. Такие ситуации были названы *стратегией «терпеливого человека»*.

Стратегия «терпеливого человека» — стратегия, при которой человек может остаться на прежнем месте, даже при наличии рядом свободного места.

Предполагается, что учитывая данные свойства движения, модель будет воспроизводить не только индивидуальное, одиночное движение человека, но и групповую динамику движения в различных пространственных ситуациях.

Модели, основанные на теории клеточных автоматов, просты, понятны и способствуют более быстрому компьютерному вычислению (по сравнению с непрерывными моделями). Несмотря на активные исследования в данной области, остаются нерешёнными некоторые задачи.

Существующие КА-модели движения людей слабо формализованы (особенно, правила переходов). Описание модели проводится, как правило, в словесной форме. Тогда как математическое описание позволяет однозначно интерпретировать модель и облегчает программную реализацию.

Поле расстояний в FF моделях используется в явном виде, что накладывает определённые ограничения на линейные размеры расчётной области.

Поле расстояний является главной движущей силой для частиц в модели, т.е. частицы стремятся идти к выходу кратчайшим путём. В результате преобладающим образом реализуется стратегия кратчайшего пути. В простых геометриях (прямой коридор, комната без дополнительных препятствий) и при малых плотностях частиц в области моделирования динамика движения может моделироваться адекватно. Но при наличии поворотов на пути к выходу преобладание этой стратегии приведёт к нереалистичным заторам на поворотах и к неадекватной оценке как самой динамики движения, так и времени эвакуации. Необходимо различать стратегию кратчайшего пути и стратегию быстрого пути.

Частицы всегда перемещаются на новую позицию при наличии свободной соседней клетки, т.е. стратегия терпеливого человека не реализуется.

Отсутствие единых критериев в области верификации и валидации моделей движения людей приводит к тому, что авторы исследуют модели по своему усмотрению. Не найдено тестов, показывающих, что в модели реализуется растекание потока. Не исследуется влияние поворотов на поток в модели.

Сравнение модельных результатов с данными ФД проводится в основном качественно. Для количественного сравнения необходимо решить вопрос о переводе модельных временных шагов в естественные единицы измерения (минуты или секунды). Необходимо помнить и о разнообразии ФД по данным натуральных экспериментов.

Таким образом, ставятся следующие задачи исследования:

1. Модифицировать клеточно-автоматную стохастическую модель движения людей: вероятности и правила переходов. Формализовать следующие свойства движения людей: стратегия «кратчайшего пути», стратегия «быстрого пути», взаимодействие с препятствиями, стратегия «терпеливого человека».
2. Разработать и программно реализовать алгоритмы численной реализации модели.

3. Разработать набор тестовых задач для валидации модели.
4. Провести качественные и количественные исследования модели.
5. Провести уточнение скорости движения для перевода дискретного времени в естественные единицы измерения и провести сравнение с данными натурных экспериментов из литературных источников.

Глава 2

Клеточно-автоматная стохастическая модель движения людей

2.1 Предварительные сведения из теории клеточных автоматов

Приведём некоторые сведения из теории КА о формальном представлении КА (взято из [52]).

Клеточный автомат обычно определяется множеством клеток, плотно заполняющих дискретное D -мерное пространство.

Клеткой называется пара $(x, t) \in A \times M$, где $x \in A$ — символ алфавита A , обозначающий *состояние клетки*, $t \in M$ — имя клетки из *множества имён* M , обозначающее местоположение клетки в дискретном пространстве. Алфавит может быть булевым, $A_B = \{0; 1\}$, вещественным, $A_R = [0; 1]$, и символьным, $A_S = \{a, b, c, d, \dots\}$. Состояния могут быть заданы переменными, определёнными на одном из этих алфавитов.

Множество клеток $\Omega = \{(x, t)\}$, в котором нет клеток с одинаковыми именами, называется *клеточным массивом*. Клеточные массивы, в которых состояния определены на множестве A , а имена на множестве M , составляют *класс клеточных массивов* $\Omega = \{(A, M)\}$. На множестве имён определены *именующие функции* $\phi : M \rightarrow M$, которые определяют пары взаимодействующих клеток.

Именующая функция $\phi(t)$ определяет для любой клетки t одного из её

соседей. Для декартовых клеточных массивов именующие функции имеют вид сдвига, $\phi(i, j) = (i + a, j + b)$, a и b — константы, которые определяют пары взаимодействующих клеток.

Конечное множество именующих функций называется *шаблоном соседства*:

$$T(m) = \{\phi_0(m), \phi_1(m), \dots, \phi_q(m)\}.$$

Для каждой клетки $m \in M$ шаблон $T(m)$ определяет множество её соседей. Нумерация клеток в $T(m)$ может быть любой. Принято считать, что $\phi_0(m) = m$.

Выражение вида

$$Conf(m) = \{(x_0, \phi_0(m)), (x_1, \phi_1(m)), \dots, (x_q, \phi_q(m))\}$$

называется *локальной конфигурацией*, если существует такое r , что расстояние от m до любого $\phi_k(m) \in T(m)$, $d(m, \phi_k(m)) < r$, где $T(m)$ — множество входящих в $Conf(m)$ именующих функций, называемое определяющим шаблоном локальной конфигурации.

Параллельной подстановкой (далее *подстановкой*) называется выражение вида

$$\theta(m) : Conf(m) \star Conf''(m) \rightarrow Conf'(m), \text{ где}$$

$$Conf(m) = \{(x_0, \phi_0(m)), (x_1, \phi_1(m)), \dots, (x_q, \phi_q(m))\},$$

$$Conf'(m) = \{(h_0, \phi_0(m)), (h_1, \phi_1(m)), \dots, (h_q, \phi_q(m))\},$$

$$Conf''(m) = \{(g_0, \psi_0(m)), (g_1, \psi_1(m)), \dots, (g_n, \psi_n(m))\}.$$

$Conf(m)$ называется *базовой конфигурацией* (или базой), $Conf''(m)$ — *контекстом*, $Conf'(m)$ — *правой частью* подстановки. База и правая часть подстановки имеют один и тот же определяющий шаблон. Шаблон контекста от них отличается. Символы h_k в клетках правой части обозначают функции от значений состояний в клетках базы и контекста:

$$h_k = H(x_0, x_1, \dots, x_q, g_0, \dots, g_n).$$

Они называются *функциями переходов* и могут быть булевыми, вещественными, а также простыми заменами символов в соответствии с используемым алфавитом.

Параллельная подстановка является *локальным оператором* КА-модели.

Результат применения локального оператора ко всем клеткам массива Ω называется глобальным оператором $\theta(\Omega)$.

Существует два основных режима применения глобального оператора вычисления следующего глобального состояния $\Omega(t + 1)$: *синхронный* и *асинхронный*. Синхронный режим предполагает, что аргументы функции переходов — это состояние клеток-соседей на текущей итерации t . На каждой итерации клетки вычисляют значения нового состояния и затем все клетки синхронно заменяют старые состояния на новые. При асинхронном режиме каждая клетка вычисляет функцию перехода тех значений состояний соседей, которые на данный момент имеют место, и сразу меняет свое состояние.

Итеративный процесс переходов из состояния в состояние называется *эволюцией* КА.

Границы областей моделирования представляются особыми клетками, которые имеют граничные правила переходов.

2.2 Постановка задачи

Геометрия области моделирования представляется в виде плоской области, разбитой на ячейки. Каждая ячейка отражает часть рассматриваемой области размера $0,4 \times 0,4 \text{ м}^2$ (это средний размер, занимаемый человеком в толпе [73]). Ячейки разделяются на ячейки-частицы, ячейки-препятствия, ячейки-выходы и пустые.

Область моделирования удобно представлять в виде двух массивов: массив препятствий W и массив частиц F^t . t — номер дискретного временного шага или номер итерации КА.

Массив препятствий W задается изначально и не изменяется со време-

нем. $W = \{w_{ij} : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$, где

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ячейка } (i, j) \text{ занята стеной (препятствием);} \\ 2, & \text{в ячейке } (i, j) \text{ выход;} \\ 0, & \text{ячейка } (i, j) \text{ свободна.} \end{cases}$$

Массив частиц F^t изменяется со временем и определяет эволюцию КА. $F^t = \{f_{ij}^t : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$, где

$$f_{ij}^t = \begin{cases} 1, & \text{ячейка } (i, j) \text{ занята частицей и } w_{ij} = 0; \\ 0, & \text{ячейка } (i, j) \text{ свободна.} \end{cases}$$

Таким образом, задали состояние клетки $f \in A$ и алфавит $A = \{0; 1\}$. Множество имён $M = \{(i, j) : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$.

В момент времени $t = 0$ количество частиц N расположены на массиве F^0 . Число N не должно превышать количества свободных от ячеек-препятствий мест. Каждая ячейка может быть занята только одной частицей, частицы могут располагаться на свободных от препятствий местах: $(w_{ij} = 1) \cap (f_{ij}^t = 1) = \emptyset, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$.

Полагается, что геометрия рассматриваемой области «известна» частицам и отражена в «карте местности» — статическом поле S . Поле S совпадает с рассматриваемой областью и также дискретизировано на ячейки $0,4 \times 0,4$ м². $S = \{s_{ij} : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$. Ячейки поля содержат минимальное расстояние до ближайшего выхода.

На каждом шаге t частица может переместиться в одну из четырех свободных соседних ячеек или остаться на прежнем месте (окрестность фон Неймана), таблица 2.1. Шаблон соседства $T(i, j) = \{\phi_k(i, j) : k = \overline{0, 4}\} = \{(i, j), (i, j - 1), (i - 1, j), (i, j + 1), (i + 1, j)\}$. $\phi_k(i, j)$ — соответствующая соседняя клетка, которую также можно рассматривать как направление движения.

Скорость частиц в модели $v_{max} = 1$ ячейка.

Таблица 2.1 – Шаблон соседства $T(i, j)$

	$(i - 1, j)$	
$(i, j - 1)$	(i, j)	$(i, j + 1)$
	$(i + 1, j)$	

Направление движения частицы рассматривается как случайная величина. Пусть случайная величина ξ – направление движения частицы с координатами (i, j) на расчетном шаге t . $p_{\phi_k(i,j)}$ – вероятность переместиться в соседнюю ячейку $\phi_k(i, j)$. Тогда ξ имеет распределение:

$$\begin{array}{c|c|c|c|c|c} \xi & \phi_0(i, j) & \phi_1(i, j) & \phi_2(i, j) & \phi_3(i, j) & \phi_4(i, j) \\ \hline p_{\xi} & p_{\phi_0(i,j)} & p_{\phi_1(i,j)} & p_{\phi_2(i,j)} & p_{\phi_3(i,j)} & p_{\phi_4(i,j)} \end{array}$$

Целью передвижения частиц является ближайший или заданный выход. Направление движения частицы определяется на основе вероятностей переходов в каждом направлении для каждой частицы в каждый дискретный шаг времени и набором правил переходов.

Основным предметом исследований является определение переходных вероятностей и правил переходов таким образом, чтобы воспроизводить направленное движение частиц к выходу в зданиях и сооружениях любой геометрии с приближенным выполнением выделенных в первой главе свойств движения людей.

Для решения поставленной задачи за основу была взята FF-модель [71], [97]. Она относится к классу дискретных стохастических моделей с индивидуальным представлением людей. Физические параметры унифицируются: все частицы имеют одну и ту же площадь проекции и скорость.

2.3 Правила переходов

Традиционная схема пошаговых вычислений для дискретного подхода, основанного на КА, заключается в следующем. Сначала вычисляются переходные вероятности и разыгрываются направления движения для каждой частицы, затем происходит разрешение конфликтов, если две или более

частицы оказались претендентами на одну ячейку, и непосредственно перемещение.

В рассматриваемой модели разыгрывание направлений движения происходит в два этапа. Сначала вычисляются вероятности переходов во все соседние ячейки. Даже если соседняя ячейка занята частицей, вероятность перейти в эту ячейку вычисляется и не обязана быть равной нулю. В этом случае вероятность может быть интерпретирована как мера желания двигаться в этом направлении. Затем происходит разыгрывание направлений. Если выбирается занятое направление, тогда значение переходных вероятностей перераспределяется между свободными соседними ячейками и текущей, и направление перемещения выбирается снова. Таким образом, частице предоставляется возможность в случае, если желаемое направление занято, еще раз выбрать другое или остаться на прежнем месте. Тем самым вводится способ моделирования «терпеливого человека» [121], [124].

Как уже было сказано, существует два режима работы клеточного автомата: синхронный и асинхронный.

При асинхронном режиме не возникает конфликтных ситуаций, когда две или более частицы претендуют на одно место. Такой режим может быть реализован посредством последовательного обновления частиц, начиная от выходов, или обновление происходит в случайном порядке. Асинхронный режим может быть интерпретирован как некоторое предсказание того, что произойдет в следующий момент времени (где окажется соседняя частица). Но, с другой стороны, человек в выборе места для следующего шага руководствуется текущей обстановкой и не будет идти в «занятое» место. В этой ситуации показателен пример движения колонны солдат: шеренги начинают движение последовательно, когда впереди появляется достаточно места для осуществления следующего шага. Поэтому был выбран синхронный режим работы КА: правила применяются ко всем ячейкам в один и тот же момент времени t . Представим их более подробно.

Переход в новое состояние $F^t \rightarrow F^{t+1}$ осуществляется с помощью под-

становки *Transfer* [142], [144], которая перемещает частицы на новые позиции согласно массиву направлений R^t :

$$Transfer(i, j) : Conf(i, j) \star Conf''(i, j) \rightarrow Conf'(i, j), \text{ где}$$

$$Conf(i, j) = \{(f, (i, j))\},$$

$$Conf'(i, j) = \{(trans, (i, j))\},$$

$$Conf''(i, j) = \{(r_0, (i, j)), (r_1, (i - 1, j)), (r_2, (i, j + 1)), (r_3, (i + 1, j)), \\ (r_4, (i, j - 1))\}.$$

$$trans(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } \exists k, k = \overline{0, 4} : r_k = (i, j); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

$(f, (i, j)) = f_{ij}^t$ — значение массива частиц F^t в ячейке (i, j) . $(r_k, \phi_k(i, j)) = r_{\phi_k(i, j)}$, $k = \overline{0, 4}$ — значения массива направлений R^t в соответствующей ячейке.

Массив направлений $R^t = \{r_{ij} : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$ хранит все выбранные на шаге t направления (координаты) для перемещения:

$$r_{ij} = \begin{cases} \phi_{k^*}(i, j), k^* \in \{0, 1, 2, 3, 4\}, & \text{если } f_{ij}^t = 1; \\ 0, & \text{если } f_{ij}^t = 0. \end{cases}$$

Все конфликтные ситуации разрешаются на стадии определения массива R^t : запрещаются переходы в занятую ячейку и стены, одновременный выбор несколькими частицами одной и той же ячейки.

Граничные условия задаются только на ячейки-выходы.

Открытые граничные условия предполагают удаление частиц из расчётной области по достижению контрольного сечения (выхода). Плотность частиц не постоянна на всей области и определяется текущей ситуацией. Для открытых граничных условий в функцию переходов *trans* вводится дополнительное условие: если $\exists k, k = \overline{0, 4} : r_k = (i, j) \ \& \ w_{ij} = 2$, тогда $trans(i, j) = 0$.

Периодические граничные условия предполагают, что в области моделирования поддерживается постоянное количество людей (распределённых примерно равномерно по области). Используются при исследовании модели, чтобы повторить эксперименты, проведенные с другими моделями, и при построении фундаментальных диаграмм, чтобы сравнить с натурными данными. Натурные данные для построения фундаментальных диаграмм получают при постоянной плотности людей в некоторой области, что в модели можно реализовать только при периодических граничных условиях.

В этом случае в массив препятствий W вводятся следующие типы ячеек: c — поглотитель (что соответствует $w_{ij} = 2$ при открытых граничных условиях), a — излучатель. Если частица попадает в ячейку поглотителя, она перемещается в случайную свободную в этот момент времени ячейку излучателя, или остаётся на прежнем месте, если таковой не оказалось. Число частиц в области остаётся постоянным.

Запишем ячейки излучателя как $anod = \{((i, j) : w_{ij} = a)_l : l = \overline{1, L}\}$.

Если частица выбирает ячейку поглотителя, т.е. $\exists k, k = \overline{0, 4} : r_k = (i, j)$ & $w_{ij} = c$, тогда перемещаем её на случайное место в излучателе:

1. $l' = rand$, где $rand$ — случайное значение из $[1, 2, \dots, L]$.
2. если $f_{anod_{l'}}^t = 0$ (выбранное случайное место в излучателе свободно), тогда $f_{anod_{l'}}^{t+1} = 1$ и $f_{\phi_{k^*}(i,j)}^{t+1} = 0$ (перемещаем частицу в излучатель).
3. если $f_{anod_{l'}}^t = 1$ (выбранное случайное место в излучателе занято), тогда $f_{\phi_{k^*}(i,j)}^{t+1} = f_{\phi_{k^*}(i,j)}^t = 1$ (оставляем частицу на прежнем месте).

При вычислении переходных вероятностей ячейки поглотителя рассматриваются подобно ячейкам-выходам при открытых граничных условиях.

Вычисление массива направлений R^t .

Шаг 1. Вычисление переходных вероятностей.

Каждой частице (т.е. каждой ячейке, где $f_{ij}^t = 1$, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$) ставится в соответствие вероятности переходов в соседние ячейки $\{p_{\phi_k(i,j)} : k = \overline{0, 4}\}$. Функция $calc_p$ для каждой частицы вычисляет вероятности

переходов в соседние ячейки:

$$calc_p(i, j) = \begin{cases} \{0, p_{\phi_1(i,j)}, p_{\phi_2(i,j)}, p_{\phi_3(i,j)}, p_{\phi_4(i,j)}\}, & \text{если } f_{ij}^t = 1; \\ 0, & \text{если } f_{ij}^t = 0. \end{cases}$$

Способ вычисления $p_{\phi_k(i,j)}$ будет представлен далее в разделе 2.4.

На данном шаге вероятность остаться на прежнем месте $p_{\phi_0(i,j)} = p_{i,j}$ непосредственным образом не вычисляется (это связано со способом вычисления переходных вероятностей) и изначально предполагается равной нулю, поскольку считается, что частицы имеют цель — движение, а реализация возможности «остаться на месте» является мерой вынужденной.

Таким образом, на данном шаге каждой частице ставится в соответствие ряд распределения направления движения:

ξ	$\phi_0(i, j)$	$\phi_1(i, j)$	$\phi_2(i, j)$	$\phi_3(i, j)$	$\phi_4(i, j)$
p_ξ	0	$p_{\phi_1(i,j)}$	$p_{\phi_2(i,j)}$	$p_{\phi_3(i,j)}$	$p_{\phi_4(i,j)}$

Шаг 2. Выбор направлений.

Пусть $rand \in R[0; 1]$ — случайное число равномерно распределённое на интервале $[0; 1]$. Функция *direction* выбирает направления для перемещения на основе ряда распределения направлений для частицы в ячейке (i, j) (используется метод Монте-Карло [115]).

$$direction((i, j), \{p_{\phi_k} : k = \overline{0, 4}\}) = \begin{cases} \phi_0(i, j), & \text{если } rand \in [0, p_{\phi_0}]; \\ \phi_1(i, j), & \text{если } rand \in (p_{\phi_0}; p_{\phi_0} + p_{\phi_1}); \\ \phi_2(i, j), & \text{если } rand \in \left(\sum_{k=0}^1 p_{\phi_k}; \sum_{k=0}^2 p_{\phi_k} \right]; \\ \phi_3(i, j), & \text{если } rand \in \left(\sum_{k=0}^2 p_{\phi_k}; \sum_{k=0}^3 p_{\phi_k} \right]; \\ \phi_4(i, j), & \text{если } rand \in \left(\sum_{k=0}^3 p_{\phi_k}; \sum_{k=0}^4 p_{\phi_k} \right]. \end{cases}$$

Для каждой частицы выбирается направление для перемещения $\xi =$

$\phi_{k^*}(i, j)$ и заполняется массив направлений R^t :

$$r_{ij} = \begin{cases} \phi_{k^*}(i, j) = \text{direction}((i, j), \text{calc_p}(i, j)), & \text{если } f_{ij}^t = 1; \\ 0, & \text{если } f_{ij}^t = 0. \end{cases}$$

Шаг 3. Проверка выбора занятых ячеек, реализация стратегии «терпеливого человека».

Для каждой частицы осуществляется проверка и запрещается выбор занятых направлений. При выборе занятого направления реализуется стратегия «терпеливого человека».

Определение. Для частицы с координатами (i, j) выполняется стратегия «терпеливого человека», если $r_{ij} = (i, j)$ и $\exists k, k = \overline{1, 4} : f_{\phi_k(i, j)} = 0$.

Замечание. Если все соседние ячейки свободны, частица переместится на новое место: $r_{ij} = \phi_{k^*}(i, j)$, если $\forall k, k = \overline{1, 4} : f_{\phi_k(i, j)} = 0$.

Если выбранная целевая ячейка $\phi_{k^*}(i, j)$ свободна ($f_{\phi_{k^*}(i, j)}^t = 0$), тогда это направление фиксируется $r_{ij} = \phi_{k^*}(i, j)$.

Если выбранная целевая ячейка $\phi_{k^*}(i, j)$ занята ($f_{\phi_{k^*}(i, j)}^t = 1$), тогда происходит пересчёт переходных вероятностей и направление выбирается снова, но уже среди оставшихся свободных соседних ячеек и текущей. Переопределяем ряд распределения направлений $\{p'_{\phi_k(i, j)} : k = \overline{0, 4}\}$ следующим образом:

$$\begin{aligned} p'_{\phi_0(i, j)} &= \sum_k p_{\phi_k(i, j)} (f_{\phi_k(i, j)}^t = 1); \\ p'_{\phi_k(i, j)} &= 0, \text{ если } f_{\phi_k(i, j)}^t = 1, k = \overline{1, 4}; \\ p'_{\phi_k(i, j)} &= p_{\phi_k(i, j)}, \text{ если } f_{\phi_k(i, j)}^t = 0, k = \overline{1, 4}. \end{aligned}$$

Вероятность перехода в занятую частицей ячейку назначается нулевой, а случаю остаться на месте приписывается сумма вероятностей переходов в занятые ячейки, остальные остаются без изменений. Например, пусть выбрана целевая ячейка $\phi_{k^*}(i, j) = \phi_2(i, j)$ и $f_{\phi_2(i, j)} = 1, f_{\phi_3(i, j)} = 1$. Тогда ряд распределения ξ преобразуется в следующий:

ξ	$\phi_0(i, j)$	$\phi_1(i, j)$	$\phi_2(i, j)$	$\phi_3(i, j)$	$\phi_4(i, j)$
$p\xi$	$p_{\phi_2(i, j)} + p_{\phi_3(i, j)}$	$p_{\phi_1(i, j)}$	0	0	$p_{\phi_4(i, j)}$

Таким образом, такая процедура позволяет сначала определять направление желаемого движения, а потом корректировать его в зависимости от ситуации: остаться на месте и подождать, пока желаемое направление освободится, или выбрать другое.

На данном шаге массив направлений R^t переопределяется следующим образом:

$$r_{ij} = \begin{cases} r_{ij}, & \text{если } f_{ij}^t = 1 \& f_{r_{ij}}^t = 0; \\ direction((i, j), \{p'_{\phi_k(i, j)} : k = \overline{0, 4}\}), & \text{если } f_{ij}^t = 1 \& f_{r_{ij}}^t = 1; \\ 0, & \text{если } f_{ij}^t = 0. \end{cases}$$

Шаг 4. Разрешение конфликтов.

Конфликтные ситуации возникают, когда две или более частицы оказались претендентами на одну ячейку. В этом случае из всех таких частиц выбирается одна для перемещения, остальные остаются на своих прежних местах.

Определение. Ячейка (i, j) является ячейкой конфликта, если существует хотя бы одна пара чисел k_1, k_2 таких, что $k_1 \neq k_2, k_1 = \overline{1, 4}, k_2 = \overline{1, 4}$, для которых $r_{\phi_{k_1}(i, j)} = r_{\phi_{k_2}(i, j)} = (i, j)$.

Процедура разрешения конфликтов состоит в следующем.

Массив $Wish^1 = \{wish_{ij}^1 = \sum_{k=1}^4 g_1(\phi_k(i, j)) : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$ содержит количество претендентов на ячейку (i, j) на шаге t , где

$$g_1(\phi_k(i, j)) = \begin{cases} 1, & \text{если } r_{\phi_k(i, j)} = (i, j); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Если $wish_{ij}^1 > 1$, тогда:

1. Узнаем координаты претендентов на ячейку (i, j) : $\{wish_k^2 = g_2(\phi_k(i, j)) :$

$$k = \overline{1, 4}\}_{ij},$$

$$g_2(\phi_k(i, j)) = \begin{cases} \phi_k(i, j), & \text{если } r_{\phi_k(i, j)} = (i, j); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

2. Каждому претенденту на ячейку (i, j) ставим в соответствие некоторое равномерно распределённое случайное число $rand \in R[0; 1]$ (мера желания переместиться в ячейку (i, j)): $\{wish_k^3 = g_3(k, (i, j)) : k = \overline{1, 4}\}_{ij}$, где

$$g_3(k, (i, j)) = \begin{cases} rand, & \text{если } (wish_k^2)_{ij} \neq 0; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

3. Находим номер k_{max} претендента, у которого «желание» переместиться выше, чем у остальных:

$$max_rand(i, j) = \max_{k=\overline{1, 4}} \{wish_k^3 : k = \overline{1, 4}\}_{ij}.$$

$$k_{max} = k : (wish_k^3)_{ij} = max_rand(i, j), k = \overline{1, 4}.$$

Т. е. находим максимальное из назначенных случайных чисел и находим k -го соседа-претендента на ячейку (i, j) для которого назначенное случайное число будет больше, чем у других претендентов.

4. Переопределяем массив направлений R^t :

$$r_{(wish_{k_{max}}^2)_{ij}} = (i, j);$$

$$r_{(wish_k^2)_{ij}} = (wish_k^2)_{ij}, k = \overline{1, 4} : k \neq k_{max} \ \& \ (wish_k^2)_{ij} \neq 0.$$

Таким образом, в случае возникновения конфликтных ситуаций, разрешается переместиться на новую позицию той частице, у которой больше «желание» переместиться, остальные остаются на своих прежних местах.

На этом шаге процедура определения массива направлений R^t заканчивается.

2.4 Переходные вероятности

Правила переходов преимущественно отвечают на вопрос: *как* осуществляется перемещение частиц. Переходные вероятности $p_{\phi_k(i,j)}$ определяют: *куда* передвигаться. Их еще можно интерпретировать, как степень желания двигаться в том или ином направлении. Поэтому, чтобы наиболее реалистично моделировать движение людей и людского потока, необходимо правильно определить переходные вероятности.

Формула переходных вероятностей имеет следующий вид¹:

$$p_{\phi_k(i,j)} = \frac{\tilde{p}_{\phi_k(i,j)}}{Norm_{\phi_k(i,j)}} |1 - w_{\phi_k(i,j)}|, k = \overline{1,4} \quad (2.1)$$

$$\tilde{p}_{\phi_k(i,j)} = e^{k_S \Delta S_{\phi_k(i,j)} - k_P D_{\phi_k(i,j)}(r_{\phi_k(i,j)}^*) - k_W \left(1 - \frac{r_{\phi_k(i,j)}^*}{r}\right) A_{\phi_k(i,j)}^{wall}},$$

где

- $Norm_{\phi_k(i,j)} = \sum_{k=1}^4 \tilde{p}_{\phi_k(i,j)}$ – нормализатор, $Norm_{\phi_k(i,j)} \neq 0$, $\tilde{p}_{\phi_k(i,j)} > 0$.
- Множитель $|1 - w_{\phi_k(i,j)}| = 0$ в случае занятости соседней ячейки $\phi_k(i, j)$ стеной. Вероятность переместиться в ячейку со стеной $p_{\phi_k(i,j)} = 0$.
- $k_S \Delta S_{\phi_k(i,j)}$ – главная движущая сила:
 1. $k_S \geq 0$ – параметр, определяющий степень влияния поля S .
 2. $\Delta S_{\phi_k(i,j)} = s_{\phi_0(i,j)} - s_{\phi_k(i,j)} \in [-1; 1]$.
- $k_P D_{\phi_k(i,j)}(r_{\phi_k(i,j)}^*)$ – контролирует плотность частиц в рассматриваемом направлении [125]:
 1. $k_P \geq 0$ – параметр, определяющий степень влияния плотности частиц в рассматриваемом направлении.
 2. $0 \leq r_{\phi_k(i,j)}^* \leq r$ – расстояние (в ячейках) до ближайшего препятствия в направлении ячейки $\phi_k(i, j)$. $r > 0$ – радиус видимости (параметр модели).

¹ Данный вид p_{ϕ_k} появился в процессе работы над улучшением качества воспроизведения движения людей. Данный процесс можно проследить по статьям [121], [124], [125]

$$r_{\phi_k(i,j)}^* = m - 1 : \min_{m=1, r+1} \{(w_m)_{\phi_k(i,j)} = 1\}.$$

Введём обозначение: $(w_l)_{\phi_k(i,j)}$ – значение ячейки в направлении $\phi_k(i, j)$ на расстоянии m от текущей. Например, если $\phi_k(i, j) = (i - 1, j)$, то $(w_m)_{\phi_k(i,j)} = w_{i-m, j}$.

3. $D_{\phi_k(i,j)}(r_{\phi_k(i,j)}^*) \in [0; 1]$ – плотность частиц в направлении $\phi_k(i, j)$ на расстоянии $r_{\phi_k(i,j)}^*$ (т. е. только в пределах радиуса видимости или только до ближайшего препятствия в рассматриваемом направлении).

Плотность оценивается с помощью ядерной оценки плотности Розенבלата-Парзена [116], [117]:

$$D_{\phi_k(i,j)}(r_{\phi_k(i,j)}^*) = \frac{\sum_{m=1}^{r_{\phi_k(i,j)}^*} \Phi\left(\frac{m}{C(r_{\phi_k(i,j)}^*)}\right) \cdot (f_m^t)_{\phi_k(i,j)}}{r_{\phi_k(i,j)}^*},$$

где

$$\Phi(z) = \begin{cases} (0,335 - 0,067(z)^2) 4,4724, & |z| \leq \sqrt{5}; \\ 0, & |z| > \sqrt{5}. \end{cases}$$

Параметр размытости $C(r_{\phi_k(i,j)}^*) = \frac{r_{\phi_k(i,j)}^* + 1}{\sqrt{5}}$.

Если все ячейки в направлении $\phi_k(i, j)$ заняты: $D_{\phi_k(i,j)}(r_{\phi_k(i,j)}^*) = 1$, если свободны – $D_{\phi_k(i,j)}(r_{\phi_k(i,j)}^*) = 0$. Если не все ячейки заняты частицами, получаем взвешенное значение плотности, и чем дальше занятая ячейка находится от клетки (i, j) , тем меньше её вес.

Такой подход позволяет оценивать плотность частиц в зависимости от ситуации, таблица 2.2.

Таблица 2.2 – Сравнение оценки плотности частиц $D_{\phi_k(i,j)}(r_{\phi_k(i,j)}^*)$ при различном расположении частиц (1) относительно текущей (i, j) . Радиус видимости $r = r_{\phi_k(i,j)}^* = 10$

(i,j)	1		1		1		1		1		$D_{\phi_k(i,j)}$
(i,j)		1		1		1		1		1	0,55
(i,j)						1	1	1	1	1	0,34

В других работах плотность оценивается как количество частиц, находящихся в окрестности Мура (т. е. соседние 8 ячеек) от рассматриваемой [96], либо как количество частиц, находящихся в определённом направлении на расстоянии r от рассматриваемой [70].

- $k_W \left(1 - \frac{r_{\phi_k(i,j)}^*}{r}\right) A_{\phi_k(i,j)}^{wall}$ — учитывает влияние стен и других препятствий [125]:

1. $k_W \geq 0$ — параметр, определяющий степень влияния стен и препятствий.

2. $1 - \frac{r_{\phi_k(i,j)}^*}{r} \in [0; 1]$ — оценивает близость стен и других препятствий.

Если $r_{\phi_k(i,j)}^* = r$, то $1 - \frac{r_{\phi_k(i,j)}^*}{r} = 0$ — недвижимые препятствия не учитываются. Если $r_{\phi_k(i,j)}^* = 0$, то $1 - \frac{0}{r} = 1$ — в рассматриваемом направлении находится стена. (Данный способ оценивания близости препятствий был взят из работы [70].)

3. $A_{\phi_k(i,j)}^{wall} = \tilde{I}'(\Delta S_{\phi_k(i,j)} - \max \Delta S_{\phi_0(i,j)})(1 - \tilde{I}(D_{\phi_k(i,j)}(r_{\phi_k(i,j)}^*)))$.

$$\tilde{I}'(a) = \begin{cases} 1, & a \geq 0, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad \tilde{I}(a) = \begin{cases} 1, & a \neq 0, \\ 0, & a = 0. \end{cases}$$

$$\max \Delta S_{\phi_0(i,j)} = \max_{k=1,4} \{\Delta S_{\phi_k(i,j)}\},$$

Функция $\tilde{I}'(\Delta S_{\phi_k(i,j)} - \max \Delta S_{i,j})$ следит за тем, чтобы частицы стремились обходить препятствия только, когда двигаются непосредственно в направлении выхода, в других случаях препятствия должны игнорироваться.

$1 - \tilde{I}(D_{\phi_k(i,j)}(r_{\phi_k(i,j)}^*)) = 1$ тогда и только тогда, когда в направлении $\phi_k(i, j)$ нет других частиц на расстоянии $r_{\phi_k(i,j)}^*$. В остальных случаях $1 - \tilde{I}(D_{\phi_k(i,j)}(r_{\phi_k(i,j)}^*)) = 0$ и влияние стен не учитывается.

Таким образом, $A_{\phi_k(i,j)}^{wall}$ учитывает влияние стен и других препятствий только, когда в рассматриваемом направлении нет других частиц и данное направление ведёт к выходу.

Итак, при вычислении переходных вероятностей p_{ϕ_k} учитываются: по-

ле расстояний до выхода S (отвечает за направленное к выходу движение частиц), плотность частиц, влияние стен и других препятствий. При равных параметрах модели k_S, k_P, k_W все эти компоненты имеют равное (по модулю) влияние на значение $p_{\phi_k(i,j)}$. Параметры модели, k_S, k_P, r и k_W изменяются в пределах $[0; \infty)$ и именно они влияют на динамику движения частиц. Поэтому, несмотря на то, что направление движения частицы является случайной величиной, $p_{\phi_k(i,j)}$ вычисляется так, чтобы придавать больший вес нужным направлениям.

Значение $p_{\phi_k(i,j)}$ зависит от текущей обстановки и не зависит от местоположения частицы в пространстве.

Плотность и влияние стен учитываются с отрицательным весом. В FF моделях главной движущей силой для частиц является следование карте местности S на каждом шаге t . Это означает, что направление, которое приближает частицу к выходу, имеет наибольшее значение $p_{\phi_k(i,j)}$. И частицы идут к выходу кратчайшим путём. Но, с другой стороны, часто возникают ситуации, когда движение кратчайшим путем будет долгим. Например, при возникновении заторов, при наличии альтернативного пути. Поэтому уменьшение влияния поля S в направлениях, где наблюдается большое количество частиц или близость препятствий, позволяет частицам передвигаться в более выгодном по времени направлении.

В исходной FF модели при вычислении переходных вероятностей поле S используется следующим образом:

1. Используется поле обратных расстояний (от максимального значения поля отнимается текущее значение), т. е. поле S возрастает при приближении к выходам. Это значит, что направление, ведущее к выходу, имеет наибольшее значение переходной вероятности p_{ϕ_k} . Главной движущей силой для каждой частицы является максимизация поля S на каждом временном шаге. Таким образом, частицы выбирают кратчайший путь к цели следования.

Значение $e^{k_S S_{\phi_k(i,j)}}$ (а значит и $p_{\phi_k(i,j)}$) в большей степени зависит от ме-

стоположения частицы (от её удаленности от выхода) и не зависит от текущей окружающей обстановки. При прочих равных условиях значение $p_{\phi_k(i,j)}$ возле выхода будет больше, чем значение p_{ϕ_k} в дальней точке области.

2. Значение поля S используется в явном виде, что может привести к невычислимости значения $e^{k_S S_{\phi_k(i,j)}}$ (из формулы 1.2 со страницы 27) для больших геометрий расчётной области.

В этом случае необходимо учитывать вычислительные мощности компьютера. Так, если используется двойная точность, степень в экспоненте не может превышать числа ≈ 710 (решение уравнения $e^x = 1,7 \cdot 10^{308}$) и максимальное расстояние до выхода не может превышать 284 м ($710 \cdot 0,4$ м, 0,4 м — размер ячейки). Если используется расширенная точность, тогда степень в экспоненте не может превышать числа ≈ 11356 (решение уравнения $e^x = 1,1 \cdot 10^{4932}$) и максимальное расстояние до выхода может увеличиваться до ≈ 4542 м. Если параметр $k_S > 1$ и есть другие положительные компоненты в формуле переходных вероятностей, тогда моделируемая область уменьшается. Это накладывает ограничение на линейные размеры расчётной области.

С другой стороны, использование поля S в явном виде может привести к несоизмеримости влияния других компонент, входящих в формулу $p_{\phi_k(i,j)}$, что потребует подбора к ним соответствующих коэффициентов (или параметров модели). А при высоких значениях степеней экспоненты x получается большая чувствительность значений $p_{\phi_k(i,j)}$ к x , тем самым увеличивается выбор только определённого направления.

В рассматриваемой модели поле S используется в прямом виде (а не в обратном), т. е. поле S уменьшается при приближении к выходам [124]. Но предлагается заменить явное значение поля S на разницу между текущим значением поля S и значением в соседней ячейке: $\Delta S_{\phi_k(i,j)} = S_{\phi_0(i,j)} - S_{\phi_k(i,j)}$, $k = \overline{1,4}$. $\Delta S_{\phi_0(i,j)} \in [-1; 1]$ и значение экспоненты в формуле переходных

вероятностей легко вычисляется.

Так как поле S отражает расстояние от текущей ячейки до ближайшего выхода и уменьшается при приближении к выходу, тогда $\Delta S_{\phi_k(i,j)} > 0$, если ячейка $\phi_k(i,j)$ находится ближе к выходу, чем текущая (i,j) . $\Delta S_{\phi_k(i,j)} < 0$ означает, что текущая ячейка ближе. $\Delta S_{\phi_k(i,j)} = 0$ — ячейки $\phi_k(i,j)$ и (i,j) находятся на одинаковом расстоянии от выхода. $\Delta S_{\phi_k(i,j)}$ показывает в какой стороне находится выход.

Использование $\Delta S_{\phi_k(i,j)}$ дает вычислительное преимущество перед чистым значением $s_{\phi_k(i,j)}$, хотя с математической точки зрения эти значения эквивалентны. Предположим, что поле S возрастает при приближении к выходам. Пусть

$$\begin{aligned}\Delta S_{\phi_1(i,j)} &= s_{\phi_1(i,j)} - s_{\phi_0(i,j)}, & \Delta S_{\phi_2(i,j)} &= s_{\phi_2(i,j)} - s_{\phi_0(i,j)}, \\ \Delta S_{\phi_3(i,j)} &= s_{\phi_3(i,j)} - s_{\phi_0(i,j)}, & \Delta S_{\phi_4(i,j)} &= s_{\phi_4(i,j)} - s_{\phi_0(i,j)}.\end{aligned}$$

Значит

$$\begin{aligned}s_{\phi_1(i,j)} &= s_{\phi_0(i,j)} + \Delta S_{\phi_1(i,j)}, & s_{\phi_2(i,j)} &= s_{\phi_0(i,j)} + \Delta S_{\phi_2(i,j)}, \\ s_{\phi_3(i,j)} &= s_{\phi_0(i,j)} + \Delta S_{\phi_3(i,j)}, & s_{\phi_4(i,j)} &= s_{\phi_0(i,j)} + \Delta S_{\phi_4(i,j)}.\end{aligned}$$

Следовательно, подставляя в формулу переходных вероятностей, имеем:

$$\begin{aligned}& \frac{e^{kS s_{\phi_1(i,j)}}}{e^{kS s_{\phi_1(i,j)}} + e^{kS s_{\phi_2(i,j)}} + e^{kS s_{\phi_3(i,j)}} + e^{kS s_{\phi_4(i,j)}}} = \\ & \frac{e^{kS(s_{\phi_0(i,j)} + \Delta S_{\phi_1(i,j)})}}{e^{kS(s_{\phi_0(i,j)} + \Delta S_{\phi_1(i,j)})} + e^{kS(s_{\phi_0(i,j)} + \Delta S_{\phi_2(i,j)})} + e^{kS(s_{\phi_0(i,j)} + \Delta S_{\phi_3(i,j)})} + e^{kS(s_{\phi_0(i,j)} + \Delta S_{\phi_4(i,j)})}} = \\ & \frac{e^{kS \Delta S_{\phi_1(i,j)}}}{e^{kS \Delta S_{\phi_1(i,j)}} + e^{kS \Delta S_{\phi_2(i,j)}} + e^{kS \Delta S_{\phi_3(i,j)}} + e^{kS \Delta S_{\phi_4(i,j)}}.\end{aligned}$$

В представленной модели поле S уменьшается при приближении к выходам, поэтому, чтобы $\Delta S_{\phi_k(i,j)}$ показывало направление к выходу, необходимо $\Delta S_{\phi_k(i,j)}$ брать с отрицательным знаком и $\Delta S_{\phi_k(i,j)} = s_{\phi_0(i,j)} - s_{\phi_k(i,j)}$.

2.5 Параметры модели

- $k_S \geq 0$ — параметр чувствительности статического поля S . Определяет степень знания «карты местности» и желание двигаться по направлению к выходу. Чем выше k_S , тем более направленно в совокупности частицы двигаются к выходу. Если $k_S = 0$, то частицы не используют информацию о поле S и двигаются хаотично, случайно, только под влиянием окружающей обстановки (т. е. других частиц и препятствий).
- $k_P \geq 0$ — параметр чувствительности для плотности частиц. Отвечает за психологическое отталкивание между людьми. Чем выше k_P , тем больше проявляется эффект психологического отталкивания между частицами и тем больше разуплотненность частиц. $k_P = 0$ означает, что другие частицы не влияют на выбор направления.
- $r \geq 1, r \in \mathbb{Z}$ — *радиус видимости*. Параметр, определяющий максимальное расстояние, в пределах которого окружающая обстановка влияет на принятие решения о выборе направления. Расстояние измеряется в ячейках. При минимальном значении $r = 1$ берутся в рассмотрение только соседние ячейки. В этом случае движение можно рассматривать, как передвижение в темноте или в условиях плохой видимости.
- $k_W \geq 0$ — параметр чувствительности, определяющий степень влияния стен и других препятствий. Чем выше k_W , тем больше частицы «боятся» стен. $k_W = 0$ — недвижимые препятствия не учитываются.

С помощью параметров можно регулировать направленность движения частиц, учитывать взаимодействие частиц с геометрией пространства и с другими частицами. Варьирование параметрами модели позволяет воспроизводить различные ситуации и стратегии.

Выше уже было отмечено, что при движении люди не всегда используют кратчайший путь. Если использование кратчайшего пути невозможно,

то выбирается альтернативный путь, то есть человек старается минимизировать длину пути и/или минимизировать время пути. В модели такие ситуации воспроизводятся с помощью параметров.

Определим понятия стратегий «кратчайшего пути» и «быстрого пути» формально.

Определение. Для частицы с координатами (i, j) выполняется стратегия «кратчайшего пути» (КП), если $\forall k, k = \overline{1, 4} : s_{\phi_k(i, j)} \geq s_{\phi_k^*(i, j)}, k \neq k^*$.

Параметры модели $k_P \leq k_S, r \geq 1$.

Определение. Для частицы с координатами (i, j) выполняется стратегия «быстрого пути» (БП), если $\exists k, k = \overline{1, 4} : s_{\phi_k(i, j)} \leq s_{\phi_k^*(i, j)}, k \neq k^*$.

Параметры модели $k_P > k_S, r > 1$.

2.6 Статическое поле

Статическое поле S может интерпретироваться, как «карта местности», которая используется для нахождения ближайшего выхода. Оно дискретно и его размеры совпадают с размерами основного пространства, $S = \{s_{ij} : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$. Каждая ячейка поля S содержит кратчайшее расстояние до ближайшего выхода.

Существует несколько способов определения поля S [89]. В данной работе используется подход, предложенный в работе [97], где используется граф видимости и алгоритм Дейкстры [90]. Что позволяет вычислять поле S для любых геометрий пространства.

Говорят, что вершина u видна из v , если отрезок uv не пересекает ни одного препятствия. Граф видимости (англ. *visibility graph*) — граф, вершины которого — вершины полигонов. Между вершинами u и v существует ребро, если из u видна v .

Идея нахождения поля S . На основе массива препятствий W строится граф видимости по следующим правилам. Узлам графа соответствуют все клетки W , где $w_{ij} = 0$ (т. е. все клетки за исключением ячеек-препятствий). Ребра соединяют вершины графа по определённому шаблону: в 4-х точеч-

Таблица 2.3 – Шаблон соседства $T^S(i, j)$ статического поля S относительно ячейки (i, j)

	$(i+2, j-1)$		$(i+2, j+1)$	
$(i+1, j-2)$	$(i+1, j-1)$	$(i+1, j)$	$(i+1, j+1)$	$(i+1, j+2)$
	$(i, j-1)$	(i, j)	$(i, j+1)$	
$(i-1, j-2)$	$(i-1, j-1)$	$(i-1, j)$	$(i-1, j+1)$	$(i-1, j+2)$
	$(i-2, j-1)$		$(i-2, j+1)$	

ном шаблоне ребра соединяют только те вершины, которые расположены вертикально и горизонтально относительно текущей; в 8-ми точечном добавляются диагональные вершины; в 16-ти точечном – к предыдущим связям добавлены переходы «конем», таблица 2.3. При этом ребра не должны пересекать препятствия, таблица 2.4. Вес ребра – это длина пути из текущей вершины до соседней, таблица 2.5. Вершинам, которые соответствуют ячейкам выхода, присваивается значение 1. Далее пошагово перебираются все вершины графа и присваиваются минимальные значения длины пути из текущей до выхода.

Таблица 2.4 – Примеры соседних ячеек, если в шаблон соседства для ячейки (i, j) попали ячейки-препятствия

	1	$(i+1, j)$	1	
	1	(i, j)	$(i, j+1)$	
	$(i-1, j-1)$	$(i-1, j)$	$(i-1, j+1)$	$(i-1, j+2)$
	$(i-2, j-1)$		$(i-2, j+1)$	
	$(i+2, j-1)$		1	
$(i+1, j-2)$	$(i+1, j-1)$	$(i+1, j)$	1	
	$(i, j-1)$	(i, j)	1	
1	1	1	1	
	$(i+2, j-1)$		$(i+2, j+1)$	
$(i+1, j-2)$	$(i+1, j-1)$	$(i+1, j)$	$(i+1, j+1)$	$(i+1, j+2)$
	$(i, j-1)$	(i, j)	$(i, j+1)$	
1	1	1	1	1

Вид S влияет на дальнейшую динамику движения в модели [91]. Рисунок 2.1 показывает, какие изменения происходят с полем S в зависимости

Таблица 2.5 – Длины шагов $\Delta S_{\varphi_k(i,j)}$ из ячейки (i, j) в соответствующие соседние ячейки

	$\sqrt{5}$		$\sqrt{5}$	
$\sqrt{5}$	$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$	$\sqrt{5}$
	1	(i,j)	1	
$\sqrt{5}$	$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$	$\sqrt{5}$
	$\sqrt{5}$		$\sqrt{5}$	

от используемого шаблона для построения графа видимости и веса ребра.

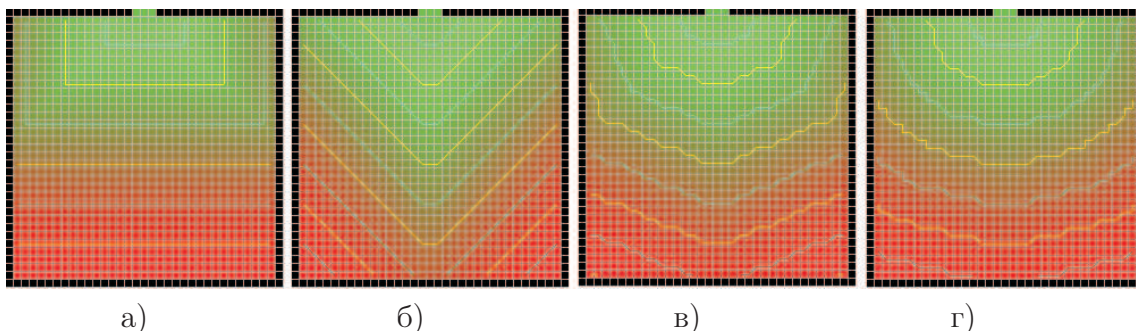


Рисунок 2.1 – Вид поля S в зависимости от шаблона: а) 8-ми точечный, вес всех рёбер равен 1; б) 4-х точечный, вес рёбер равен 1; в) 8-ми точечный, но вес диагональных рёбер равен $\sqrt{2}$; г) 16-ти точечный, вес рёбер для переходов «конём» равен $\sqrt{5}$

В работе при вычислении поля S использовался 16-ти точечный шаблон. Представим алгоритм вычисления поля S .

1. Формируется массив $S = \{s_{ij} : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$, где

$$s_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } w_{ij} = 2; \\ I \cdot J, & \text{иначе.} \end{cases}$$

То есть элементам массива S , которые соответствуют ячейкам выхода, присваивается значение 1; всем остальным приписывают заведомо большие значения $I \cdot J$ (больше, чем предполагаемая длина пути от самой дальней точки до выхода).

2. Для каждой ячейки, где $w_{ij} = 0$, определяется множество соседей $T^S(i, j) = \{\varphi_k(i, j) : k = \overline{1, K}\}$. В общем случае шаблон соседства имеет вид (таблица 2.3): $T^S(i, j) = \{\varphi_k(i, j) : k = \overline{1, 16}\} = \{(i - 2, j - 1), (i - 2, j + 1), (i - 1, j - 2), (i - 1, j - 1), (i - 1, j), (i - 1, j + 1), (i -$

$1, j+2), (i, j-1), (i, j+1), (i+1, j-2), (i+1, j-1), (i+1, j), (i+1, j+1), (i+1, j+2), (i+2, j-1), (i+2, j+1)\}$. Из шаблона исключаются все ячейки, которые являются непроходимыми препятствиями ($w_{ij} = 1$):

$$T^S(i, j) = T^S(i, j) \setminus \varphi_l(i, j), \text{ если } w_{\varphi_l(i, j)} = 1, l = \overline{1, 16}.$$

Также исключаются ячейки, которые не видны за стенами и препятствиями (проверяются ячейки для переходов «конем»):

$$T^S(i, j) = T^S(i, j) \setminus (i+2, j-1), \text{ если } w_{i+1, j-1} = 1 \vee w_{i+1, j} = 1;$$

$$T^S(i, j) = T^S(i, j) \setminus (i+2, j-1), \text{ если } w_{i+1, j-1} = 1 \vee w_{i, j-1} = 1;$$

$$T^S(i, j) = T^S(i, j) \setminus (i-1, j-2), \text{ если } w_{i-1, j-1} = 1 \vee w_{i, j-1} = 1;$$

$$T^S(i, j) = T^S(i, j) \setminus (i-2, j-1), \text{ если } w_{i-1, j-1} = 1 \vee w_{i-1, j} = 1;$$

$$T^S(i, j) = T^S(i, j) \setminus (i-2, j+1), \text{ если } w_{i-1, j+1} = 1 \vee w_{i-1, j} = 1;$$

$$T^S(i, j) = T^S(i, j) \setminus (i-1, j+2), \text{ если } w_{i-1, j+1} = 1 \vee w_{i, j+1} = 1;$$

$$T^S(i, j) = T^S(i, j) \setminus (i+1, j+2), \text{ если } w_{i+1, j+1} = 1 \vee w_{i, j+1} = 1;$$

$$T^S(i, j) = T^S(i, j) \setminus (i+2, j+1), \text{ если } w_{i+1, j+1} = 1 \vee w_{i+1, j} = 1.$$

3. Поле S вычисляется начиная от выходов. Т. е. находится ячейка, у которой есть такая соседняя $\varphi_k(i, j)$, что $s_{\varphi_k(i, j)} \neq I \cdot J$, и для неё вычисляется новое значение s_{ij} :

$$s_{ij} = \begin{cases} s_{ij}, \text{ если } w_{ij} = 1 \vee w_{ij} = 2; \\ \min_k \{s_{\varphi_k(i, j)} + \Delta S_{\varphi_k(i, j)}\}, \text{ для } k = \overline{1, K} : s_{\varphi_k(i, j)} \neq I \cdot J. \end{cases}$$

$\Delta S_{\varphi_k(i, j)}$ — длина пути до соответствующей соседней ячейки $\varphi_k(i, j)$,

таблица 2.5:

$$\Delta S_{\varphi_k} = \begin{cases} 1, \text{ если } \varphi_k = (i, j - 1) \vee \varphi_k = (i - 1, j) \vee \varphi_k = (i, j + 1) \vee \\ \quad \vee \varphi_k = (i + 1, j); \\ \sqrt{2}, \text{ если } \varphi_k = (i - 1, j - 1) \vee \varphi_k = (i - 1, j + 1) \vee \\ \quad \vee \varphi_k = (i + 1, j + 1) \vee \varphi_k = (i + 1, j - 1); \\ \sqrt{5}, \text{ если } \varphi_k = (i + 2, j - 1) \vee \varphi_k = (i + 2, j - 1) \\ \quad \vee \varphi_k = (i - 1, j - 2) \vee \varphi_k = (i - 2, j - 1) \vee \\ \quad \vee \varphi_k = (i - 2, j + 1) \vee \varphi_k = (i - 1, j + 2) \vee \\ \quad \vee \varphi_k = (i + 1, j + 2) \vee \varphi_k = (i + 2, j + 1). \end{cases}$$

Значения s_{ij} вычисляются, пока в массиве S существуют элементы $s_{ij} = I \cdot J$, в которых $w_{ij} = 0$.

2.7 Выводы

В главе представлена стохастическая модель движения людей, основанная на теории клеточных автоматов: постановка задачи, правила переходов, переходные вероятности и способ вычисления статического поля S . Представлены введенные и формализованные понятия стратегии кратчайшего пути, стратегии быстрого пути, стратегии терпеливого человека.

Направление движения рассматривается как случайная величина и определяется на основе переходных вероятностей.

Переход на новые позиции осуществляется посредством правил переходов согласно выбранным направлениям движения.

При построении модели использовались следующие идеи других учёных. Идея поля расстояний до выхода S и экспоненциальная форма переходных вероятностей была взята из FF модели [71], [97]. Из работы [70] была взята идея радиуса видимости r .

При вычислении вероятностей переходов учитывается карта местности поле S , плотность частиц в направлении и близость стен в направлении.

Идея использования этих компонент присутствует в том или ином виде и в других моделях движения людей, но именно взаимодействие параметров модели даёт реализацию введённых стратегий кратчайшего пути и быстрого пути и приводит к более адекватному моделированию динамики движения людей. Параметрами модели можно регулировать динамику движения в зависимости от пространственной ситуации.

При выборе направления для перемещения учитывается текущая ситуация на r ячеек вокруг, а не только в соседних ячейках. Плотность частиц в направлении зависит от близости других частиц к рассматриваемой в радиусе r ячеек и вычисляется с помощью ядерной оценки плотности Розенבלата-Парзена. Влияние стен также учитывается на расстоянии r ячеек, но только когда в рассматриваемом направлении нет других частиц и направление ведёт к выходу (т.е. стены и препятствия позади и сбоку не учитываются). Предложенный новый способ использования поля S снимает ограничения на линейные размеры расчётной области в сравнении с аналогичными моделями.

Правила переходов были модифицированы с целью введения стратегии терпеливого человека. Вероятность остаться на прежнем месте не фиксирована и зависит от окружающей обстановки.

Введенные модификации FF модели позволяют реализовывать не только стратегию кратчайшего пути, но и быстрого пути, стратегию терпеливого человека. Это улучшает качество моделирования движения людей.

Глава 3

Результаты исследования модели на тестовых задачах

3.1 Предварительные замечания

Исследования разработанной модели проводились по следующим направлениям: исследование свойств модели (влияние параметров, осуществление заявленных стратегий движения), исследование на тестовых задачах, сравнение с имеющимися данными натурального эксперимента (например, с фундаментальными диаграммами и качественными характеристиками движения людей в определённых ситуациях), с результатами для других моделей, с Методикой [26], [27].

Тестовая задача должна отражать типичные ситуации, которые встречаются в зданиях и сооружениях. Например, в Методике [26], [27] для определения времени эвакуации всё пространство здания делится на элементарные участки пути. За элементарные участки пути принимаются проход, коридор, дверной проем, лестничный марш, тамбур. Затем находится время движения по таким участкам. Общее время эвакуации складывается из времён движения по отдельным участкам пути.

В работе были выбраны следующие тестовые задачи: прямые участки пути, участки пути с поворотами, сужения пути, пересечение и слияние путей движения людского потока. Движение в зданиях и сооружениях — это движение по таким участкам пути. Корректное моделирование движения

людей на каждом отдельном участке пути обеспечивает корректное моделирование движения людей в целом в зданиях и сооружениях. Также, в качестве тестовой задачи, было выбрано «растекание потока», так как это является важным свойством движения людей, особенно на протяженных участках пути [2]. Тестовые задачи были выбраны на основе работ [1], [2], [42].

Сравнение с данными натурального эксперимента проводилось посредством сравнения модельных результатов с данными фундаментальных диаграмм. ФД отражает результат многократных натуральных экспериментов на определенном участке пути.

При исследовании модели будем пользоваться понятием сценария [139]. *Сценарий* – это пространственная ситуация и условия, в которых находятся частицы, и предписание им определенных действий (например, движение к заданному выходу). Сценарии характеризуются следующим:

- геометрией пространства;
- расположением и плотностью частиц в рассматриваемой области;
- параметрами модели;
- граничными условиями: периодические и открытые;
- заданием определенного выхода группе частиц.

Исследованию подлежали время и динамика частиц в модели. Для этого находились статистические характеристики времени: полигоны частот, математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение. Динамика исследовалась с помощью снимков динамики движения в моменты времени t , частот выбора каждого из возможных направлений, интегральных характеристик движения.

Если не сказано другое, то в сценариях подразумеваются открытые граничные условия.

Введем обозначения:

- t – текущее время, номер итерации в модели;

- T — время, за которое все частицы покинут область, или время, за которое через сечение пройдет K частиц (для периодических граничных условий);
- T_{cp} — математическое ожидание времени, вычисленное по серии из M наблюдений;
- σ_T — среднее квадратическое отклонение времени движения;
- ρ_0 — начальная плотность частиц. Обозначение плотности при открытых граничных условиях;
- ρ — плотность при периодических граничных условиях;
- $J = \frac{N}{T}$, $J_s = \frac{N}{T b}$ — поток и удельный поток (в качестве T может также использоваться и математическое ожидание времени T_{cp} , если оно найдено), N — количество частиц в области, b — ширина сечения;
- fr_{ϕ_k} — частоты выбора каждого из возможных направлений, вычисленные по серии экспериментов.

$$fr_{\phi_k} = \{fr_{i,j}, fr_{i-1,j}, fr_{i,j+1}, fr_{i+1,j}, fr_{i,j-1}\} = \{NO, LF, UP, RT, DN\},$$

$$fr_{\phi_k} = \frac{\sum_{m=1}^M L_{\phi_k}^m}{4 \sum_{k=0}^M \sum_{m=1} L_{\phi_k}^m}, k = \overline{0, 4},$$

где M — число экспериментов в серии, $L_{\phi_k}^m$ — число сдвигов в направлении ϕ_k в m -ом эксперименте серии.

Частоты выбора направлений являются количественным показателем коллективной динамики.

Интегральные характеристики движения:

- интенсивность посещения — все ячейки, в которых находились частицы;
- двигательная активность — ячейки, из которых произошло перемещение;
- простаивание — ячейки, в которых частицы на протяжении одного или

более шага оставались на прежнем месте;

- конфликтность — ячейки, на которые претендовало две или более частицы.

Для нахождения данных характеристик создавались четыре нулевых массива (по размеру равные рассматриваемому пространству). В процессе моделирования движения, если ячейка соответствовала критериям, описанным выше, к её значению прибавлялась единица. Затем массивы усреднялись по соответствующему максимальному значению. В работе используется графическое представление данных массивов. Чем выше значение ячейки, тем интенсивнее её цвет.

Уже упоминалось, что плотность людей может измеряться двумя способами: как отношение суммы площадей горизонтальных проекций людей к площади занимаемого ими участка [$\text{м}^2/\text{м}^2$] (или без указания единиц измерения) и как отношения количества человек к площади занимаемого ими участка [$1/\text{м}^2$]. В работе используются оба вида обозначений. Их следует различать по указанию единиц измерения или его отсутствию. Площадь проекции частицы принимается равной $0,16 \text{ м}^2$.

3.2 Программный комплекс

Представленная модель была реализована программно. Целью создания программы является не только реализация самой модели с визуализацией процесса движения частиц, но и возможность её численного исследования. Программа реализована на языке ActionScript 3.0 на платформе Adobe Flash CS3 (version 9.0).

На рисунках 3.1 и 3.2 представлены диалоговые окна программы. Геометрия пространства выбирается из списка (рисунок 3.1) и загружается на экран кнопкой «Load File». Затем появляется окно, где непосредственно происходит моделирование движения частиц (рисунок 3.2). Там же на экран выводятся интегральные характеристики движения (Occupation,

Trample, Stagnation, Conflict). Кнопка «Start» («Stop») на панели «Run» запускает (останавливает) движение частиц. На панели «Parameters» можно задавать параметры модели, «Size» задаёт размер области геометрии пространства. На панели «Info» отображается текущий шаг (Step), число частиц в области (In field), число сдвигов по направлениям (Up, Lf, Dn, Rt, No) и другие значения.

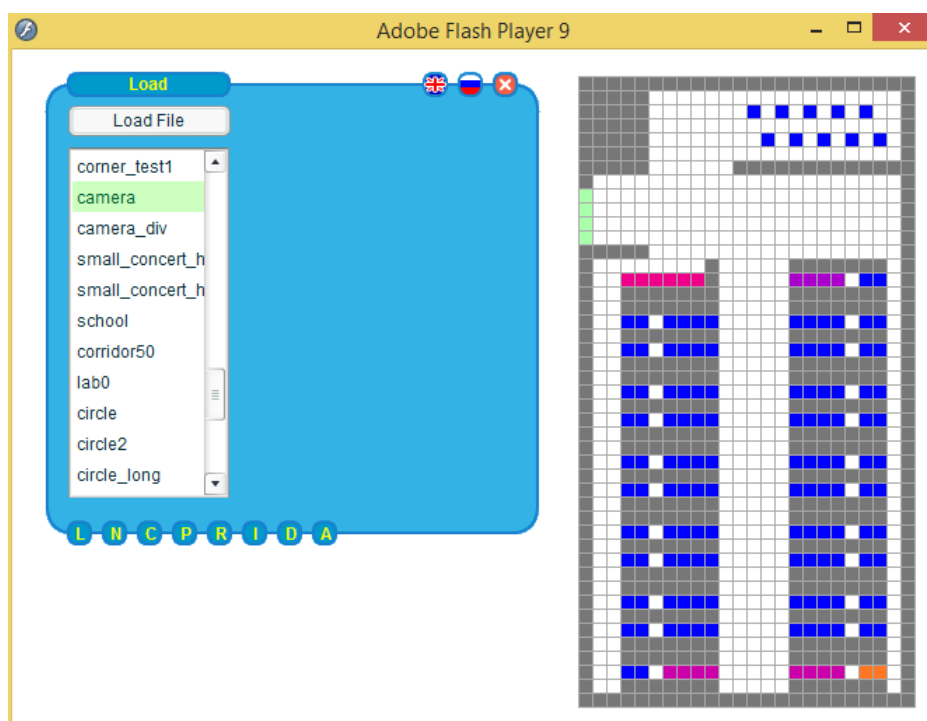


Рисунок 3.1 – Окно выбора геометрии пространства

Программа имеет следующий функционал:

- демонстрация движения при открытых и периодических граничных условиях;
- нахождение интегральных характеристик движения;
- сбор наблюдений: времени T , частот выбора направлений fr_{ϕ_k} при открытых граничных условиях для серии из M экспериментов; времени T , за которое через сечение пройдет K частиц для периодических граничных условий.

На рисунке 3.3 представлена схема функционирования модели.

Исходные данные.

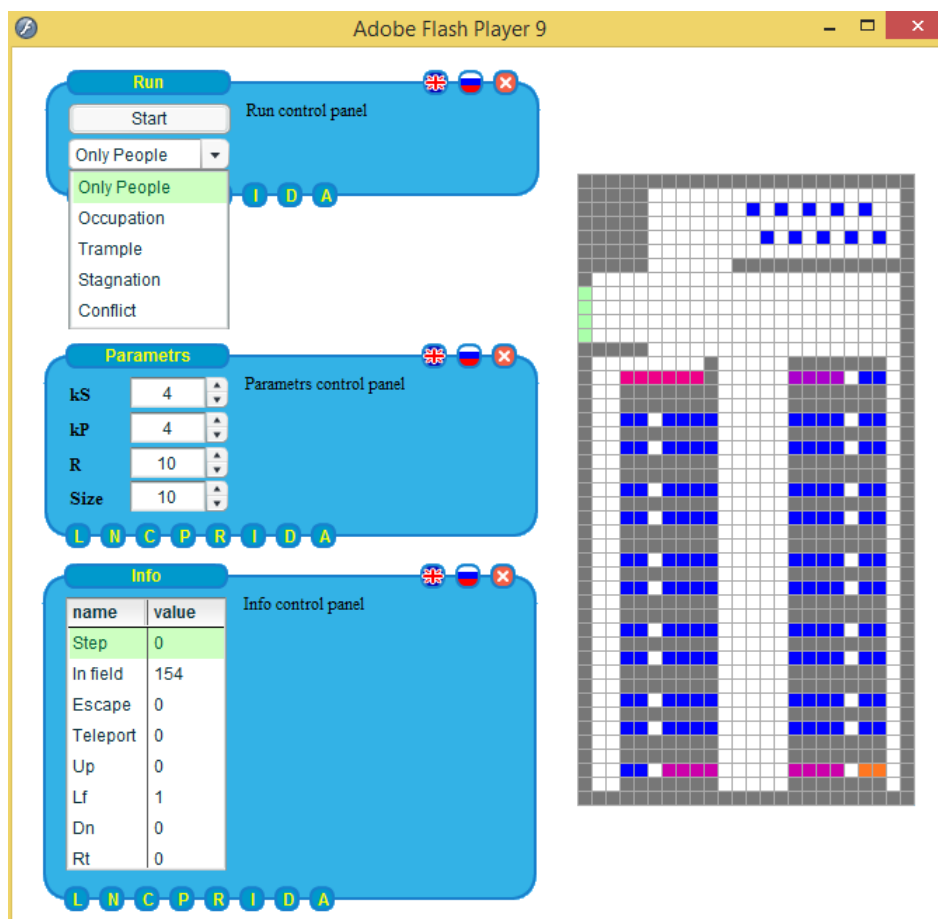


Рисунок 3.2 – Окно моделирования движения людей

Исходные данные включают в себя параметры модели (k_S , k_W , k_P , r), конфигурацию пространства (геометрию и расположение частиц в нем), задание частицам определенных выходов. Исходные данные есть сценарий.

Геометрия пространства и расположение частиц представлены в едином текстовом файле. Там же частицам задается и определенный выход, если необходимо. Каждая ячейка пространства кодируется двумя символами. Первый символ обозначает вид элемента: w — стена или другое препятствие, f — частица, e — выход. В случае периодических граничных условий выход обозначается: c — поглотитель, a — излучатель (попадая в поглотитель c , частица перемещается в случайную ячейку излучателя a). Вторым символом $index$ принимает значения от 0 до 9 и задает номер выхода для частиц и соответствующее ему статическое поле S . Значение $index$ должно совпадать у частиц и соответствующего им выхода. Если индекс равен нулю, то частица идёт в ближайший выход. Таким образом, имеем набор

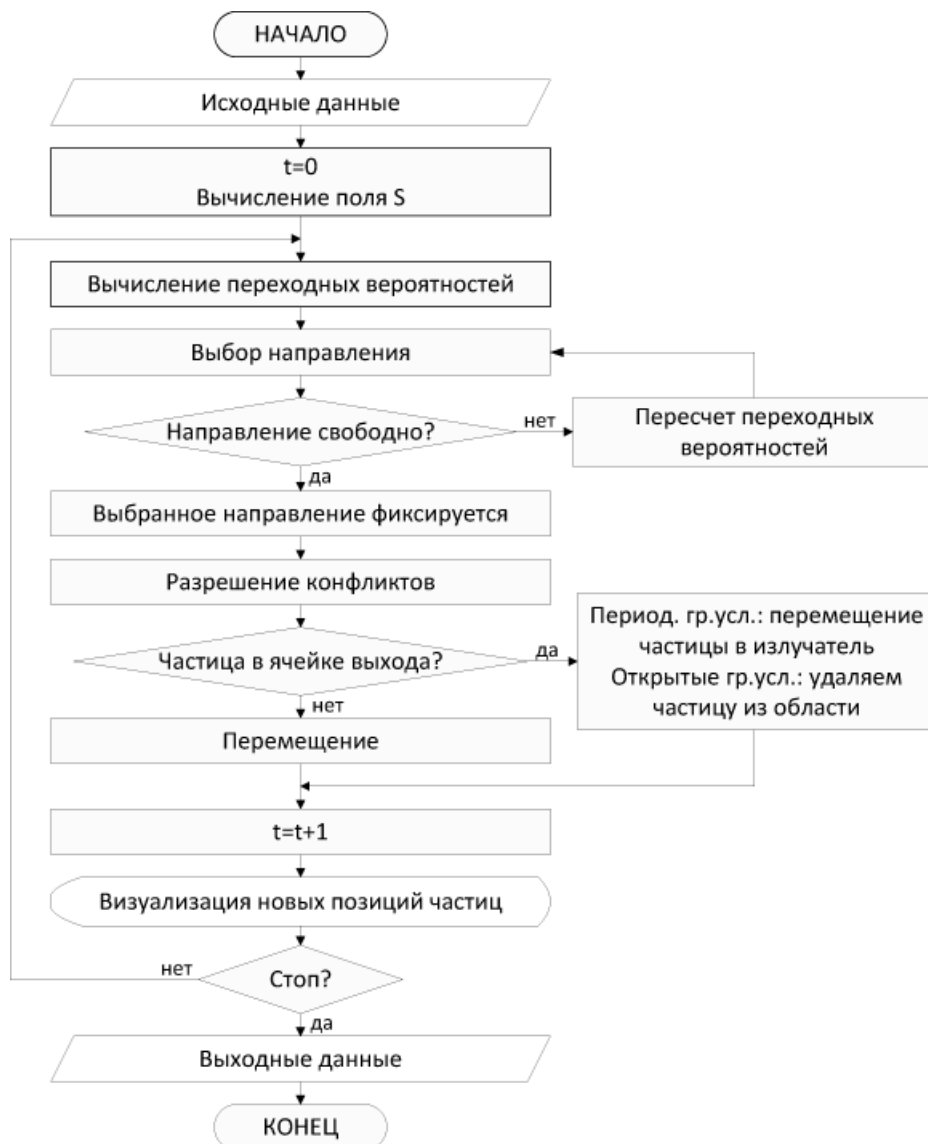


Рисунок 3.3 – Блок-схема модели

полей S^{index} для каждого выхода и общее поле S^0 для всех выходов. Также второй символ используется как индекс цвета. Пустые ячейки обозначаются двумя пробелами.

Таким образом, имеется множество файлов с конфигурациями пространства.

Выходные данные: время T , частоты выбора направлений, интегральные характеристики движения.

Формирование статистических данных проходит следующим образом. Задается число экспериментов M . На выходе работы программы имеем список возможных времен T , где положение в списке обозначает T , а зна-

чение списка — частота встречаемости данного времени; частоты выбора направлений и общее число перемещений, которые суммируются по экспериментам.

Формирование данных для построения ФД: задается количество частиц N , которое убираем из области после прохождения K частиц через сечение. Стоп: в поле осталось меньше, чем N частиц. На выходе: число частиц в области, число частиц прошедших через сечение, время T , за которое эти частицы прошли через сечение.

Полученные данные затем обрабатывались в MS Excel.

Глобальные переменные:

- $\{Data_{ij}^t : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$ — массив для хранения геометрии пространства с расположением частиц в нем на временном шаге t ;
- $\{Index_{ij}^t : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$ — массив, где для соответствующей частицы хранится номер выхода $index$ на временном шаге t . Если частицам не задан определенный выход или выход единственный, тогда массив $Index$ нулевой;
- $\{Dir_{ij}^t : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$ — массив, в котором хранятся все выбранные направления на временном шаге t (т. е. координаты ячеек для перемещения);
- $\{S_{ij}^{index} : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$ — массив, в котором хранится статическое поле S^{index} для определенного выхода;
- $\{Teleport_l^{index} = (x, y), l = \overline{1, L}\}$ — массив, где хранятся координаты соседних от излучателя ячеек;
- $\{Conflict_{ij} : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$ — массив, где хранится интегральная характеристика «конфликтность»;
- $\{Trample_{ij} : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$ — массив, где хранится интегральная характеристика «двигательная активность»;
- $\{Occupation_{ij} : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$ — массив, где хранится интегральная характеристика «интенсивность посещения»;
- $\{Stagnation_{ij} : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$ — массив, где хранится интегральная

характеристика «простаивание»;

- UP, DN, RT, LF, NO – частоты выбора направлений. В начальный момент времени им назначаются нулевые значения;
- K – количество частиц, прошедших через сечение (при периодических граничных условиях).

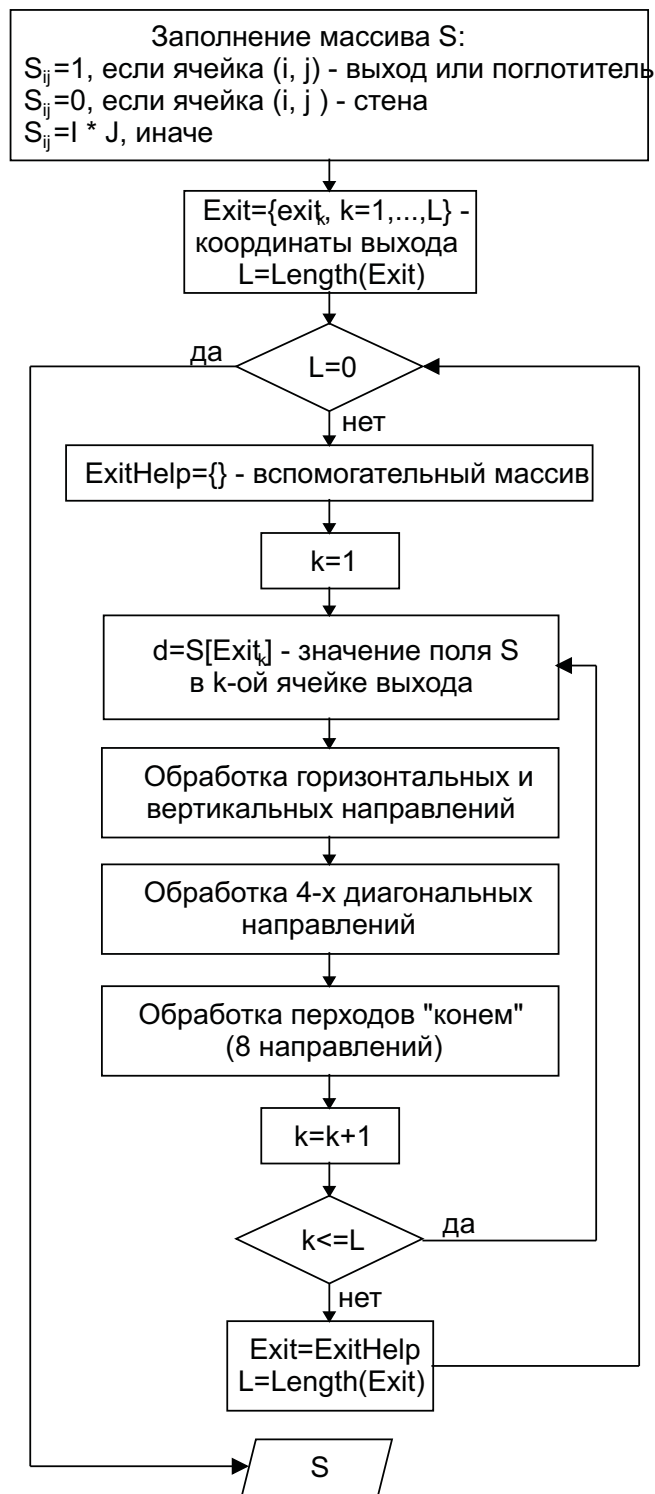
Массивы с верхним индексом t ($Data, Dir, Index$ и остальные, которые будут описаны далее) изменяются на каждом временном шаге (индекс t будем опускать в блок-схемах). Массивы с верхним индексом $index$ вычисляются в самом начале работы алгоритма и не меняются на каждом временном шаге. Массивы для хранения интегральных характеристик в начальный момент времени нулевые и меняют свои значения по ходу работы алгоритма.

Вычисление статического поля S .

На рисунке 3.4 представлена блок-схема расчета статического поля S . $Length()$ – длина массива. На рисунке 3.5 – блок-схемы процедуры обработки горизонтальных/ вертикальных направлений и “переходов конем”. Диагональные направления обрабатываются аналогично горизонтальным и вертикальным со следующими поправками: $Jump = \{(x, y)_k, k = 1, \dots, 4\} = \{(i+1, j+1), (i+1, j-1), (i-1, j-1), (i-1, j+1)\}$, $S((x, y)_k) > d + Sqrt(2)$ и $S((x, y)_k) = d + Sqrt(2)$. d – значение поля S в определенной ячейке выхода.

Фраза с рисунка 3.5б “в направлении $Jump_k$ нет препятствий” интерпретируется следующим образом. Для направления $(i+2, j-1)$ проверяется, чтобы значение $d < s_{i+1, j-1}$ и $d < s_{i+1, j}$, для $(i+1, j-2)$ – $d < s_{i+1, j-1}$ и $d < s_{i, j-1}$, для $(i-1, j-2)$ – $d < s_{i-1, j-1}$ и $d < s_{i, j-1}$, для $(i-2, j-1)$ – $d < s_{i-1, j-1}$ и $d < s_{i-1, j}$, для $(i-2, j+1)$ – $d < s_{i-1, j+1}$ и $d < s_{i-1, j}$, для $(i-1, j+2)$ – $d < s_{i-1, j+1}$ и $d < s_{i, j+1}$, для $(i+1, j+2)$ – $d < s_{i+1, j+1}$ и $d < s_{i, j+1}$, для $(i+2, j+1)$ – $d < s_{i+1, j+1}$ и $d < s_{i+1, j}$.

Если имеется несколько выходов и частицы привязаны к различным выходам, то для каждого выхода вычисляется свое поле S^{index} .

Рисунок 3.4 – Блок-схема вычисления поля S

Расчет переходных вероятностей.

Для каждой частицы вычисляются переходные вероятности. Расчет переходных вероятностей осуществляется согласно формуле 2.1 в описании модели. Каждая частица использует свое поле S^{index} , если необходимо.

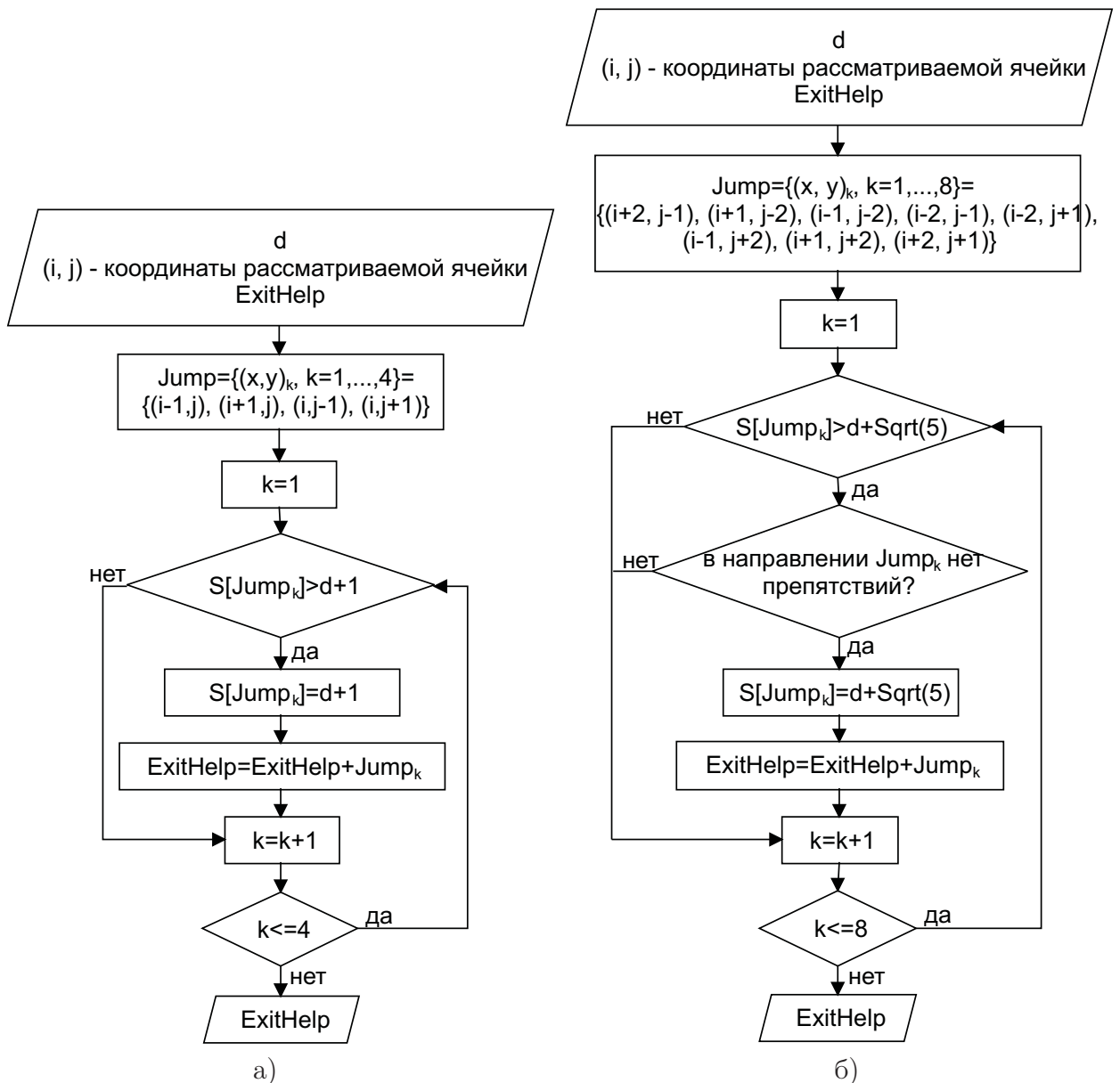


Рисунок 3.5 – Блок-схемы процедур обработки: а) горизонтальных и вертикальных направлений; б) «переходов конем» при вычислении поля S

Необходимо отметить, что если при вычислении элемента r^* попадаем на ячейку выхода или на ячейку поглотителя (для периодических граничных условий), тогда $r^* = r$ и все ячейки «за» выходом считаются свободными.

После расчета переходных вероятностей для каждой частицы с координатами (i, j) имеем распределение вероятностей перехода $\{p_{i-1, j}, p_{i, j+1}, p_{i+1, j}, p_{i, j-1}\}$.

Выбор направлений.

Выбор направления движения осуществляется согласно распределению

направлений для каждой частицы методом Монте-Карло [115]. Алгоритм выбора направлений каждой частицей с реализацией стратегии «терпеливого человека» представлен на рисунке 3.6.

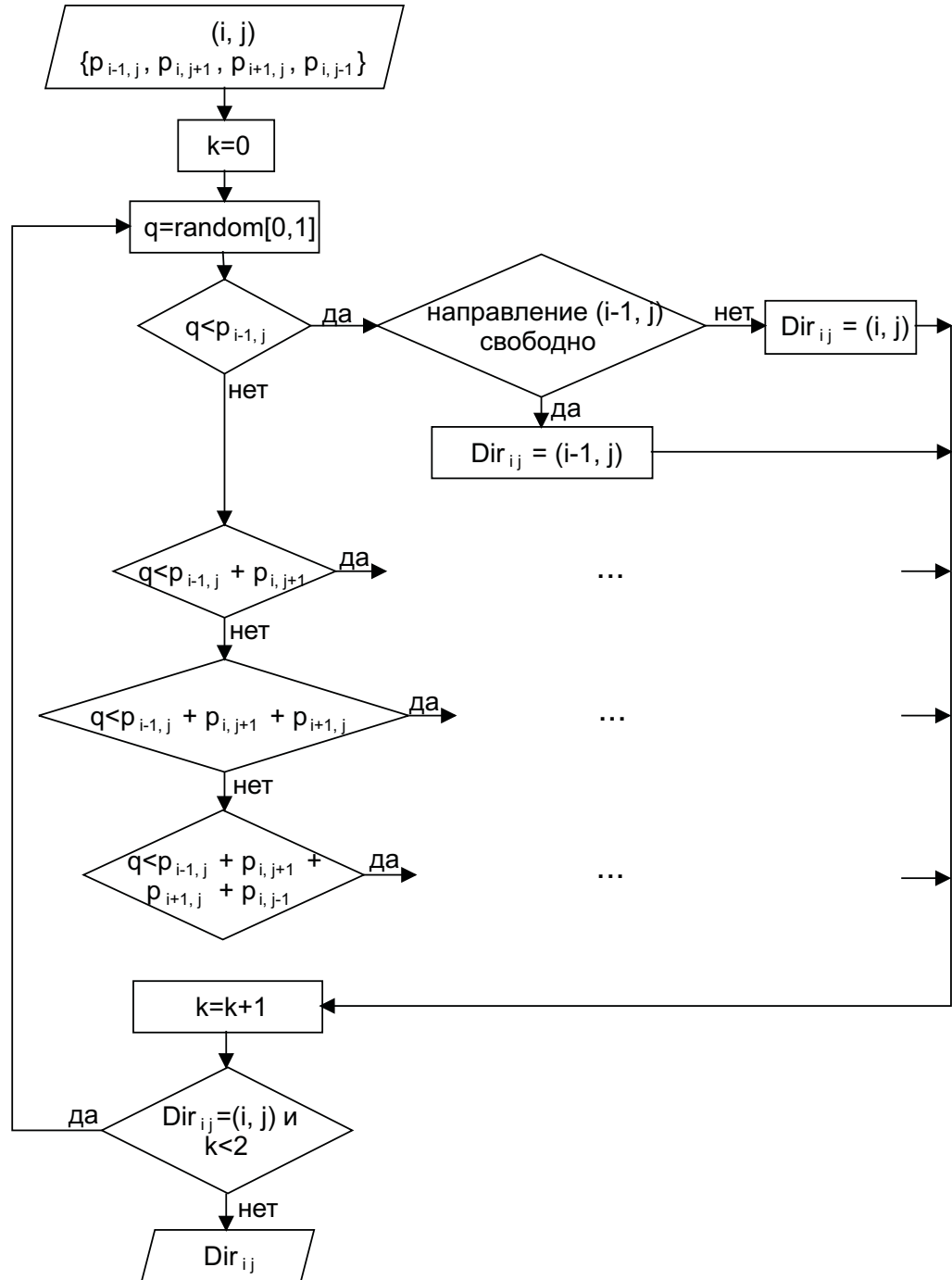


Рисунок 3.6 – Блок-схема выбора направления

Каждая частица выбирает направление перемещения и оно записывается в массив *Dir*. Фраза «направление свободно» означает, что в рассматриваемом направлении нет частиц.

После того как все направления для перемещения выбраны, создается массив $\{Wish_{ij}^t : i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}\}$, где хранится количество претендентов на ячейку (i, j) . Для каждой ячейки проверяется: если $Dir_{ij} = (i - 1, j)$, тогда $Wish_{i-1,j}^t = Wish_{i-1,j}^t + 1$ и так далее для каждого направления. Массив $Wish_{ij}^t$ создается заново на каждом временном шаге.

Разрешение конфликтов.

Для каждой пустой ячейки осуществляется процедура разрешения конфликтов. Если на ячейку (i, j) претендует больше одной частицы ($Wish_{ij}^t > 1$), тогда каждой претендующей частице назначается некоторое случайное значение из $[0; 1]$, соответственно $NWish$, $EWish$, $SWish$ или $WWish$. Затем выбирается максимальное из них $myMax$. Для перемещения выбирается та частица, у которой назначенное случайное значение больше, чем у других.

Блок-схема представлена на рисунке 3.7. Рассмотрим подробно неопи- санные моменты. Если $EWish = myMax$, тогда рассматриваются ячейки с координатами $(i, j - 1)$, $(i - 1, j)$ и $(i, j + 1)$. Для $SWish = myMax$ рассмат- риваются ячейки $(i + 1, j)$, $(i - 1, j)$ и $(i, j - 1)$. Для $WWish = myMax$ — $(i + 1, j)$, $(i - 1, j)$ и $(i, j + 1)$.

Перемещение.

Для каждой частицы осуществляется процедура перемещения на новое место, блок-схема с рисунка 3.8. Процедура перемещения частиц включает в себя не только непосредственно перемещение частицы на новую позицию, но и расчет частот выбора направлений и расчет интегральных характери- стик движения.

$StepN$, $StepE$, $StepS$, $StepW$, $StepNO$ — частоты выбора направлений на временном шаге t . Общие частоты выбора направлений суммируются на шаге t . Также на каждом шаге считается количество частиц в области N и количество частиц K , прошедших через сечение.

При периодических граничных условиях необходимо решать проблему в случае, если частица попала в поглотитель. Когда частица выбирает ячейку

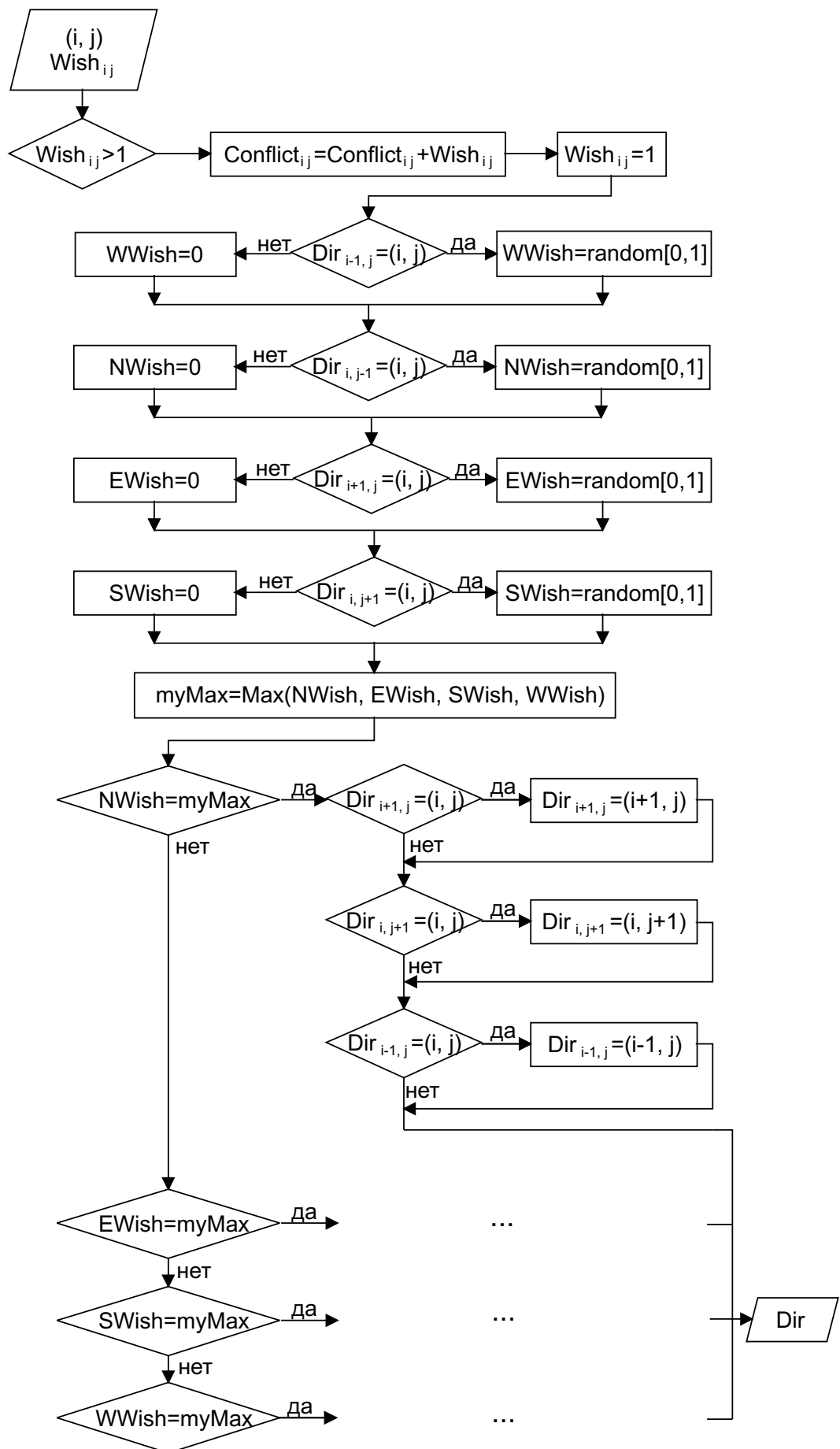


Рисунок 3.7 – Блок-схема разрешения конфликтных ситуаций

ку для перемещения, где находится поглотитель c , реализуется процедура «Process 1», рисунок 3.9. Во всех остальных случаях — «Process 2», рисунок 3.10.

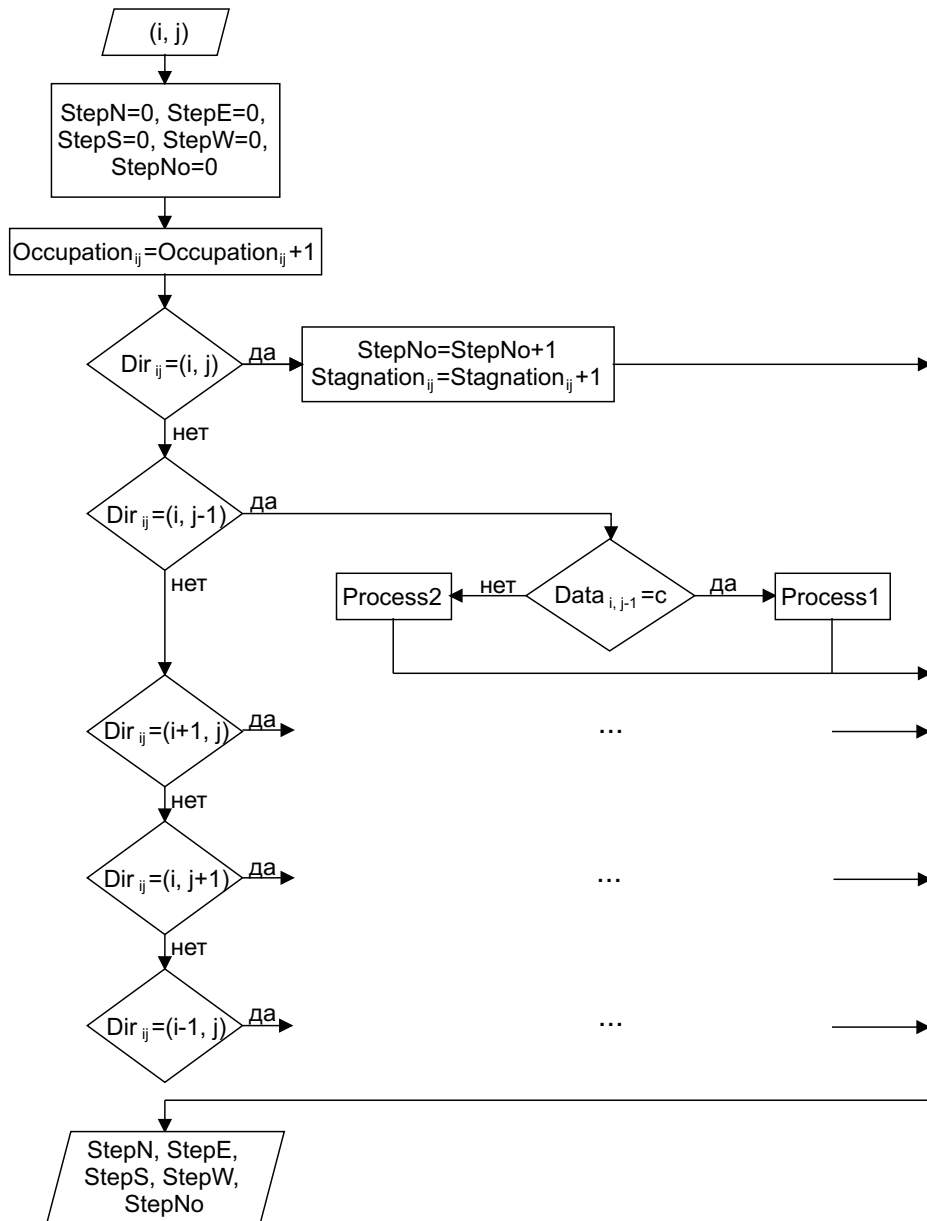


Рисунок 3.8 – Блок-схема перемещения

Условия остановки. Для открытых граничных условий: число частиц в области равно нулю $N = 0$. Для периодических — через сечение прошло заданное количество частиц K . Или принудительный «стоп».

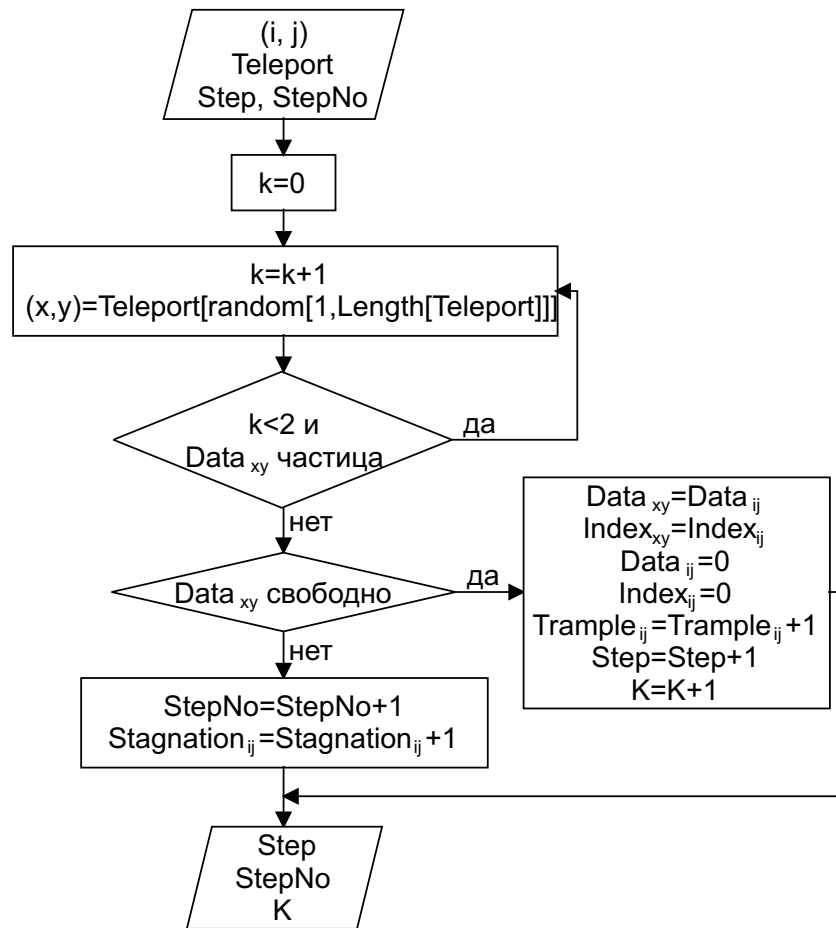


Рисунок 3.9 – Блок-схема «Process 1» из процедуры перемещения

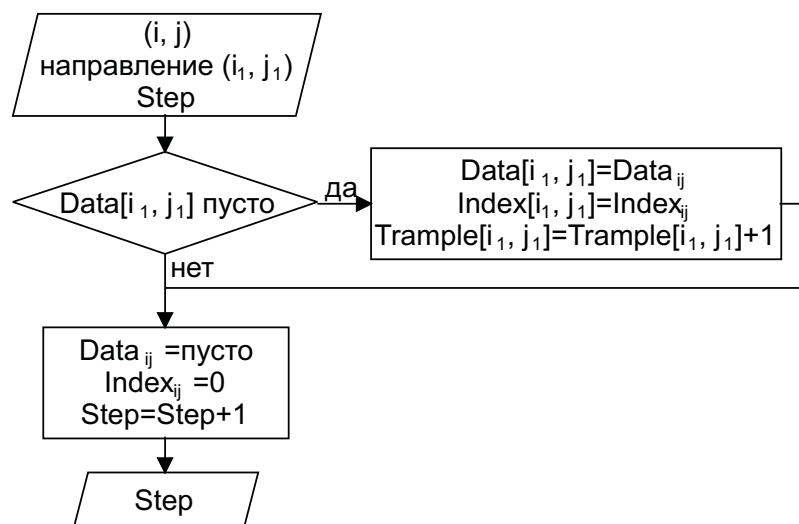


Рисунок 3.10 – Блок-схема «Process 2» из процедуры перемещения

3.3 Квадратная комната. Исследование влияния параметров k_S , k_P и r

Сценарий. Рассматривается квадратная комната 16×16 м² (40×40 ячеек²) с выходом 0,8 м (2 ячейки) посередине стены, рисунок 3.11. В начальный момент времени в ней располагалось $N = 300$ частиц ($\rho_0 \approx 1,17$ [1/м²]), распределенных по всему пространству комнаты в случайном порядке. Параметры модели принимают следующие значения: $k_W = 4$, $k_S = \{1; 3\}$, $k_P = \{0; 2; 8; 12\}$, $r = \{1; 40\}$.

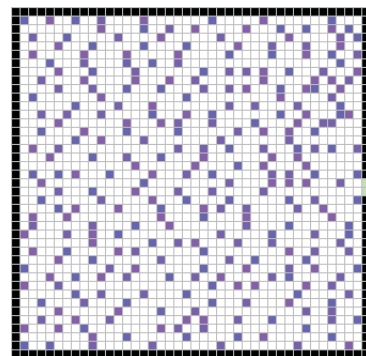


Рисунок 3.11 – Квадратная комната

Для каждого набора параметров было проведено 100 экспериментов.

Результаты. Этот пример показывает влияние параметров модели k_S , k_P и r на её динамику [123], [124].

На рисунке 3.12 представлена интенсивность посещения ячеек при различных параметрах модели. Рисунок 3.13 отражает три стадии динамики движения: в начальный, средний и конечный момент времени. Рисунки дают представление о динамике движения в зависимости от параметров. Видно, что динамика сильно различается при $k_S = 1$ и $k_S = 3$, особенно при $k_P = 0$. Параметры k_P и r также влияют на динамику.

Если $k_P = 0$ и $k_S = 3$, то частицы имеют сильное стремление идти к выходу и при этом «не боятся» других частиц, перед выходом появляется «провал» в интенсивности посещения клеток, рисунок 3.12б-в. Частицы придерживаются стратегии наиболее кратчайшего пути до выхода. При увеличении k_P (при том же k_S) появляется возможность использовать стратегию быстрого пути. Это приводит к перераспределению значения интенсивности посещения клеток по пространству. Параметр $k_S = 1$ означает, что у частиц нет сильного стремления идти к выходу. Увеличение радиуса видимости r приводит к увеличению влияния других частиц и стен, и

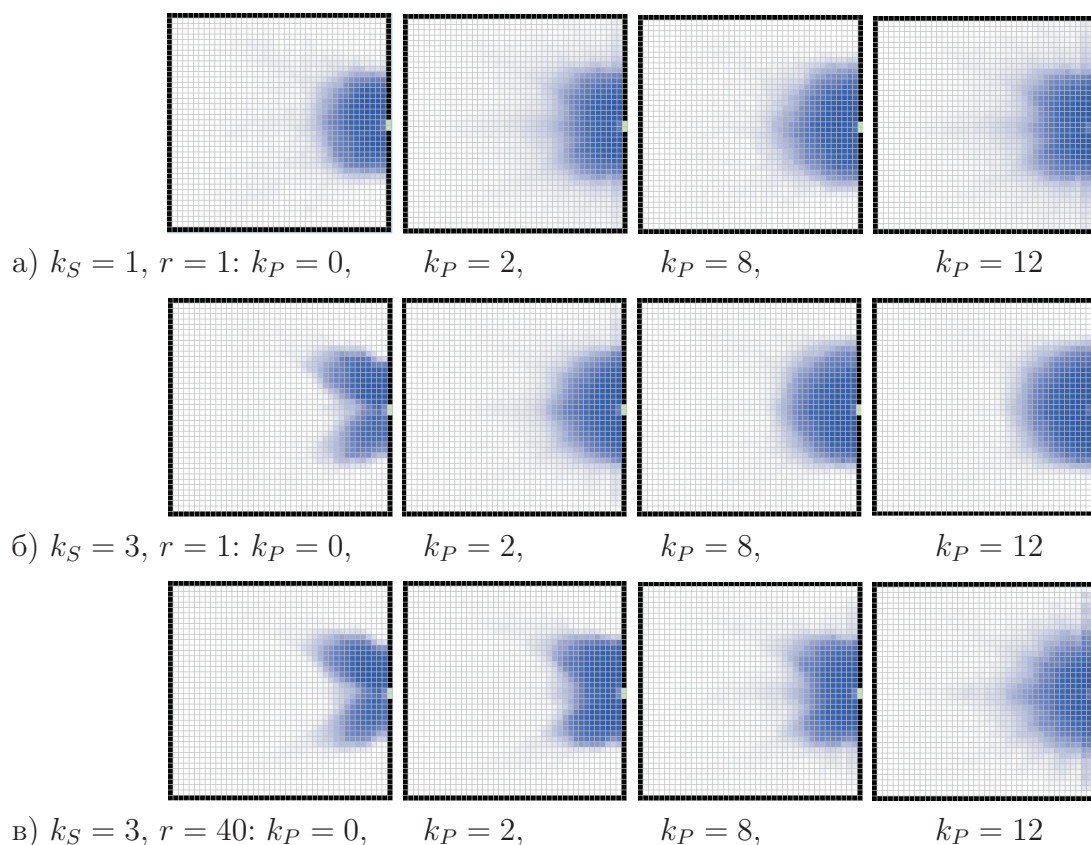


Рисунок 3.12 – Квадратная комната. Интенсивность посещения ячеек пространства

частицы начинают меньше стоять и больше передвигаться.

Все описанное выше также отражается на рисунке 3.14, где показана частота выбора того или иного направления в зависимости от параметров. Увеличение k_S (меры желания двигаться по направлению к выходу) приводит к значительному перераспределению частот. Изменение k_P при неизменных k_S и r также влияет на значение частот: частицы начинают меньше оставаться на прежнем месте и больше передвигаться в других направлениях.

На рисунках 3.12 и 3.13 видно, что перед проемом образуется скопление частиц. Максимальное количество частиц, которые могут покинуть область за один временной шаг, составляет две частицы. Такой пропускной способности недостаточно для беспрепятственного движения 300 частиц и возникает скопление. Частицы перед проемом преимущественно стоят и ждут своей очереди. Поэтому частота NO (остаться на прежнем месте) выше остальных. Это еще говорит и о том, что реализуется стратегия «терпели-

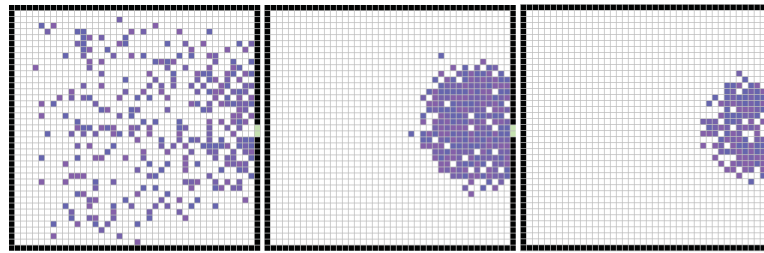
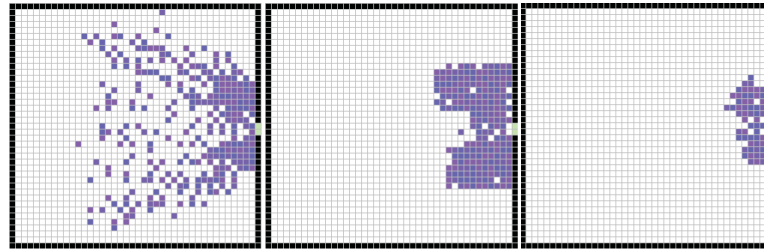
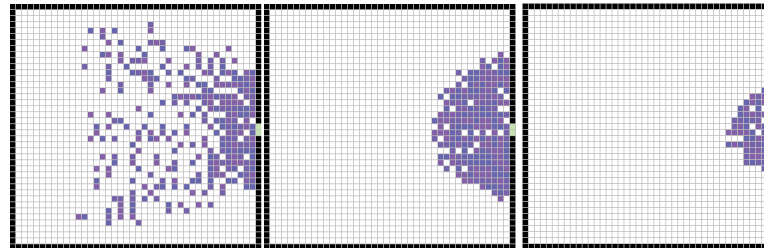
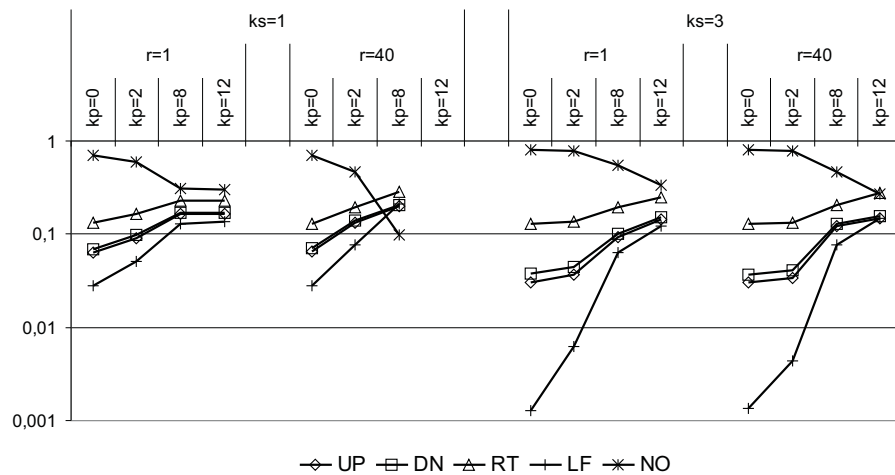
а) $k_S = 1, k_P = 0, r = 1, T = 417$ б) $k_S = 3, k_P = 0, r = 1, T = 315$ в) $k_S = 3, k_P = 2, r = 1, T = 309$ Рисунок 3.13 – Квадратная комната. Динамика движения в начальный ($t = 15$), средний ($t = 100$) и конечный ($t = 250$) моменты времени

Рисунок 3.14 – Квадратная комната. Частоты выбора направлений в зависимости от параметров модели

вого человека» (когда частицы предпочитают оставаться на прежнем месте и ждать, пока желаемое направления освободиться).

Динамика модели очень сильно влияет на время. На рисунках 3.15-3.17 представлены распределения времени, его математическое ожидание T_{cp} и среднее квадратическое отклонение σ_T . Видим, что для одних параметров распределение близко к нормальному ($k_S = 3$). Значит, имеем предсказуемый процесс. Для других параметров процесс движения становится скорее случайным, чем предсказуемым (при $k_S = 1$).

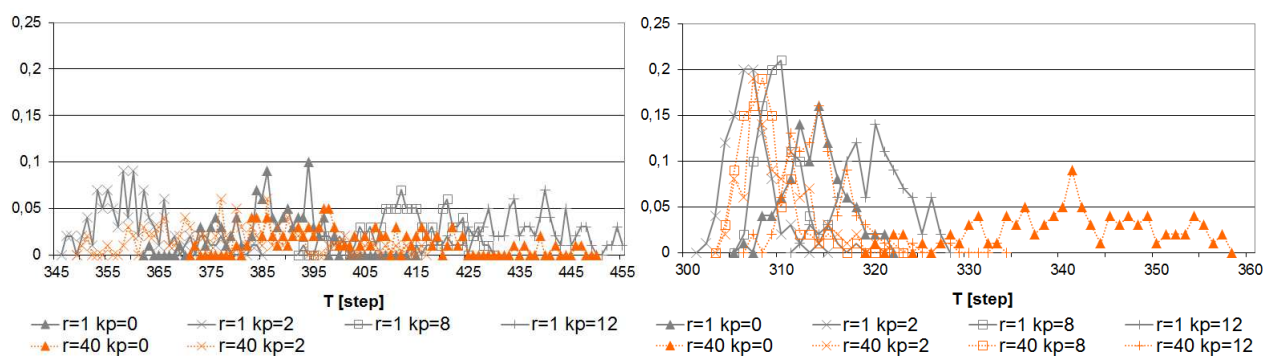


Рисунок 3.15 – Квадратная комната. Распределение времени (полигоны частот) в зависимости от параметров модели, $k_S = 1$ (слева) и $k_S = 3$ (справа)

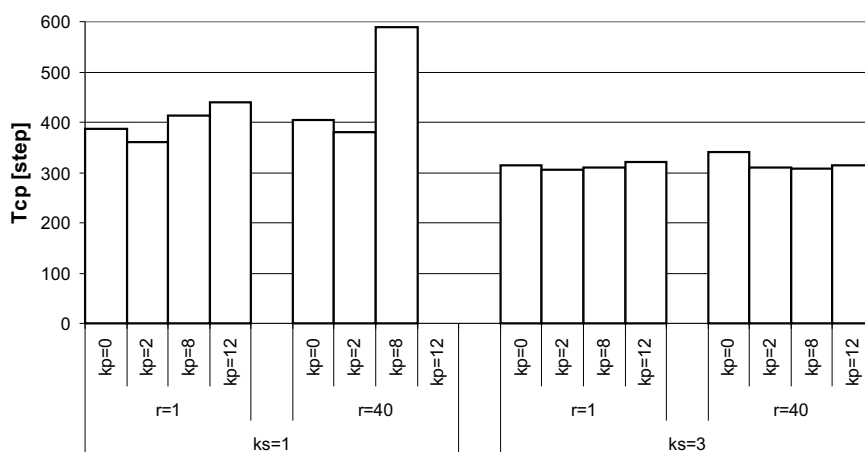


Рисунок 3.16 – Квадратная комната. T_{cp} в зависимости от параметров модели

При $k_S = 1$ время чувствительно к значениям параметров k_P и r . Напомним, что параметр статического поля k_S является главной движущей силой для частиц. Если он минимален, то на движение частиц начинают оказывать большее влияние другие составляющие формулы переходных вероятностей. При $k_P = 8$ и $r = 40$ процесс движения частиц становится

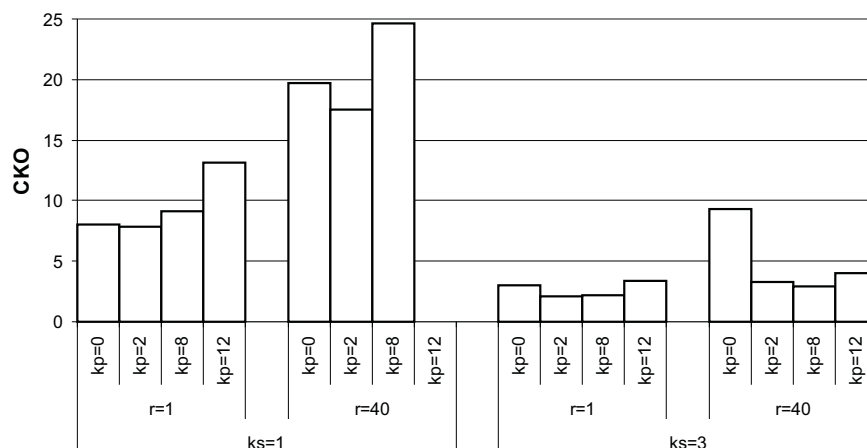


Рисунок 3.17 – Квадратная комната. σ_T в зависимости от параметров модели

хаотичным (увеличивается σ_T , происходит перераспределение частот выбора направлений, частота NO меньше остальных (в то же время для других параметров она выше остальных частот)) и это приводит к увеличению T_{cp} .

При $k_S = 3$ время не сильно зависит от k_P и r . Но при этом изменяется σ_T и распределение времени, а также динамика движения. В данном случае параметры k_P и r в большей степени влияют на динамику движения.

Время T_{cp} достигает своего минимального значения при $k_S = 3$, $k_P = 2$ и $r = 1$.

Итак, можно сделать следующий вывод. Если необходимо воспроизведение направленного движения, то надо повышать параметр статического поля k_S . При минимальных параметрах k_P и r частицы используют стратегию кратчайшего пути. Увеличение этих параметров дает частицам новые возможности для перемещения. Если не учитывать влияние других частиц ($k_P = 0$) или, наоборот, придавать ему большую силу ($k_P \gg k_S$), то частицы при движении используют либо только стратегию кратчайшего пути, либо начинают совершать слишком много передвижений в нецелевых направлениях (UP, DN и LF). И то и другое приводит к увеличению времени T .

3.4 Сравнение стратегий «кратчайшего пути» и «быстрого пути»

Как уже было сказано, при движении люди используют две стратегии: «самый быстрый путь» (БП) и «самый короткий путь» (КП). В зависимости от ситуации человек выбирает либо одну, либо другую стратегию, либо стратегии совпадают. Использование стратегий в модели регулируется с помощью параметров: при $k_P \leq k_S$ реализуется только стратегия КП, при $k_P \gg k_S$ — реализуются обе стратегии (если путь занят, тогда реализуется эффект выталкивания частицы в свободные области, и частица предпринимает обходной маневр, соответствующий стратегии БП). Однако, в действительности последний «сигнал» имеет неоднозначное значение, и поэтому его интерпретация как начало поиска обходного пути бывает ошибочна (например, при образовании затора при сужении прохода поиск обходного пути не требуется). Как следствие, возникает задача об исследовании параметров модели на динамику модели и время в различных пространственных ситуациях в зависимости от плотности частиц в области.



Рисунок 3.18 – Комната в виде прямого коридора длиной 50 м и шириной 2 м

Примером, где стратегии совпадают, является пространство с самой простой геометрией: комната в виде прямого коридора, рисунок 3.18. При более сложной геометрии пространства использование стратегий зависит от ситуации. Так, для примера с рисунка 3.19 возможно более эффективное использование пространства на повороте (1) (рисунок 3.19в), использование обходного пути (2), эффективное использование ширины дверного проема (3), что не может быть реализовано только при помощи стратегии КП.

Рассмотрим эти примеры и сравним полученные результаты [125], [127], [129] - [133], [140].

Сценарий. Рассматривается два примера: комната в виде прямого ко-

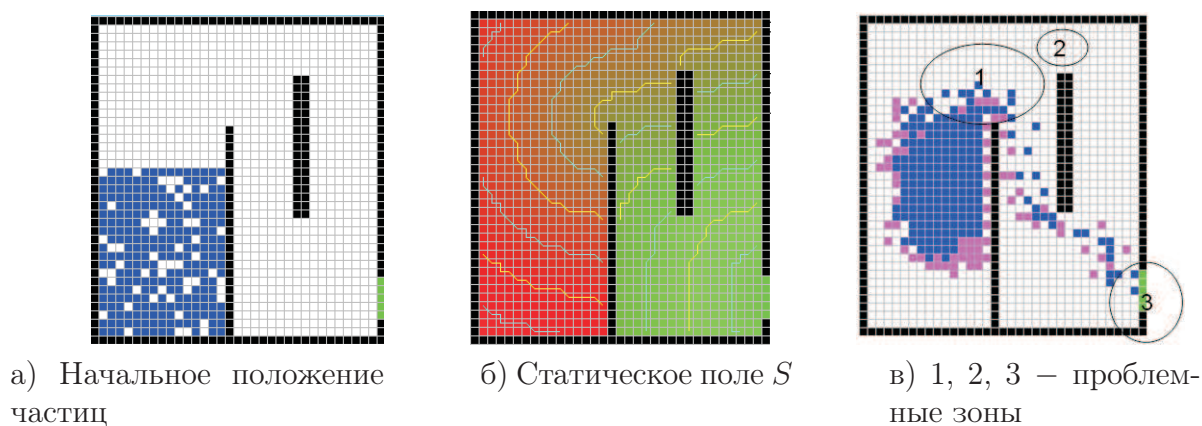


Рисунок 3.19 – Пример геометрии пространства со сложной планировкой

ридора длиной 50 м (125 ячеек) и шириной 2 м (5 ячеек), рисунок 3.18; помещение со сложной планировкой, рисунок 3.19. В коридоре в начальный момент времени частицы были равномерно распределены по всему пространству с различной начальной плотностью, в помещении со сложной планировкой — на участке области, показанном на рисунке 3.19а. Начальная плотность изменялась и $\rho_0 = \{0,04; 0,16; 0,32; 0,4; 0,48; 0,56; 0,64; 0,8; 0,92\}$. Параметры модели $k_S = k_W = 4$. Параметры k_P и r изменялись: для коридора $k_P = \{2; 4; 8; 12\}$, $r = \{1; 4; 7; 10\}$; для помещения со сложной планировкой $k_P = \{2; 6; 8; 12; 14\}$, $r = \{1; 4; 7; 10; 16; 26; 36\}$.

Для каждой плотности и для каждого набора параметров были проведены серии из M экспериментов: для коридора $M = 500$; для помещения со сложной планировкой $M = 300$.

Результаты. По полученным данным были вычислены математические ожидания времени T_{cp} . Рассмотрим как влияет плотность частиц ρ_0 и параметры модели k_P и r на T_{cp} .

Рисунок 3.20 и рисунок 3.21 показывают зависимости T_{cp} от ρ_0 при различных параметрах k_P и r для рассмотренных примеров. Очевидно, что с ростом плотности ρ_0 возрастает и T_{cp} .

Для коридора анализ графиков на рисунке 3.20 показывает, что на плотностях $\rho_0 = 0,04$ и $\rho_0 = 0,16$ значения T_{cp} практически совпадают для различных наборов параметров. При малых плотностях параметры модели не оказывают существенного влияния на динамику модели в данном примере.

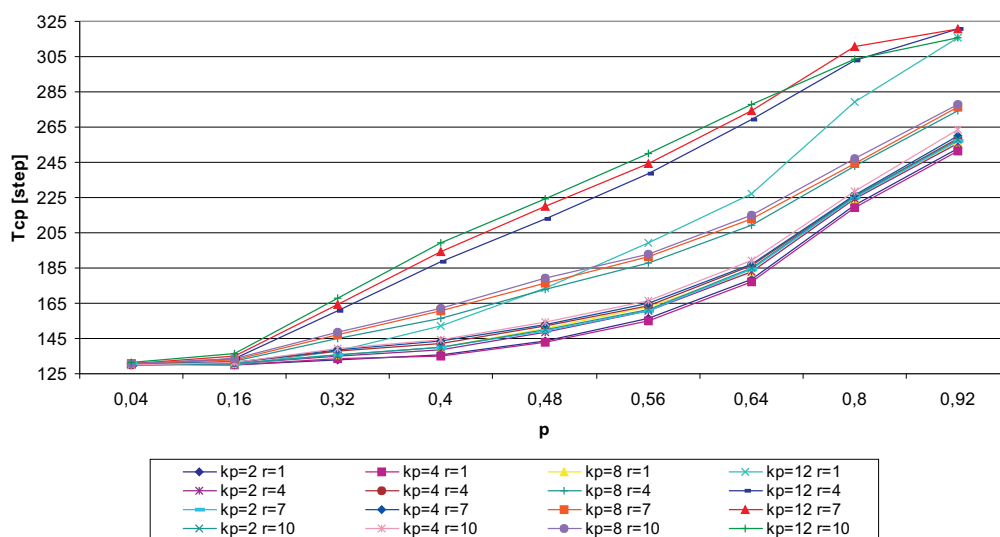


Рисунок 3.20 – Коридор 50 м. Зависимость времени T_{cp} от ρ_0 при различных параметрах k_P и r

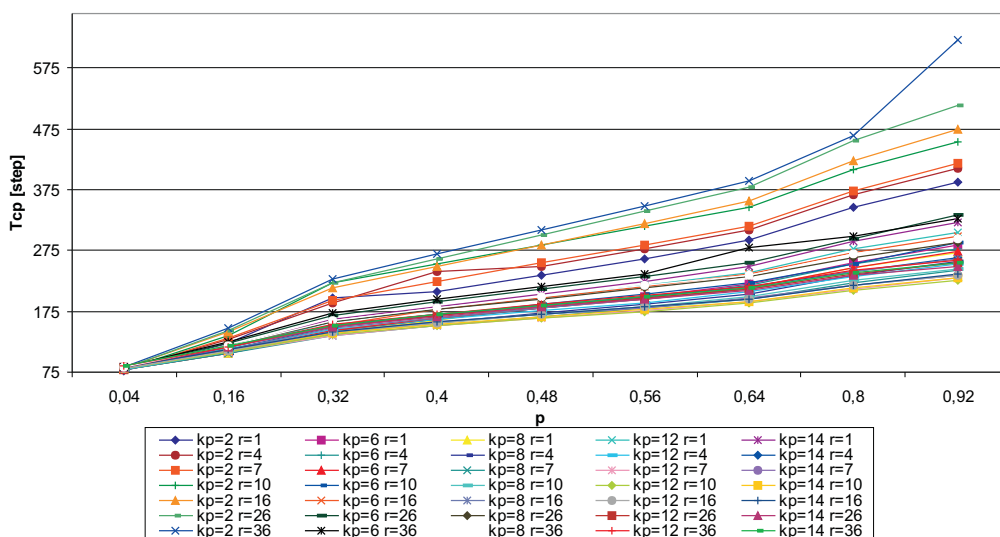


Рисунок 3.21 – Сложная геометрия. Зависимость времени T_{cp} от ρ_0 при различных параметрах k_P и r

Кривые зависимости T_{cp} от ρ_0 можно условно разделить на три «семейства» по параметрам. Первое: $k_P = 2$ и $k_P = 4$ при любых r и $k_P = 8$, $r = 1$; второе: $k_P = 8$ и $r = 4, 7$ и 10 ; третье: $k_P = 12$ и $r = 4, 7$ и 10 . Кривые из третьего «семейства» отличаются от остальных почти линейной зависимостью T_{cp} от ρ_0 на плотностях от $0,16$ до $0,8$. Пара $k_P = 12$, $r = 1$ не принадлежит ни к одному из этих «семейств».

Также отметим, что минимальное время движения из комнаты длиной

50 метров — 125 шагов (50 м = 125 ячеек), минимальное время при максимальной начальной плотности — 250 шагов. Но в силу стохастического характера модели добавляются флуктуации относительно целевого направления, и значения T имеют большие значения.

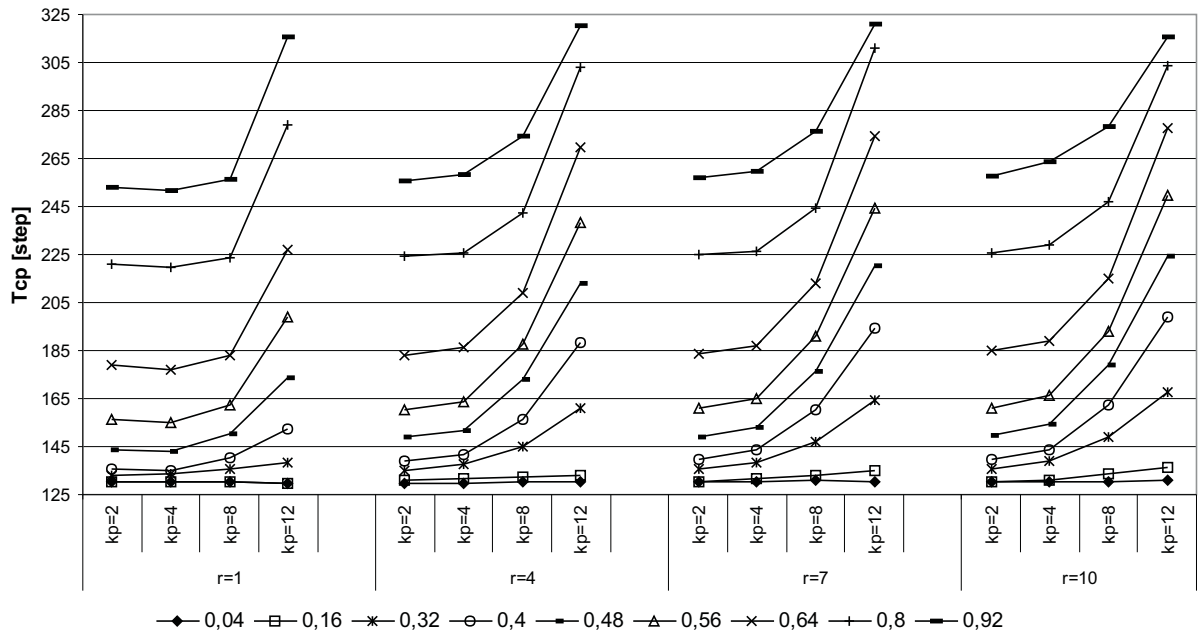
Для сложной геометрии T_{cp} при минимальной начальной плотности $\rho_0 = 0,04$ так же не зависит от параметров модели, рисунок 3.21. С ростом ρ_0 значения T_{cp} в зависимости от параметров начинают различаться, и разница достигает 2,75 раза при максимальной плотности.

Рассмотрим теперь как параметры модели k_P и r влияют на T_{cp} . Рисунок 3.22 и рисунок 3.23 показывают влияние параметров на T_{cp} для коридора и сложной геометрии соответственно. Каждая кривая на графиках соответствует определённой плотности ρ_0 и показывает изменение T_{cp} в зависимости: от параметра k_P при постоянном r , рисунок 3.22а и рисунок 3.23а; от параметра r при постоянном k_P , рисунок 3.22б и рисунок 3.23б.

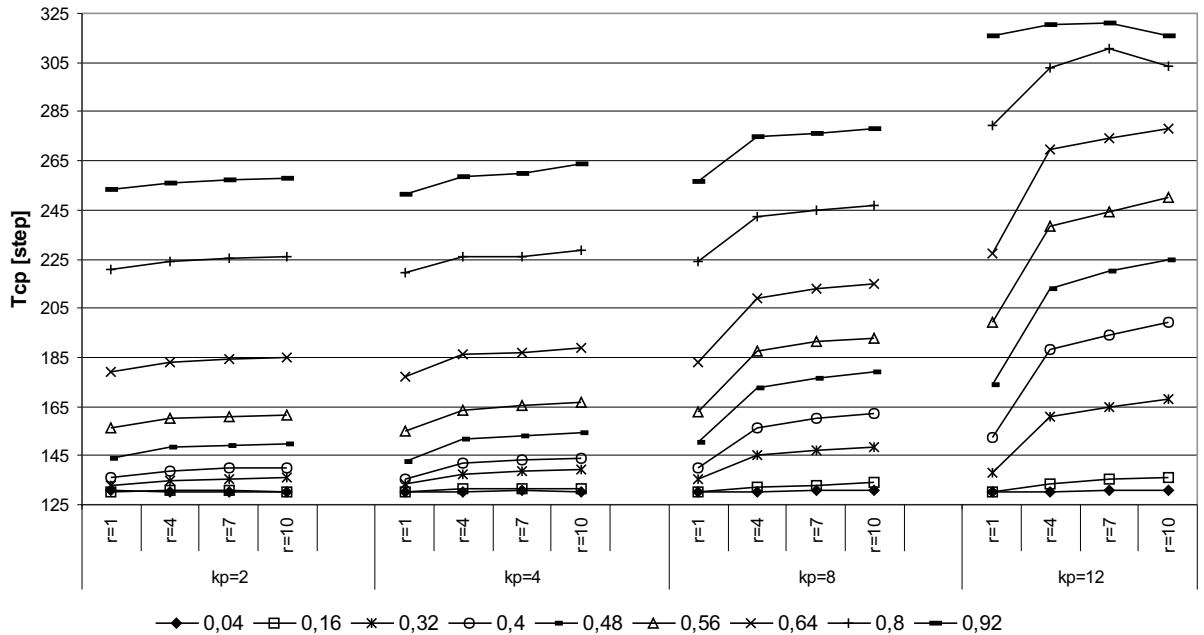
Для коридора при $k_P = 2$ и $k_P = 4$ модель не чувствительна к росту радиуса видимости r , рисунок 3.22б. Влияние r проявляется только при $k_P \geq 8$. В целом, параметр k_P больше влияет на T_{cp} , чем r , рисунок 3.22а. Минимальное T_{cp} , начиная с $\rho_0 = 0,32$, достигается при $r = 1$, $k_P = 2$ и $k_P = 4$; максимальное — при $r = 10$ и $k_P = 12$.

Для сложной геометрии T_{cp} чувствительно к изменению как k_P , так и r , рисунок 3.23. Увеличение k_P до определённого значения уменьшает T_{cp} . Зависимость T_{cp} от радиуса видимости r при фиксированных k_P имеет параболообразный вид, кроме $k_P = 2$, рисунок 3.23б. Отдельно выделяется эксперимент при $k_P = 2$, при котором увеличение радиуса видимости r приводит к прямому увеличению T_{cp} . При минимальной плотности $\rho_0 = 0,04$ модель не чувствительна к параметрам модели k_P и r . Начиная с $\rho_0 = 0,32$, T_{cp} достигает своего минимума при $k_P = 12$, $r = 10$.

Сравнение времен T_{cp} показывает, что пространства со сложной геометрией более чувствительны к параметрам модели k_P и r , чем пространства типа коридор, что особенно проявляется с увеличением начальной плотно-

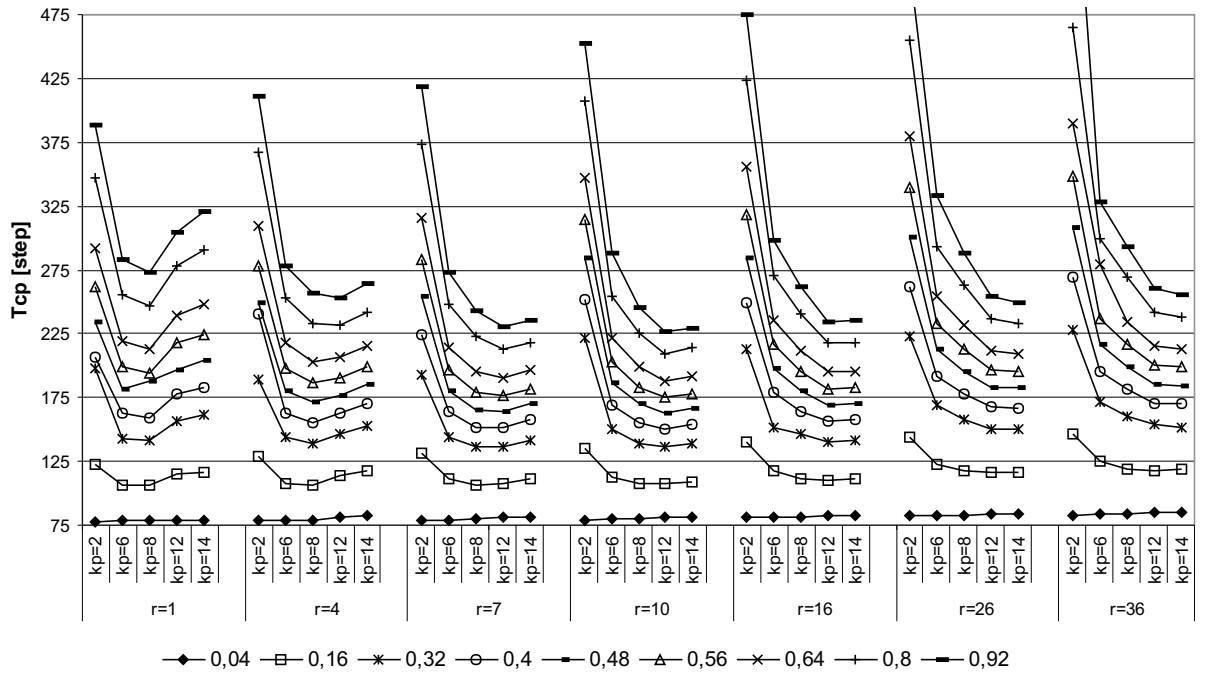


a)

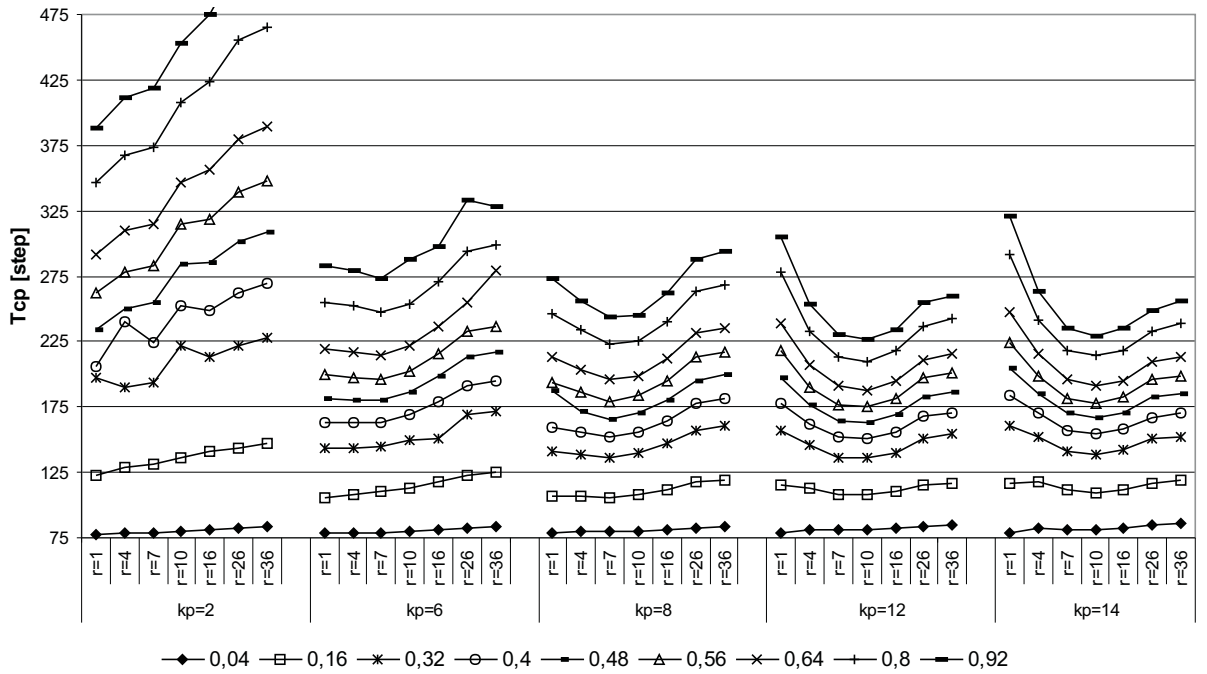


б)

Рисунок 3.22 – Коридор 50 м. Зависимости времени T_{cp} для различных ρ_0 : а) от k_p при фиксированном радиусе видимости r ; б) от радиуса видимости r при фиксированном параметре k_p



a)



б)

Рисунок 3.23 – Сложная геометрия. Зависимости времени T_{cp} для различных ρ_0 : а) от параметра k_p при фиксированном радиусе видимости r ; б) от радиуса видимости r при фиксированном параметре k_p

сти. При этом для каждого примера существует свой набор параметров, при котором T_{cp} принимает минимальное значение. Наибольшее влияние на T_{cp} оказывает параметр k_P , отвечающий за степень влияния плотности частиц. Также в пространствах со сложной геометрией радиус видимости r имеет большее влияние на время, чем в простых пространствах.

Рисунок 3.24 показывает изменение времени T_{cp} в зависимости от параметра k_P для рассмотренных примеров. Увеличение параметра k_P для коридора приводит к увеличению T_{cp} , а для сложной геометрии — к уменьшению T_{cp} .

Рисунки 1 - 3.28 показы-

вают распределение времени T (полигоны частот) для некоторых значений параметров k_P и r (на одном графике представлены полигоны частот для всех рассмотренных начальных плотностей при заданных параметрах k_P и r) и среднее квадратичное отклонение времени σ_T в зависимости от параметра k_P при фиксированных r (графики построены аналогично графикам с рисунка 3.22а и рисунка 3.23а). Распределения времени для всех рассмотренных значений параметров k_P и r представлены в приложении А на рисунках А.1 - А.7.

При определенных значениях k_P и r распределение времени имеет симметричный вид и малое значение σ_T , что свидетельствует о том, что, несмотря на стохастичность, модель дает предсказуемые результаты. σ_T зависит от плотности ρ_0 : увеличивается с ростом ρ_0 . σ_T так же, как и T_{cp} , зависит от параметров модели k_P и r . Влияние параметров на σ_T аналогично их влиянию на T_{cp} . Существенное увеличение σ_T говорит о том, что модель дает результат скорее случайный, чем предсказуемый. Но это так же и

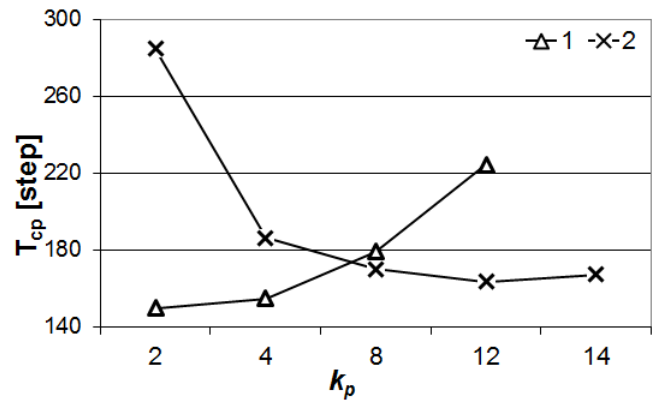


Рисунок 3.24 – T_{cp} для прямого коридора («1») и помещения со сложной планировкой («2») в зависимости от параметра k_P , $r = 10$, $\rho_0 = 0,48$

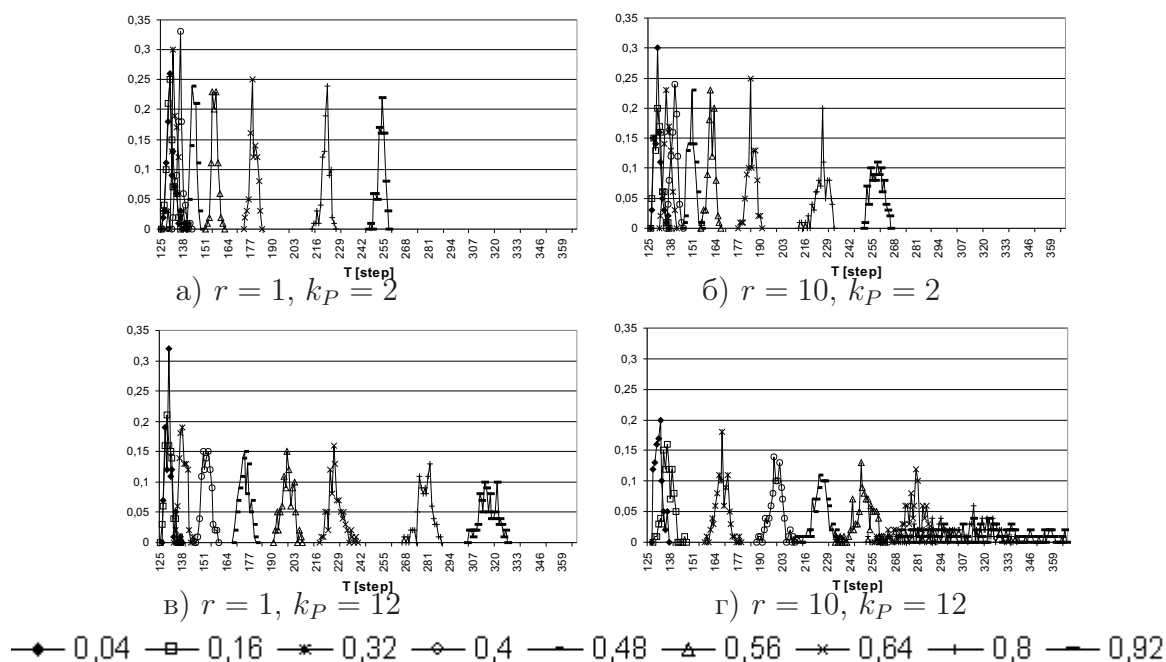


Рисунок 3.25 – Коридор 50 м. Распределение времени (полигоны частот) в зависимости от ρ_0 для различных r, k_P

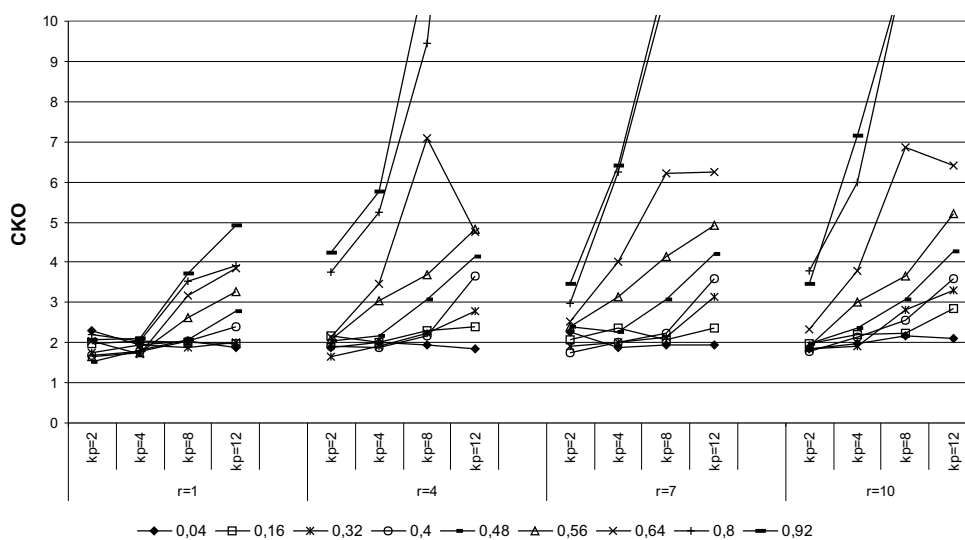


Рисунок 3.26 – Коридор 50 м. Зависимость σ_T (СКО) для различных ρ_0 от k_P при фиксированном r

знак того, что имеется рассогласование между динамикой модели и стратегией, которая предполагается данным видом пути. И проявляется тем ярче, чем выше плотность частиц. Например, для коридора при $k_P = 12$ (когда реализуется стратегия БП) σ_T принимает максимальные значения; для сложной геометрии σ_T принимает максимальные значения при $k_P = 2$

(когда реализуется стратегия КП).

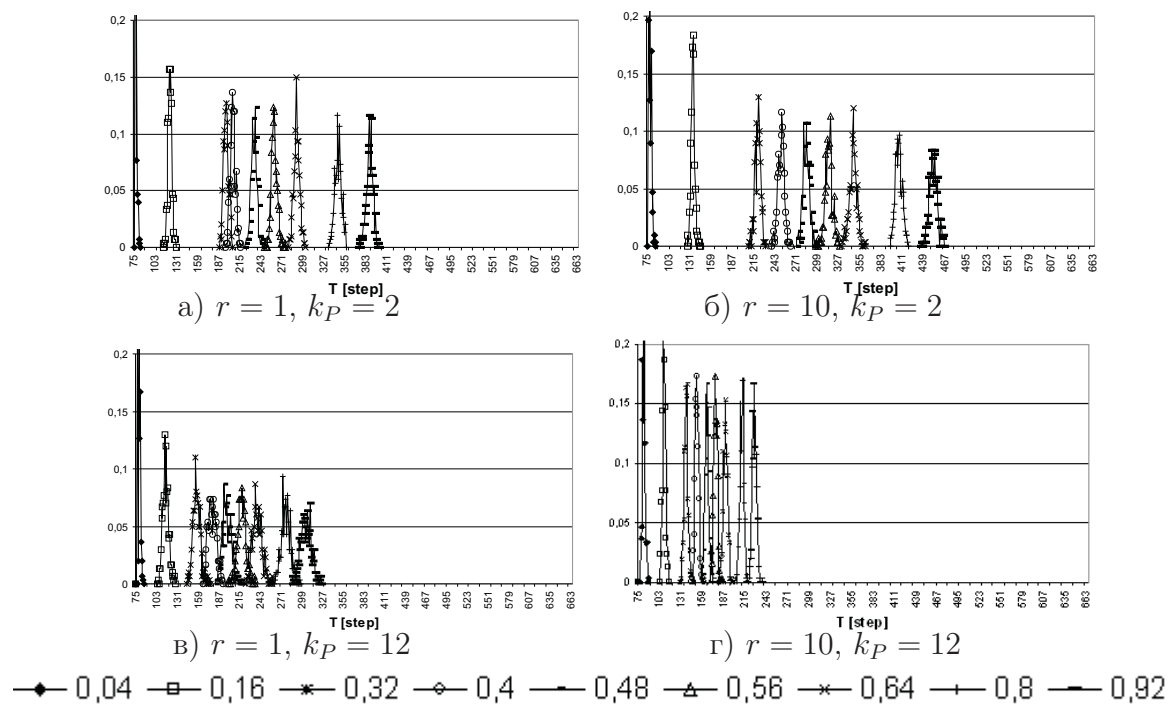


Рисунок 3.27 – Сложная геометрия. Распределение времени (полигоны частот) в зависимости от ρ_0 для различных r, k_P

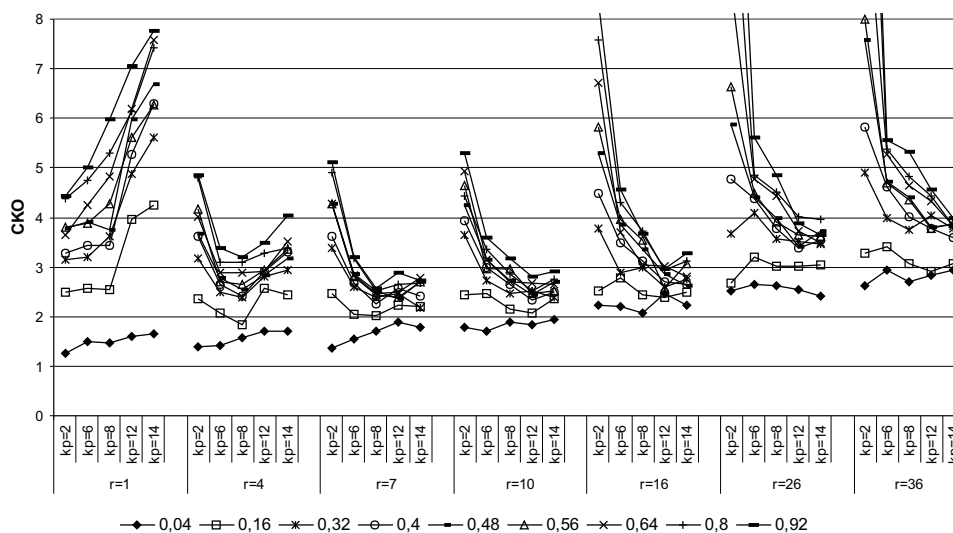


Рисунок 3.28 – Сложная геометрия. Зависимость σ_T (СКО) для различных ρ_0 от k_P при фиксированном r

На рисунке 3.29 показаны интегральные характеристики движения для сложной геометрии пространства в зависимости от параметра k_P (интегральные характеристики движения для всех значений параметров k_P и

r представлены в приложении А на рисунках А.8 - А.10). При минимальном k_P все частицы стремятся идти к выходу по кратчайшему пути, рисунок 3.29а-б. При увеличении данного параметра частицы начинают меньше простаивать (рисунок 3.29в), увеличивается двигательная активность частиц (рисунок 3.29б) и все больше используется пространство. Что и приводит к уменьшению времени T .

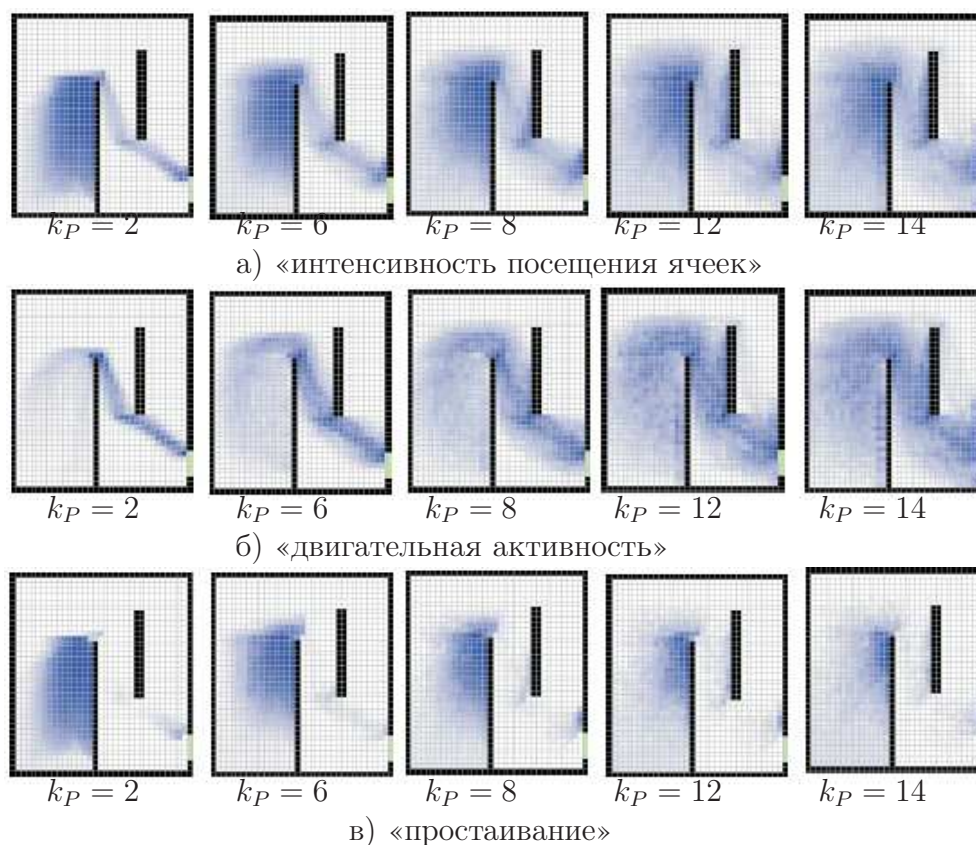


Рисунок 3.29 – Сложная геометрия. Интегральные характеристики движения в зависимости от параметра k_P . $r = 10$, $k_S = k_W = 4$

Рисунок 3.30 отражает частоты выбора направлений для рассмотренных геометрий пространств в зависимости от параметров k_P и r при $\rho_0 = 0,48$.

Для сложной геометрии (рисунок 3.30б), при минимальном k_P , то есть когда реализуется только стратегия КП, частицы очень много стоят на месте (частота НО имеет максимальное значение). Увеличение k_P до 12 приводит к тому, что частицы меньше стоят и все больше перемещаются в других направлениях, то есть выбирают не только самый короткий путь. Увеличение радиуса видимости r до определенного значения приводит к

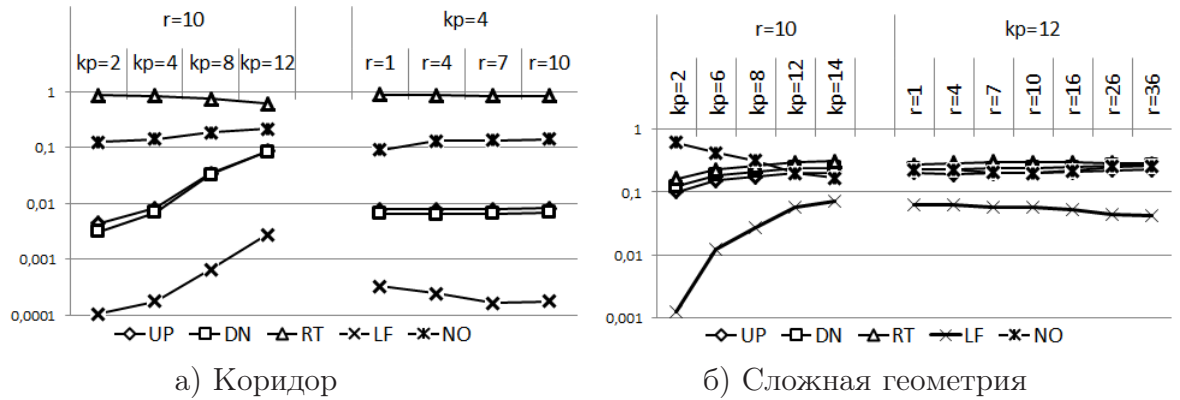


Рисунок 3.30 – Частоты выбора направлений UP, DN, RT, LF, NO в зависимости от параметров k_P и r , $\rho_0 = 0,48$

увеличению частоты выбора главного направления RT (для достижения выхода частицам преимущественно необходимо двигаться на право (RT)). Таким образом, увеличение k_P и r приводит к тому, что пространство используется более эффективно, но, с другой стороны, появляются ненужные колебания и метания частиц, что приводит к неэффективному движению и увеличению времени T .

Для коридора обратная ситуация (рисунок 3.30а). Увеличение параметра k_P , то есть реализация стратегии БП, приводит к тому, что уменьшается частота выбора главного направления RT, а все другие увеличиваются. В итоге динамика модели влияет на время.

В приложении А на рисунках А.11 - А.12 отражены частоты выбора направлений в зависимости от начальной плотности ρ_0 и параметров модели k_P и r .

Таким образом, было показано, что в модели были реализованы две стратегии движения: КП и БП. Выбор стратегий зависит от вида пути и регулируется параметрами модели. Выбор параметров, а значит, и стратегии, влияет на значение времени и динамику модели. Время достигает своего минимума при таких параметрах k_P и r , при которых нет рассогласованности стратегии и вида пути. Так, для прямого коридора, когда требуется только реализация стратегии КП, параметрам следует придавать следующие значения: $k_P \leq k_S$ и $r \geq 1$. В более сложных геометриях,

где предполагается использование стратегии БП: $k_P \gg k_S$ и $r > 1$. При минимальных плотностях выбор стратегии не влияет на время и в одном и другом примере. Пространства со сложной внутренней структурой гораздо более чувствительны к значениям параметров и начальной плотности частиц, чем пространства с простой геометрией.

3.5 Пересечение потоков

В некоторых помещениях имеют место пересекающиеся людские потоки, которые не всегда возможно устранить. Пересечение может происходить под различными углами и возникает тогда, когда имеется несколько источников людских потоков и несколько мест их притяжения.

Характерной особенностью движения пересекающихся потоков является то, что оно протекает при малых плотностях. Установлено предельное значение плотности пересекающихся людских потоков $\rho = 0,357 (= 2,23125 [1/\text{м}^2])$ [2].

В [2] описана качественная картина движения пересекающихся потоков. В местах пересечения образуются так называемые «конфликтные точки». В них достигается наибольшая плотность потоков. Кроме конфликтных точек выделяется вторая, менее уплотненная зона влияния конфликтных точек или зона движения с оптимальной плотностью. В процессе движения пересекающихся людских потоков плотность в конфликтной точке нарастает и начинается «разбухание» потока, при котором траектории движения людей становятся криволинейными, так как люди отклоняются от первоначальной кратчайшей траектории между источником и местом притяжения из-за желания обойти участок с более высокой плотностью. Но при этом люди стремятся двигаться по кратчайшему расстоянию, поэтому зона «разбухания» потока имеет пределы. Поток концентрируется около преимущественного направления движения. Разбухание потока проявляется в основном в случаях, когда зона движения не ограничена.

Будем рассматривать пересекающиеся людские потоки в двух случаях:

в ограниченной и неограниченной зоне движения [138].

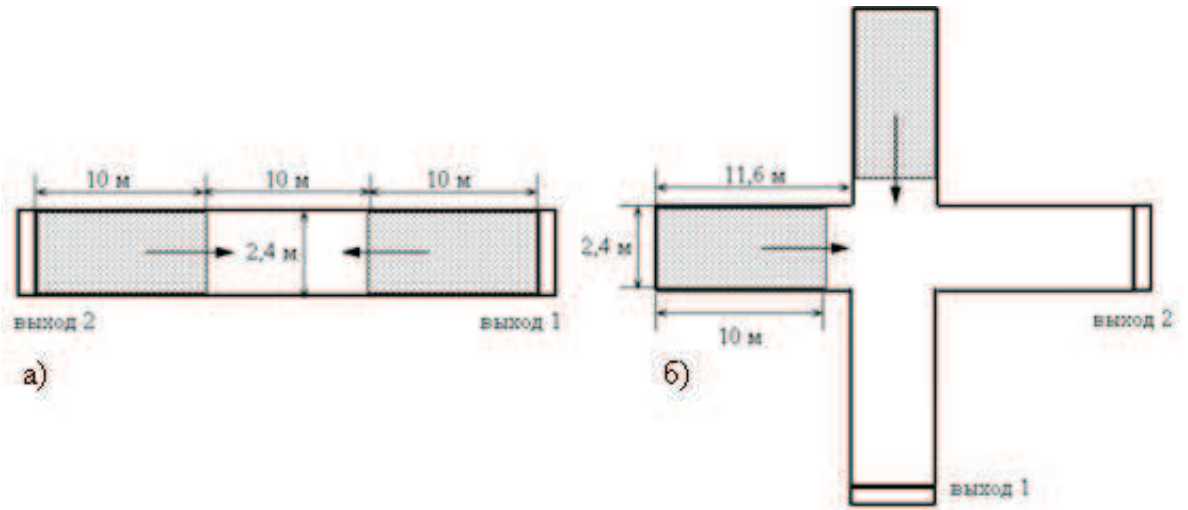


Рисунок 3.31 – Примеры геометрий для ограниченной зоны движения пересекающихся потоков: а) при встречном движении; б) при пересечении потоков под прямым углом

Сценарий 1. В ограниченной зоне движения рассматривалось два случая пересечения потоков: встречное движение (рисунок 3.31а) и пересечение потоков под прямым углом (рисунок 3.31б). Стрелками показаны направления движения потоков. В начальный момент времени частицы равномерно располагались на определенных участках геометрии пространства (выделенные области на рисунках) с заданной плотностью, $\rho_0 = \{0,5; 1; 1,5; 2; 3\}$ [1/м²]. Параметры модели $k_S = k_W = 4$, $k_P = \{4; 12\}$, $r = \{1; 10\}$.

Результаты. *Встречное движение в ограниченной зоне.*

На рисунке 3.32а показано T_{cp} (по 10 экспериментам) в зависимости от начальной плотности потоков и параметров модели. Зависимость T_{cp} от ρ_0 чувствительна к параметрам модели. Существует плотность (определенная для каждой пары параметров k_P , r), при которой происходит блокировка движения: время становится очень большим. Для параметров $k_P = 4$, $r = 1$ и $r = 10$ она составляет 1 [1/м²], для $k_P = 12$, $r = 1$ и $r = 10$ – 2 [1/м²]. Движение в модели с большей плотностью возможно, когда параметры модели допускают разуплотнение частиц ($k_P = 12$) и, соответственно, в месте пересечения образуется такая плотность, при которой возможно движение. Если нет достаточного разуплотнения (при $k_P = 4$, то есть когда используется только стратегия кратчайшего пути), частицы блокируют

движение друг друга.

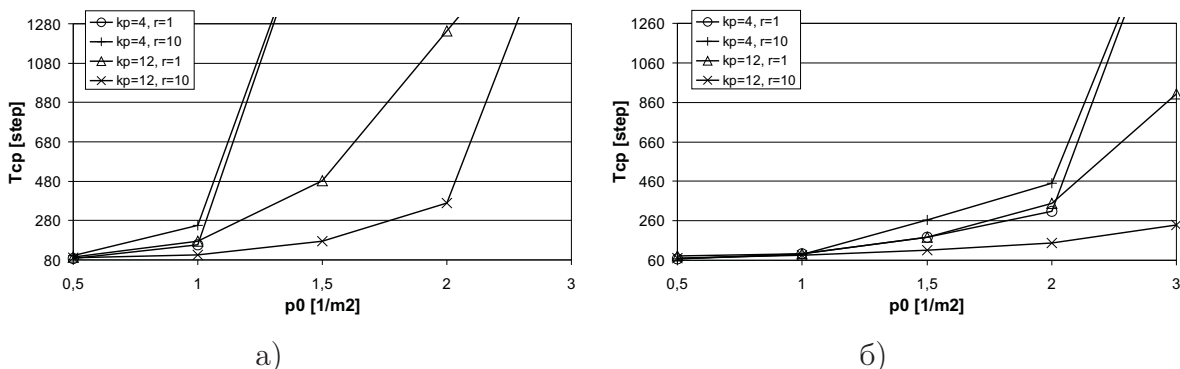


Рисунок 3.32 – Пересечение потоков в ограниченном пространстве. $T_{cp}(\rho_0)$ для различных параметров модели k_P и r : а) при встречном движении потоков; б) при пересечении потоков под прямым углом

Пересечение потоков в ограниченной зоне

На рисунке 3.32б показано T_{cp} (по 10 экспериментам) в зависимости от начальной плотности потоков и параметров модели. С ростом плотности время растет. Но плотность, при которой происходит блокировка движения, выше, чем в предыдущем примере. Для некоторых параметров модели ($k_P = 12$, $r = 1$ и $r = 10$) при рассмотренных начальных плотностях блокировки движения не происходит. Это объясняется тем, что в данном примере, в отличие от предыдущего, больше свободного пространства и, следовательно, больше возможностей для движения.

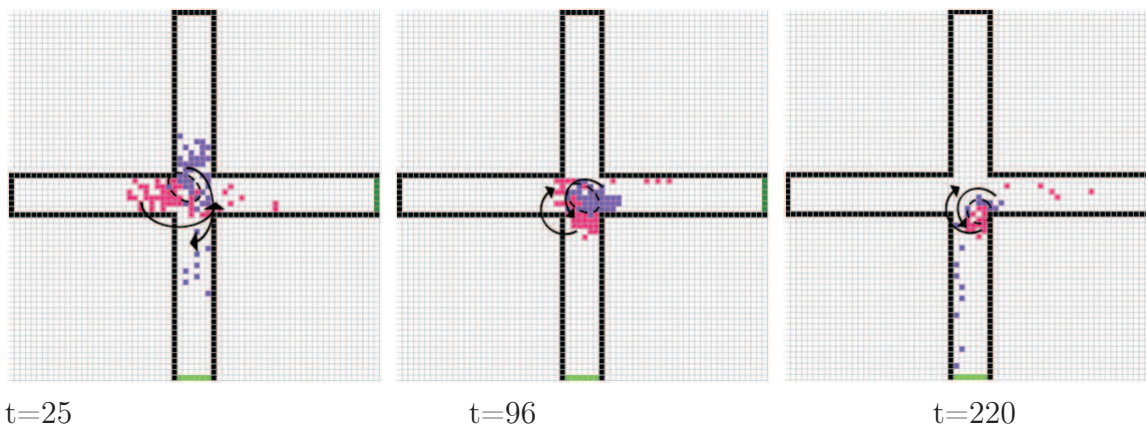


Рисунок 3.33 – Пересечение потоков. а), б) движение пересекающихся под прямым углом потоков в ограниченном пространстве в моменты времени $t = 6, 25, 96$ и 220 , $\rho_0 = 2 [1/M^2]$, $T = 300$, стрелками показаны направления движения потоков, пунктиром – место затора

Рассмотрим динамику движения частиц при $\rho_0 = 2 [1/M^2]$ и $k_P = 4$,

$r = 1$ (рисунок 3.33). При данных условиях не происходит блокировки движения. После того, как потоки встречаются в месте пересечения двух путей движения, образуется скопление частиц, которое частицы обходят справа по ходу движения (рисунок 3.33 $t = 25$). В результате этого место затора постепенно перемещается (рисунок 3.33 $t = 96$) и, чтобы обойти затор, частицам приходится менять свое направление движения (рисунок 3.33 $t = 96$ и $t = 220$).

Таким образом, было показано, что в модели существует предел плотности пересекающихся потоков, который при определенных параметрах модели соответствует значению, полученному в ходе натуральных наблюдений.

Сценарий 2. В случае неограниченной зоны движения рассматривалась большая квадратная комната, в которой было два источника потоков и, соответственно, две точки притяжения (рисунок 3.34а). Пересечение потоков было организовано под прямым углом. Стрелками показаны направления движения потоков. Параметры модели $k_S = k_W = 4$, $k_P = 4$, $r = 10$. Граничные условия – периодические. (Такие граничные условия были выбраны для того, чтобы процесс пересечения потоков вышел на установившийся режим.)

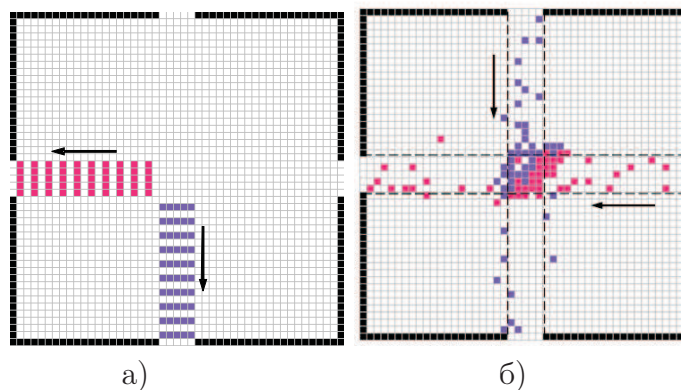


Рисунок 3.34 – Тестовый пример для неограниченной зоны пересечения потоков:
а) $t = 0$; б) $t = 235$

Результаты. В этом примере пересечение потоков происходит по следующей схеме: рисунок 3.34б. Пунктиром показана область кратчайшего пути следования, стрелками – направление движения. Количество частиц в области небольшое, но, тем не менее, в точке пересечения потоков образу-

ется плотная область. Встречные потоки частиц блокируют движение друг друга, и вокруг этого места образуется скопление частиц с большей плотностью — конфликтная точка пересекающихся потоков. Частицы, идущие следом, начинают обходить его. Но при этом они стараются держаться в области кратчайшего пути следования к своей точке притяжения. Образовавшееся скопление мешает им это делать, поэтому возле конфликтной точки траектории движения выходят за зону кратчайшего пути, и образуется так называемая зона влияния конфликтной точки. Можно сказать, что данный процесс соответствует натурным наблюдениям, описанным в [2].

3.6 Слияние потоков

В [2] слияние потоков описывается следующим образом. Слияние людских потоков происходит на участках, где соединяются несколько путей и идущие по ним потоки, слившись в общий поток, затем идут по общему пути. Здесь возможны два случая: беспрепятственное движение или образование скопления людей перед границей участка, где происходит слияние. При слиянии величина объединенного потока равна сумме величин сливающихся потоков, если ширина участка, на границе которого они сливаются, достаточна для беспрепятственного движения. Если же пропускная способность участка недостаточна (т. е. когда сумма величин сливающихся потоков больше, чем величина объединенного потока), то перед его границей образуется скопление и происходит задержка движения. Необходимо отметить, что процесс слияния потоков людей очень сложен и устойчивая его закономерность прослеживается не всегда.

Сценарий. Рассматривалось три примера слияния потоков: объединение потоков из трех коридоров (рисунок 3.35а), объединение потоков из двух коридоров различным способом (рисунок 3.35б и рисунок 3.35в) [138]. В выделенных областях находились частицы. Стрелками показаны направления движения. Назовем примеры «*ABC*», «*AB*» и «*AC*» соответственно. В каждом из коридоров располагалось различное количество частиц: 20,

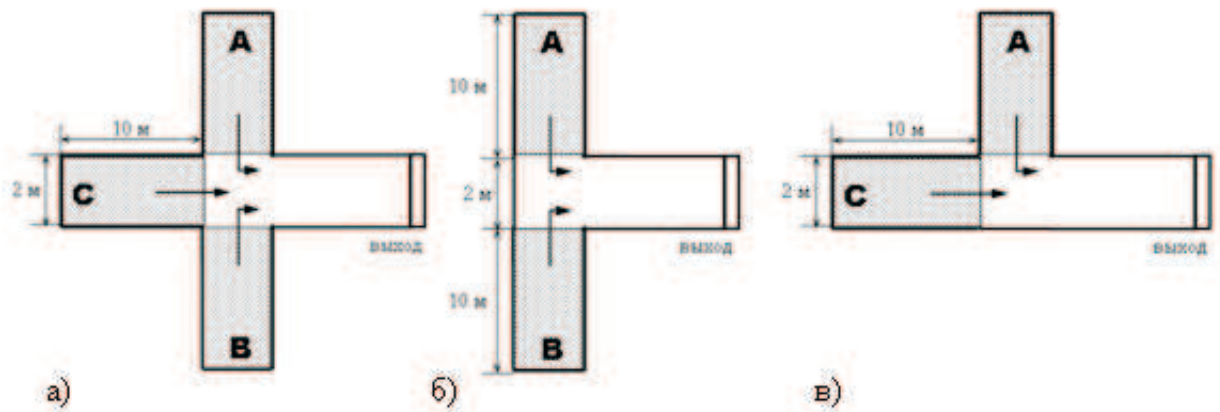


Рисунок 3.35 – Примеры геометрий и расположение частиц по коридорам: а) «ABC»; б) «AB»; в) «AC»

40, 60 и 80, что соответствует значению плотности ρ_0 равному 1, 2, 3 и 4 [1/м²]. Параметры модели $k_S = k_W = k_P = 4$, $r = 1$.

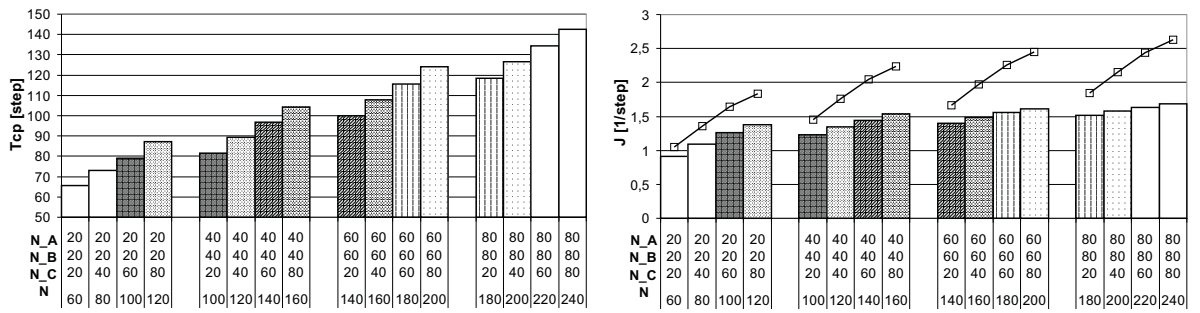
Также, с целью нахождения потоков из коридоров A , B и C , было реализовано движение частиц отдельно из каждого коридора (без слияния) в тех же геометриях пространства.

Обозначим за N – общее количество частиц в области, N_A , N_B , N_C – количество частиц в соответствующем коридоре. J_A , J_B , J_C – величины потоков из соответствующих коридоров, J_{ABC} , J_{AB} , J_{AC} – величины объединенных потоков для соответствующих геометрий.

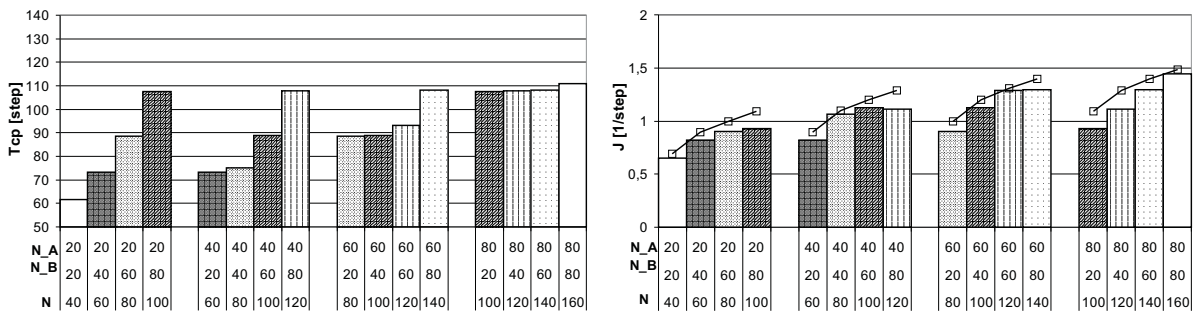
Для каждого примера и для каждого распределения количества частиц по коридорам было произведено 200 экспериментов.

Результаты. На рисунке 3.36 представлены время T_{cp} и величина потока J для всех рассмотренных примеров. (Распределение времени (полигоны частот) и среднее квадратическое отклонение σ_T отражены в приложении А на рисунках А.13 -А.14). Одинаковая штриховка столбцов соответствует одинаковому общему количеству частиц N . Кривые на графиках потоков соответствуют значению суммы величин сливающихся потоков $J_A + J_B + J_C$, $J_A + J_B$, $J_A + J_C$ соответственно. В целом с ростом общего количества частиц в области время T_{cp} увеличивается.

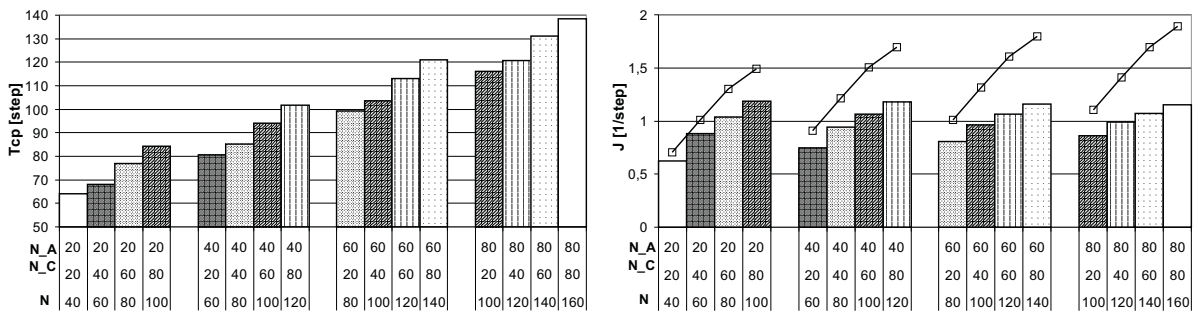
Для примера «ABC» при одинаковом общем количестве частиц N получается примерно равное время T_{cp} , рисунок 3.36а (слева). Но, в целом,



а) «ABC»



б) «AB»



в) «AC»

Рисунок 3.36 – Слияние потоков. Время T_{cp} и величина потока J для сливающихся потоков в зависимости от количества частиц в коридорах A , B , C и общего количества частиц в области N для примеров «ABC», «AB», «AC». Кривая на графике потоков отражает значение суммы величин соответствующих сливающихся потоков $J_A + J_B + J_C$, $J_A + J_B$, $J_A + J_C$

T_{cp} выше там, где в боковых коридорах находится больше частиц. Следовательно, на время оказывают влияние частицы, находящиеся в боковых коридорах и которым для достижения выхода необходимо совершать поворот. Подобное наблюдается и для примера «AC», рисунок 3.36в (слева).

В примере «AB» при одинаковых N не получается равных времен T_{cp} , рисунок 3.36б (слева). При равных N T_{cp} больше там, где в одном из коридоров больше частиц: T_{cp} для примера с распределением частиц по коридорам $N_A = 20$, $N_B = 60$ больше, чем для примера, где $N_A = 40$,

$N_B = 40$, $T_{cp}(N_A = 20, N_B = 80) > T_{cp}(N_A = 40, N_B = 60)$ и $T_{cp}(N_A = 40, N_B = 80) > T_{cp}(N_A = 60, N_B = 60)$. Таким образом, здесь на время влияет только тот коридор, в котором больше частиц.

Исследование величин потоков показывает следующее. Только для примера « AB » объединенный поток J_{AB} примерно соответствует сумме сливающихся потоков $J_A + J_B$, рисунок 3.36б (справа). Для остальных примеров величина объединенного потока меньше, чем $J_A + J_B + J_C$, $J_A + J_C$.

Так как геометрия примера « AB » симметричная, динамика движения относительно горизонтальной оси также получается симметричной, рисунок 3.37. В работе [118] получен подобный результат при натуральных экспериментах в такой же геометрии пространства, рисунок 3.38. Потоки из коридоров A и B занимают только часть общего коридора, поэтому $J_{AB} \approx J_A + J_B$.

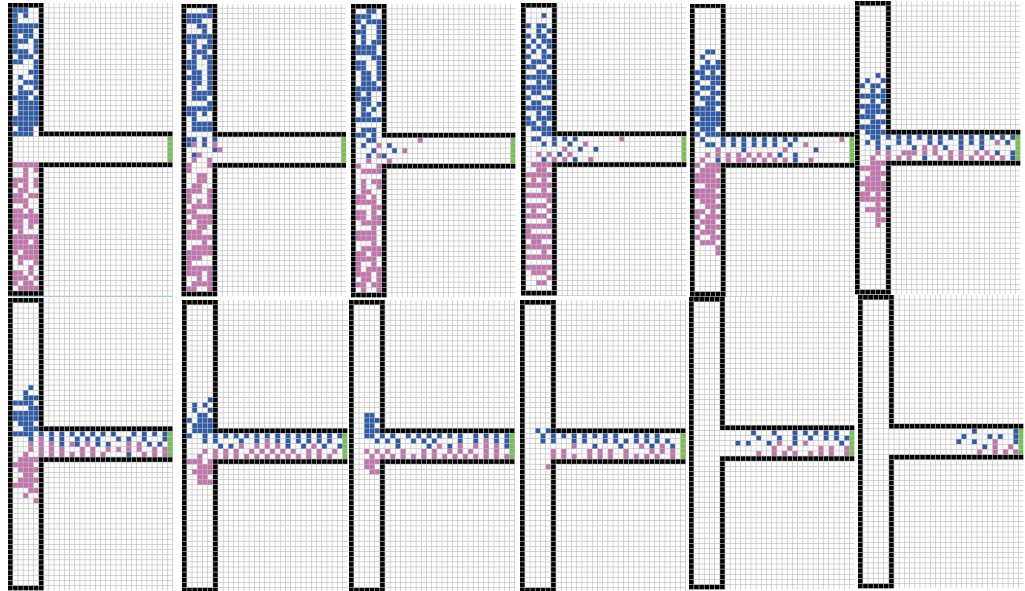


Рисунок 3.37 – Слияние потоков. Динамика движения для примера « AB » (шаг по времени $\Delta t = 10$). Распределение количества частиц по коридорам $N_A = 80$, $N_B = 80$, $N = 160$, $T = 123$

Для примеров « ABC » и « AC » величина объединенного потока меньше, чем сумма потоков, и разница увеличивается с ростом N . Потому как, частицы, идущие прямо, занимают практически всю ширину общего коридора, частицам с боковых коридоров приходится вклиниваться в поток

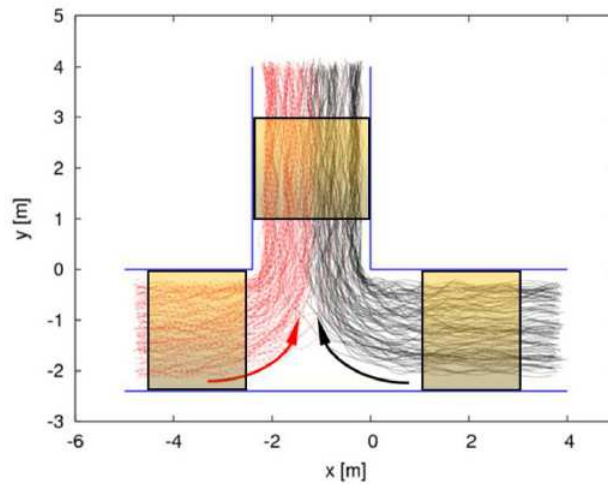


Рисунок 3.38 – Слияние потоков, результат натурального эксперимента [118]

(рисунок 3.39 и рисунок 3.40). С увеличением количества частиц в боковых коридорах (A или B) поток становится менее чувствительным к изменению N_C . Это говорит о том, что достигается максимально возможная плотность движения и происходит задержка движения.

Рисунки 3.39 - 3.40 показывают динамику движения при слиянии.

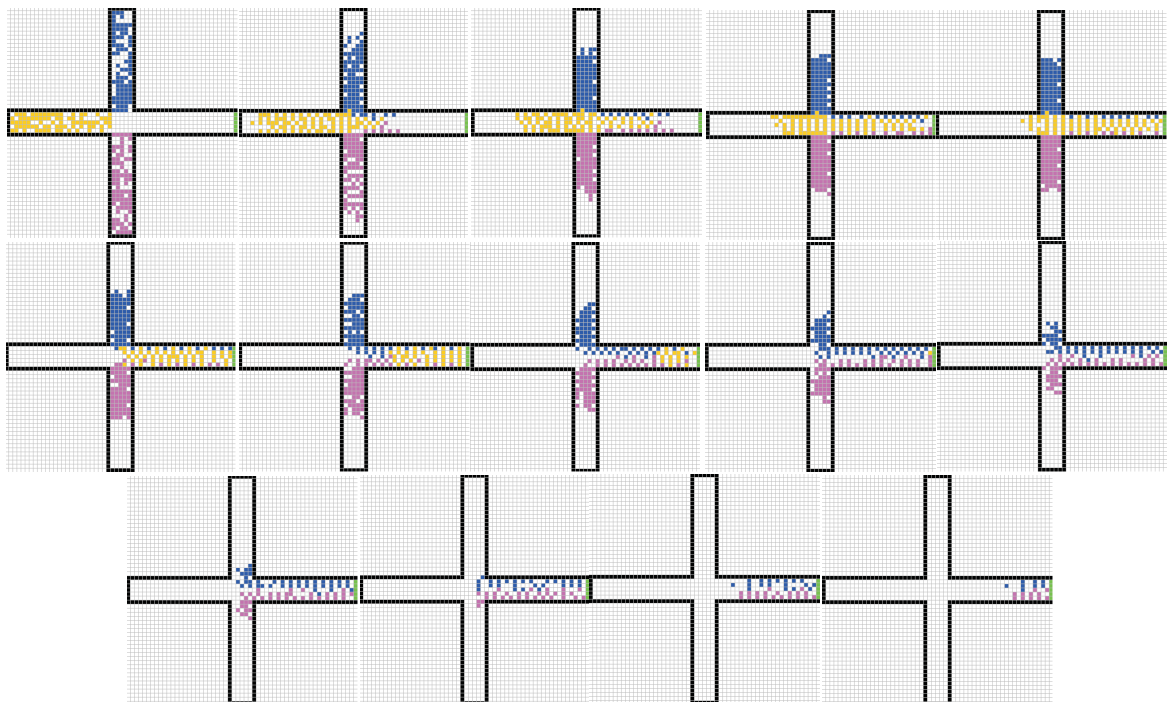


Рисунок 3.39 – Слияние потоков. Динамика движения для примера «ABC» (шаг по времени $\Delta t = 10$). Распределение количества частиц по коридорам $N_A = 80$, $N_B = 80$, $N_C = 80$, $N = 240$, $T = 143$

Частицы из нескольких коридоров объединяются в общий поток. Пер-

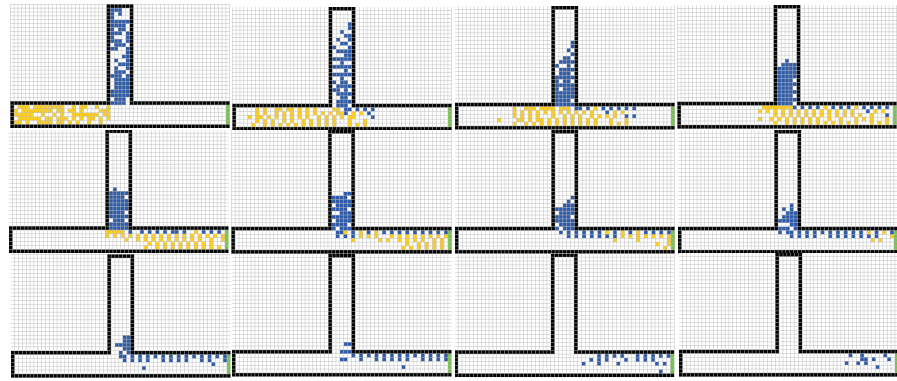


Рисунок 3.40 – Слияние потоков. Динамика движения для примера «AC» (шаг по времени $\Delta t = 10$). Распределение количества частиц по коридорам $N_A = 80$, $N_C = 80$, $N = 160$, $T = 126$

выми начинают выходить частицы с боковых проходов, потому что они расположены ближе к выходу, чем частицы коридора C . Но, тем не менее, частицы из коридора C первыми покидают помещение, так как они двигаются по прямой, без поворота. Большинству частиц из A и B приходится ждать, пока пройдут частицы из C , рисунок 3.39. Частицы из боковых коридоров A или B при данных параметрах модели не занимают всю ширину коридора, а лишь его часть.

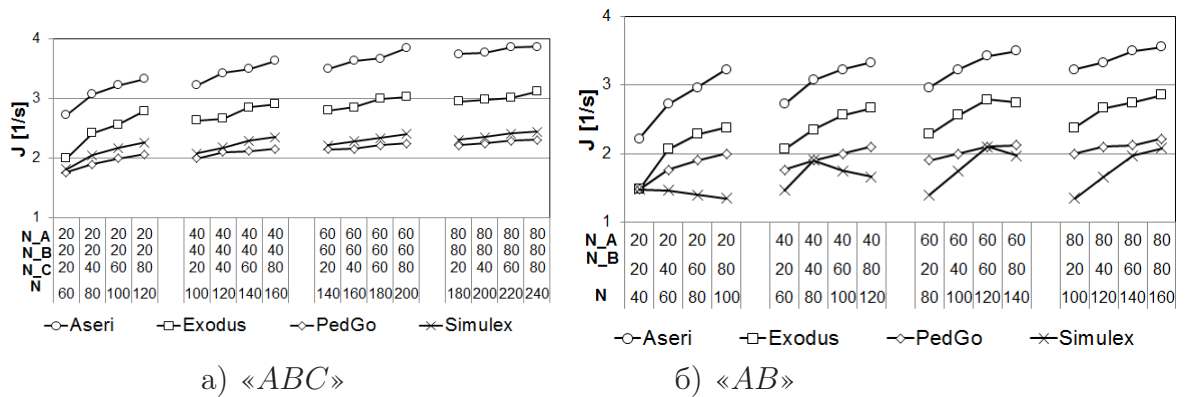


Рисунок 3.41 – Слияние потоков. Величина потока J для примеров «ABC» и «AB» для моделей Aseri, Exodus, PedGo и Simulex

На рисунке 3.41 представлена величина потока для моделей Aseri, Exodus, PedGo и Simulex, вычисленные для примеров «ABC» и «AB». Данные результаты были получены в работе Роха [42]. Сравнение потоков для примеров «ABC» и «AB» на рисунке 3.41 и рисунке 3.36а-б показывает, что поведение потоков в исследуемой модели совпадает с поведением потоков

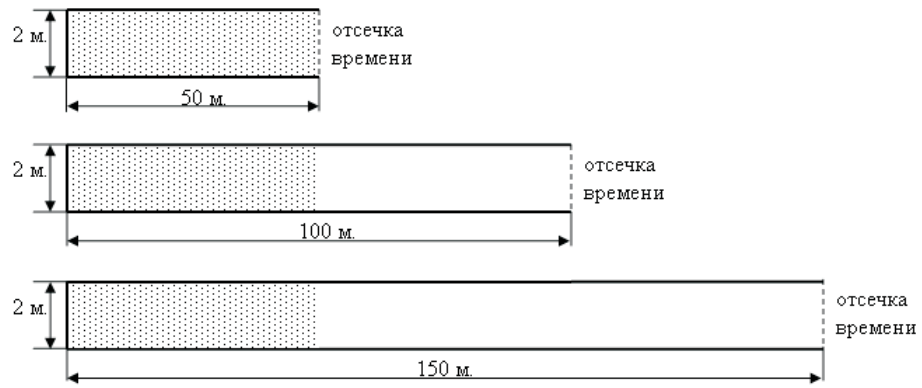


Рисунок 3.42 – Тестовые примеры для исследования растекания потока

для дискретных моделей Exodus и PedGo.

3.7 Растекание потока

Растекание или разуплотнение потока имеет место, когда головная часть потока, имея впереди свободное пространство, увеличивает скорость движения и, следовательно, плотность головной части потока меньше замыкающей [2]. Растекание наиболее отчетливо проявляется на протяженных путях движения.

Сценарий. Чтобы показать, что процесс растекания реализуется моделью было рассмотрено три коридора шириной 2 м (5 ячеек) и различной длины: 50 м, 100 м, 150 м (125, 250 и 375 ячеек соответственно) [126], [136]. Частицы располагались на первых пятидесяти метрах, рисунок 3.42, с различной начальной плотностью ρ_0 от 0,25 до 5,75 [1/м²]. Параметры модели $k_S = k_W = k_P = 4$, $r = 10$.

Для каждого примера и для каждой начальной плотности ρ_0 было проведено 500 экспериментов.

Результаты. Обозначим за $T_{m_0}^{50}$, $T_{m_0}^{100}$, $T_{m_0}^{150}$ – наиболее вероятные времена выхода частиц из соответствующего коридора. $\tilde{T}^{100} = T_{m_0}^{100} - 125$ [шаг], $\tilde{T}^{150} = T_{m_0}^{150} - 250$ [шаг] – время, за которое частицы пройдут 50 метров в коридорах длиной 100 и 150 м соответственно (125 и 250 шагов – это минимальные теоретические времена выхода частиц в модели из коридоров

длиной 50 и 100 м соответственно). С помощью полученных времен были вычислены удельные потоки для всех трёх коридоров: $J_s^{50} = N/T_{m_0}^{50}/2$, $\tilde{J}_s^{100} = N/\tilde{T}_{100}/2$, $\tilde{J}_s^{150} = N/\tilde{T}_{150}/2$.

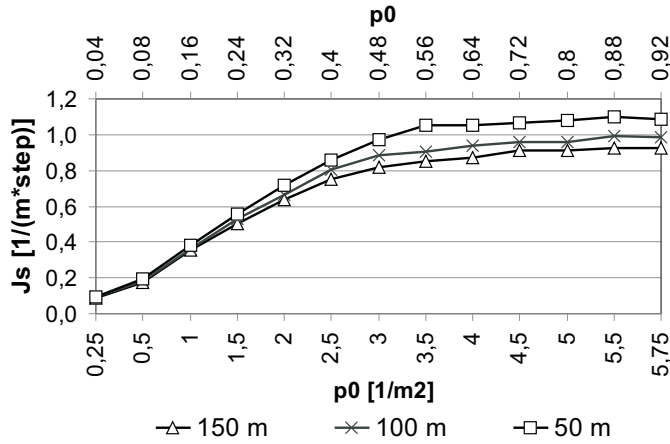


Рисунок 3.43 – Зависимости удельных потоков J_s^{50} , \tilde{J}_s^{100} и \tilde{J}_s^{150} от плотности ρ_0 для трех тестовых примеров

Рисунок 3.43 отражает зависимости удельных потоков J_s^{50} , \tilde{J}_s^{100} и \tilde{J}_s^{150} от плотности ρ_0 . Кривые, соответствующие потокам \tilde{J}_s^{100} и \tilde{J}_s^{150} , с увеличением ρ_0 располагаются ниже, чем J_s^{50} . Это говорит о том, что растекание потока реализуется моделью. После значения плотности $\rho_0 \approx 0,5$ поток практически не изменяется, то

есть в модели существует предел разуплотнения частиц.

Таким образом, эксперименты с варьированием длины комнаты позволяют увидеть, что воспроизводится растекание (разуплотнение) потока, что имеет место и в реальности [2]. Особенно заметен этот эффект при возрастании начальной плотности.

3.8 Модельная задача

Сценарий. Для того, чтобы показать, что модель может воспроизводить динамику движения в более сложных геометриях пространствах, чем рассмотренные выше, рассмотрим движение в геометрии на рисунке 3.44 (пример учебного заведения). На втором этаже имеются две «лестничные площадки», через которые происходит движение на первый этаж. На первом этаже действует только один выход. Перемещение частиц со второго этажа на первый осуществляется с помощью ячеек поглотителя и излучателя (попав в ячейку поглотителя на втором этаже, частица выходит из

ячейки излучателя на первом).

Параметры модели $k_S = k_W = 4$, $k_P = 6$, $r = 10$. Количество частиц $N = 500$.

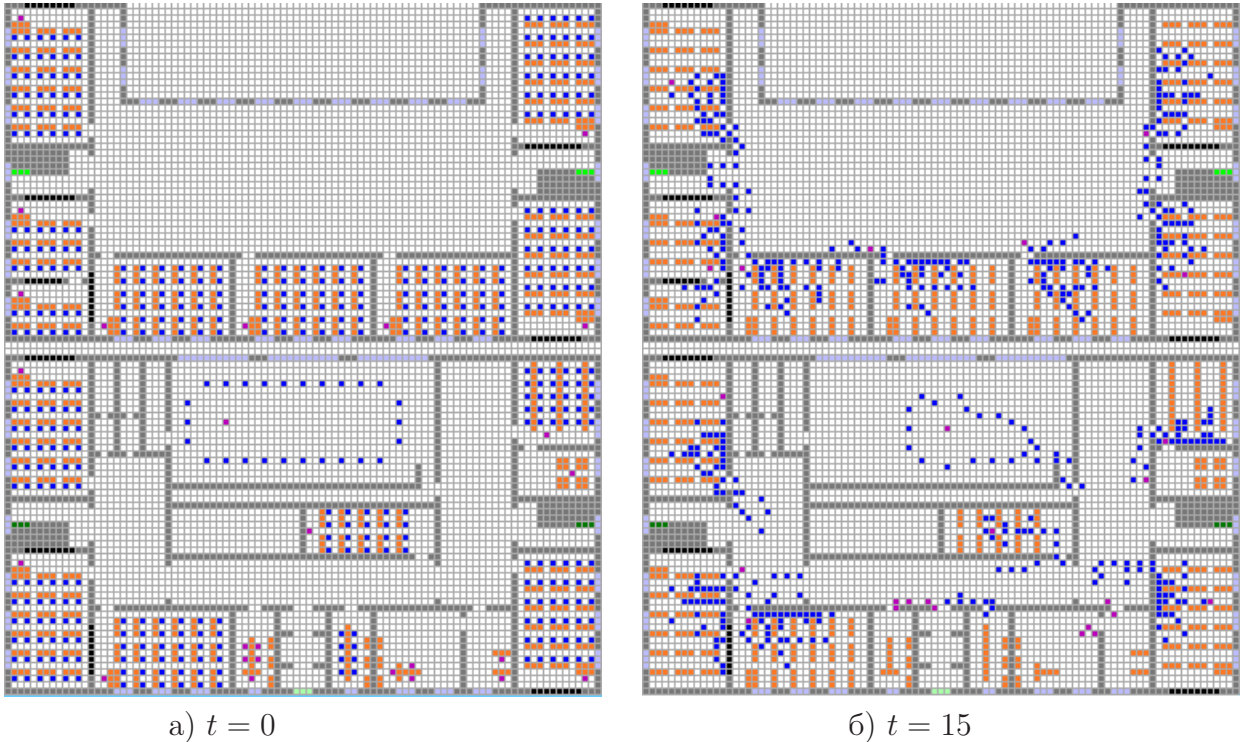
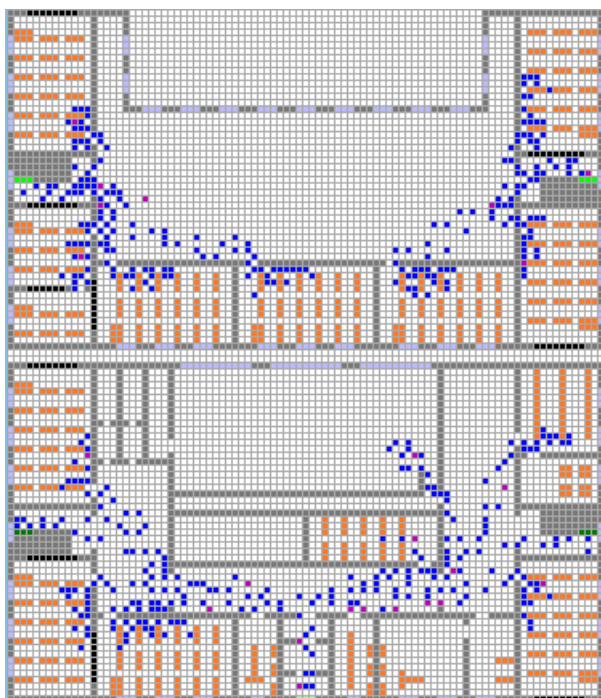
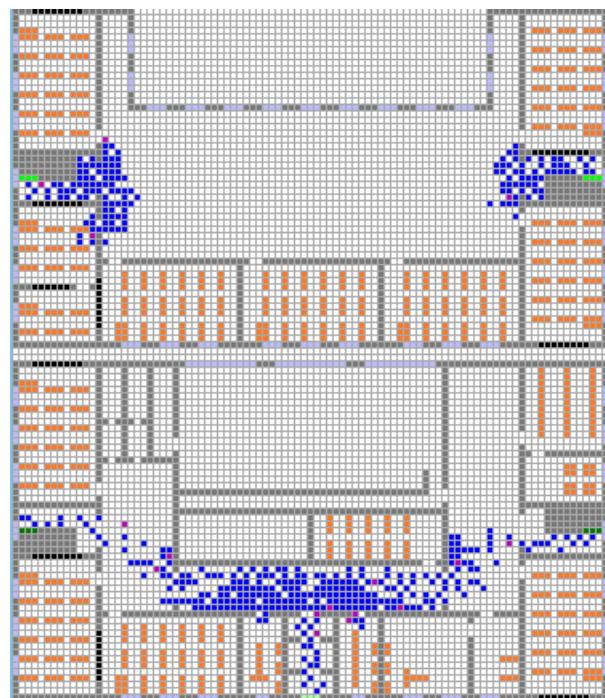
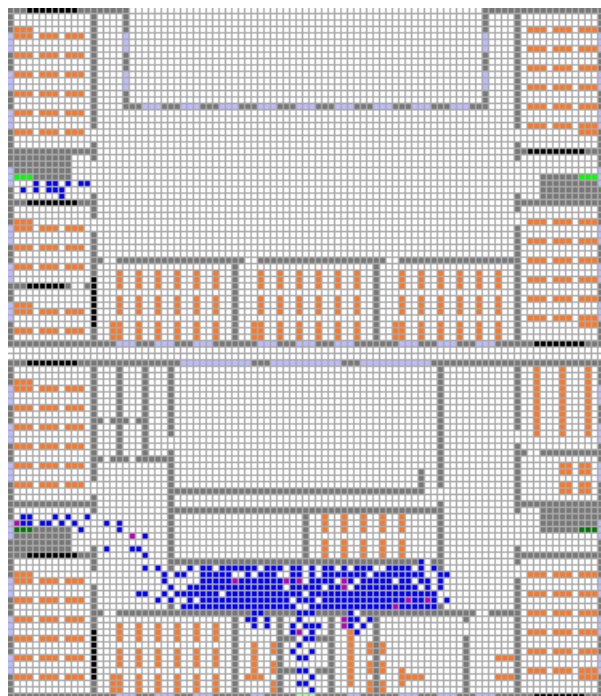
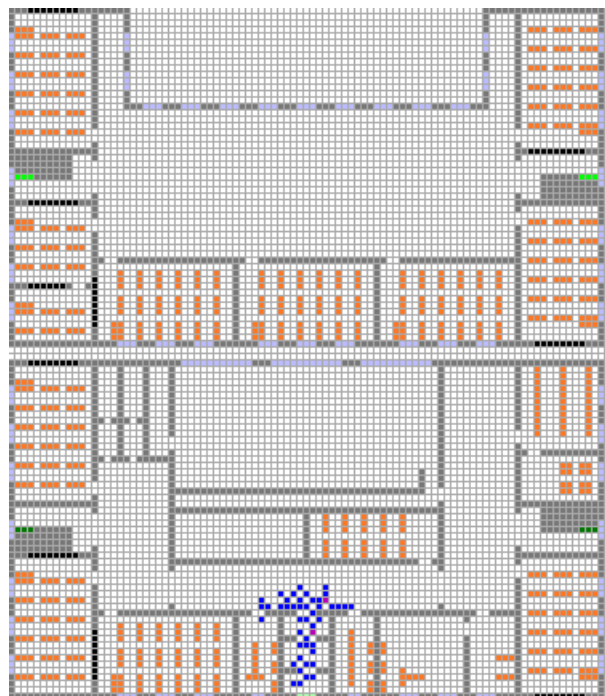


Рисунок 3.44 – Геометрия пространства и начальное расположение частиц в момент времени $t = 0$. Динамика движения при $t = 15$

Результаты. Рисунки 3.44 - 3.46 отражают процесс движения в различные моменты времени t , $T = 542$. Анализ процесса движения показал следующее. Через правый выход второго этажа частицы выходят быстрее, чем через левый. Левый выход оказался перегружен. На выходе очень быстро возникает большая пробка из скопившихся частиц, частицы даже заходят в близлежащие кабинеты. Основное время выхода составляет рассасывание образовавшейся пробки. Пропускной способности выхода не достаточно, чтобы обеспечить беспрепятственное движение из здания.

а) $t = 40$ б) $t = 100$ Рисунок 3.45 – Динамика движения при $t = 40$ и $t = 100$ а) $t = 200$ б) $t = 500$ Рисунок 3.46 – Динамика движения при $t = 200$ и $t = 500$

3.9 Выводы

В главе представлен разработанный программный комплекс, который позволяет демонстрировать движение частиц и проводить исследования моде-

ли: собирать статистические данные (время, частоты выбора направлений), находить интегральные характеристики движения.

Модель была исследована в различных тестовых сценариях:

1. квадратная комната с одним выходом;
2. прямой коридор с различной начальной плотностью частиц ρ_0 ;
3. сложная геометрия пространства с различной ρ_0 ;
4. встречное движение частиц в прямом коридоре при различной ρ_0 ;
5. пересечение потоков под прямым углом при различной ρ_0 ;
6. пересечение потоков под прямым углом в неограниченной зоне движения;
7. слияние двух потоков: два потока объединяются в один после поворота; один поток идёт прямо, а второй присоединяется к первому после поворота. Количество частиц в объединяющихся потоках варьируется;
8. слияние трёх потоков: один поток идёт прямо, два присоединяются к первому после поворота. Количество частиц в объединяющихся потоках варьируется;
9. сложная геометрия пространства: пример двухэтажного учебного заведения.

Исследование влияния параметров модели на динамику движения частиц показало, что реализуются стратегии кратчайшего пути и быстрого пути. Если геометрия простая (коридор или одна комната), то требуется реализация стратегии КП и $k_P \leq k_S$, $r \geq 1$. В более сложных геометриях (где выбор стратегии зависит от пространственной ситуации) и при пересечении потоков требуется реализация стратегии БП: $k_P > k_S$, $r > 1$.

Существует предел плотности пересекающихся потоков, который при определённых параметрах модели соответствует значению, полученному в натуральных наблюдениях. Величина потока при слиянии в исследуемой модели качественно совпадает с потоками для других дискретных моделей.

Рассмотрена новая тестовая задача — растекание потока, и численно показано, что в модели реализуется растекание потока.

Глава 4

Построение фундаментальных диаграмм. Сравнение с данными натуральных экспериментов

4.1 Построение фундаментальных диаграмм

Как уже было сказано, экспериментальные ФД (зависимости потока от плотности), полученные разными учеными в разных странах могут отличаться друг от друга. Тем не менее, все ФД характеризуются следующей особенностью: с ростом плотности до определённого значения поток растёт до некоторого максимального значения, а затем падает. Эта закономерность имеет важное значение, поскольку плотность, превышающая плотность при максимальном значении потока, вызывает задержку движения и скопление людей на тех участках пути, где этот предел превышен. Стоит отметить, что для получения натуральных данных, эксперименты обычно проводятся на прямых участках пути. При этом замеряется текущая плотность потока, а не фиксируется начальная. Также, считается, что повороты не влияют на величину потока [2].

О движении на поворотах в книге Предтеченского и Милинского [2] говорится следующее: «Пусть по коридору шириной δ , делающему поворот под углом 90° , движение происходит с равномерной плотностью и скоростью. ... Наблюдения показывают, что каждый человек, достигнув угла,

поворачивает не сразу, а плавно огибаает угол по кривой, близкой к окружности. Чем дальше человек в зоне поворота отстоит от точки O , тем больший путь по окружности он проходит, прежде чем минует угол. При этом, несмотря на различную длину пути, время движения примерно одинаково за счет разных скоростей движения вокруг точки O как следствие неодинаковых плотностей на внутренней и внешней стороне потока. ... Таким образом, в зоне поворота происходят перераспределение параметров движения и деформация траекторий, по которым перемещаются люди. Эти явления отрицательно сказываются на режиме процесса, особенно в аварийных условиях, поэтому при проектировании путей движения следует избегать излишних поворотов. Что касается пропускной способности пути в месте поворота, то, как показывают наблюдения ... она заметно не изменяется, поэтому повороты в расчете можно не учитывать».

Ранее при исследовании модели было отмечено, что наличие поворота на пути влияет на динамику движения частиц. Таким образом, ставятся следующие задачи:

1. построить и исследовать потоки при открытых и периодических граничных условиях на прямом участке пути;
2. проверить каким образом наличие поворотов (и их количество) влияет на величину потока в модели.

4.1.1 Прямые участки пути

Сценарий. Рассматривается коридор $2 \times 50 \text{ м}^2$ (рисунок 4.1). В начальный момент времени частицы равномерно располагались по всему пространству коридора с различной плотностью. В случае открытых граничных условий начальная плотность частиц составляла $\rho_0 = \{0,25; 1; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 5; 5,75\} [1/\text{м}^2]$. Замерялось время выхода частиц из области. Для каждой начальной плотности было сделано 500 экспериментов. По полученным данным было найдено математическое ожидание времени T_{cp} и вычислена величина удельного потока. В случае периодических начальных

условий замерялось время, за которое через сечение пройдет 1000 частиц. Параметры модели $k_S = k_W = 4$, $k_P = \{2; 4; 12\}$, $r = \{1; 10\}$.

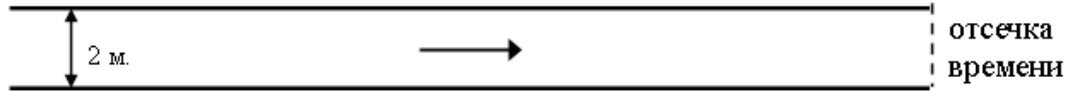


Рисунок 4.1 – Коридор $2 \times 50 \text{ м}^2$

Результаты. На рисунке 4.2 отображен удельный поток в случае открытых граничных условий в зависимости от ρ_0 для различных параметров модели ([126], [136]). Поток растет с ростом плотности, но после $\rho_0 \approx 3, 5 [1/\text{м}^2] \approx 0, 56$ изменение величины J_s практически прекращается. Если сначала увеличение ρ_0 (т.е. увеличение количества частиц в области) приводит к увеличению J_s , то затем достигается максимальная пропускная способность сечения, и величина удельного потока не изменяется.

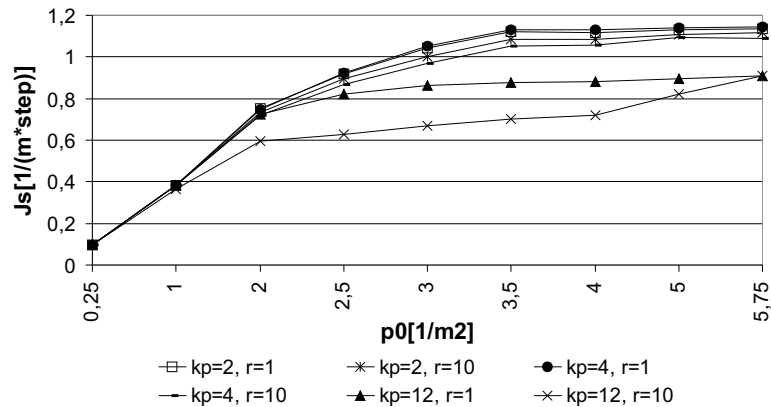


Рисунок 4.2 – Удельный поток J_s для коридора $2 \times 50 \text{ м}^2$ при различных параметрах модели k_P и r . Граничные условия – открытые

Данный результат согласуется с исследованиями других моделей (в том числе и дискретных), рисунок 4.3. На рисунке 4.3 показаны зависимости $J_s(\rho_0)$ для моделей Exodus, ASERI, Simulex, PedGo в сравнении с натурными данными [2] («Predtechenskii area»). Кривые с графика с подписью «without extra-floor» получены в тех же условиях, что и представленные выше результаты для модели. График взят из [42].

На рисунке 4.4 представлена зависимость удельного потока J_s от плотности ρ в случае периодических граничных условий для различных пара-

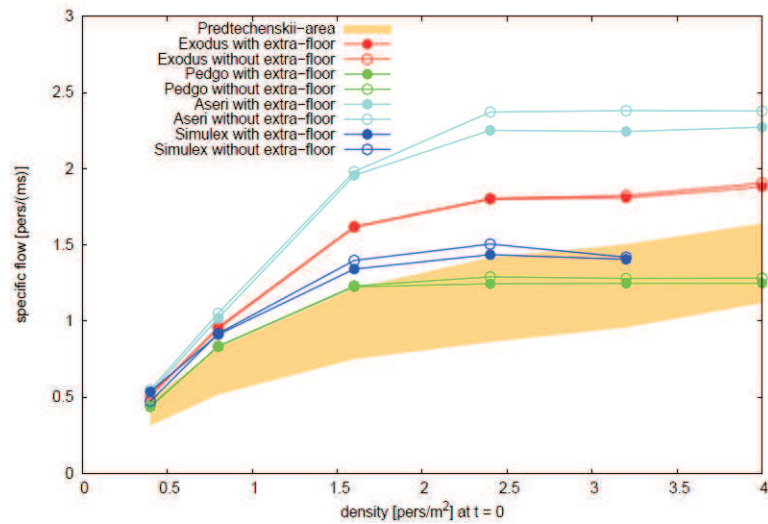


Рисунок 4.3 – Фундаментальные диаграммы для различных моделей из [42]

метров модели k_P и r ([128], [134], [135]). Качественно модельный поток в этом случае ведет себя так же, как натуральный: сначала растет с ростом плотности, а при достижении плотности определённого значения, начинает падать.

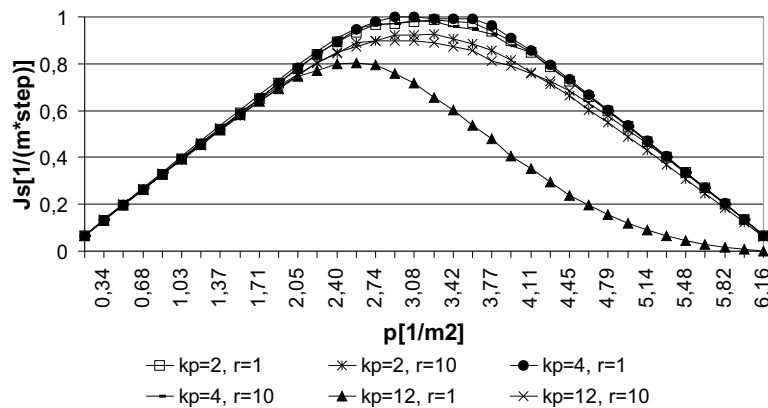


Рисунок 4.4 – Удельный поток J_S для коридора $2 \times 50 \text{ м}^2$ при различных параметрах модели k_P и r . Граничные условия – периодические

На рисунке 4.5 (рисунок взят из [75]) представлена зависимость потока J [$1/\Delta t$] (где $\Delta t = 0,3$ сек) для FF-модели [71], [97]. Данные были получены при периодических граничных условиях в коридоре размером 93×33 ячейки² ($37,2 \times 13,2 \text{ м}^2$), $k_S = 10$, остальные параметры модели равны нулю. Плотность ρ нормализована по $\rho_{max} = 6,25 \text{ 1/м}^2$.

Для предложенной модели и для FF-модели наблюдается симметрич-

ность фундаментальных диаграмм относительно значения $\rho = 3,25 [1/\text{м}^2] = 0,52$ и $\rho = 0,5$ соответственно. Но в разработанной модели более гладкий переход от возрастания потока к убыванию.

Отметим влияние параметров модели для рассмотренных примеров. J_s достигает своих максимальных значений при $k_P = 4$, $k_P = 2$ и $r = 1$ (т. е. при таких параметрах, когда реализуется стратегия кратчайшего пути). При небольших плотностях поток мало чувствителен к параметрам модели. Для периодических граничных условий можно сказать, что параметры k_P и r оказывают влияние на поток только на средних плотностях. Отдельно выделяется кривая потока для параметров $k_P = 12$ и $r = 1$, где J_s достигает минимальных значений.

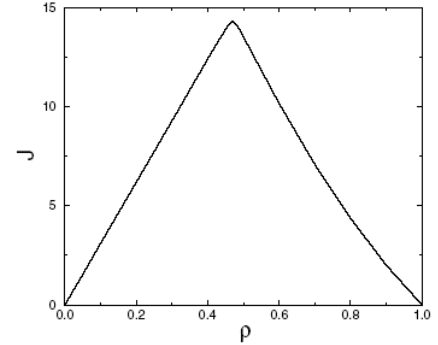


Рисунок 4.5 – Фундаментальная диаграмма для FF-модели

На рисунке 4.6 отражена относительная разность потоков $\Delta J_s = \frac{J_s(\rho_0) - J_s(\rho)}{J_s(\rho_0)}$, полученных при различных граничных условиях. При $k_P = 4$ и $k_P = 2$ потоки совпадают до $\rho = 3 [1/\text{м}^2]$ с точностью до 10%. И можно сказать, что до такой плотности вид граничных условий не влияет на поток и, соответственно, на динамику движения частиц. Далее процесс движения начинает различаться.

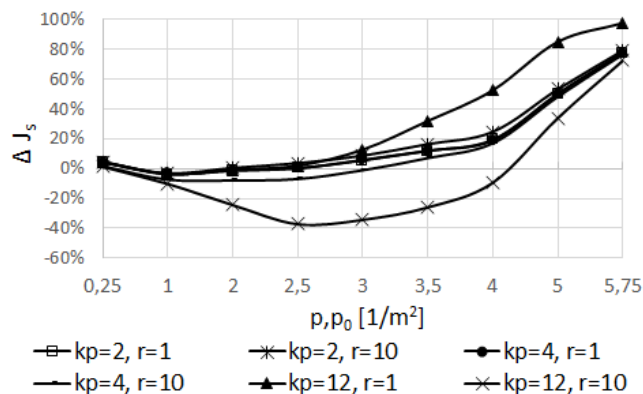


Рисунок 4.6 – Зависимость относительной разности потоков, полученных при различных граничных условиях, от плотности

4.1.2 Участки пути движения с поворотами

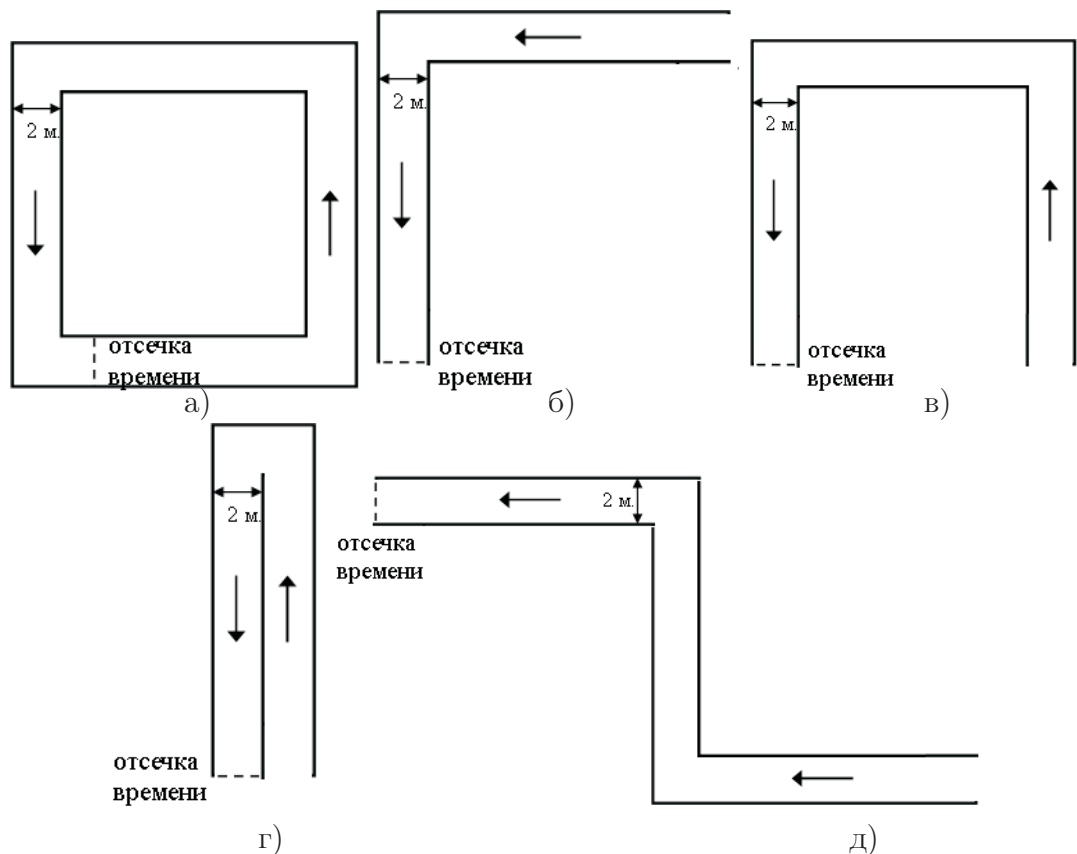


Рисунок 4.7 – Коридоры с поворотами: а) коридор с четырьмя поворотами на 90° ; б) коридор с одним поворотом на 90° ; в) коридор с двумя поворотами на 90° ; г) коридор с поворотом на 180° ; д) коридор с двумя поворотами на 90° , но с различным направлением поворотов

Сценарий. Рассматривается несколько геометрий пространства: коридоры с поворотами на 90° (рисунок 4.7а-в), коридор с поворотом на 180° (рисунок 4.7г) и коридор с двумя поворотами на 90° , но с различным направлением поворотов (рисунок 4.7д) [128], [134], [135]. Ширина коридоров – 2 м, длина по внешней границе – 15,8 м, по внутренней – 13,8 м. В начальный момент времени частицы равномерно располагались по пространству коридора с различной плотностью. Стрелками показано направление движения. Граничные условия – периодические. Замерялось время, за которое через сечение пройдет определенное количество частиц N для заданной плотности потока (для коридора с четырьмя поворотами $N = 200$, с одним – $N = 500$ и для всех остальных – $N = 250$). Па-

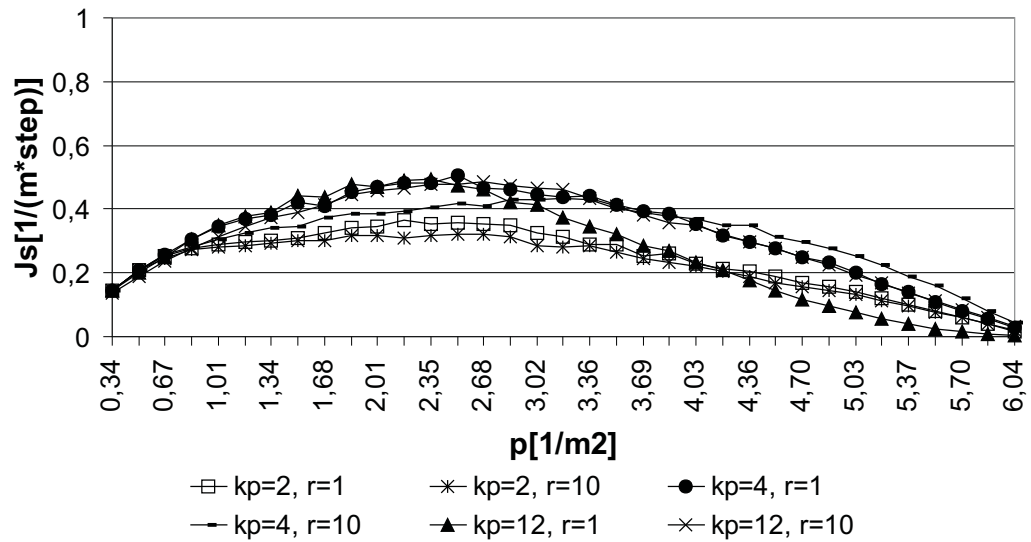


Рисунок 4.8 – Удельный поток J_S для коридора с четырьмя поворотами при различных параметрах модели k_P и r . Граничные условия – периодические

параметры модели $k_S = k_W = 4$, $k_P = \{2; 4; 12\}$, $r = \{1; 10\}$.

Результаты. На рисунках 4.8 - 4.9 представлены удельные потоки J_s для рассмотренных примеров. Модель чувствительна к наличию поворота: поток для коридора с поворотами уменьшается в два раза по сравнению с потоком для коридора без поворота (рисунки 4.8 и 4.4). Число поворотов существенно не сказывается на величине потока (увеличение числа поворотов немного уменьшает поток), рисунки 4.8 и 4.9. Изменение угла поворота (с 90 градусов на 180) уменьшает поток, рисунки 4.9а и 4.9б. Изменение направления поворота увеличивает поток по сравнению с двумя поворотами одного направления, рисунки 4.9в и 4.9г. Стоит отметить, что все описанные изменения в потоках наблюдаются на средних плотностях.

В прямом коридоре во время движения практически не происходит перераспределение частиц по пространству. При наличии поворотов частицы вынуждены корректировать свои траектории, возникают заторы перед поворотами и не сохраняется начальное равномерное распределение частиц по пространству. В итоге за единицу времени через сечение проходит меньшее количество частиц, чем в прямом коридоре.

J_s для рассмотренных примеров более чувствителен к параметрам k_P

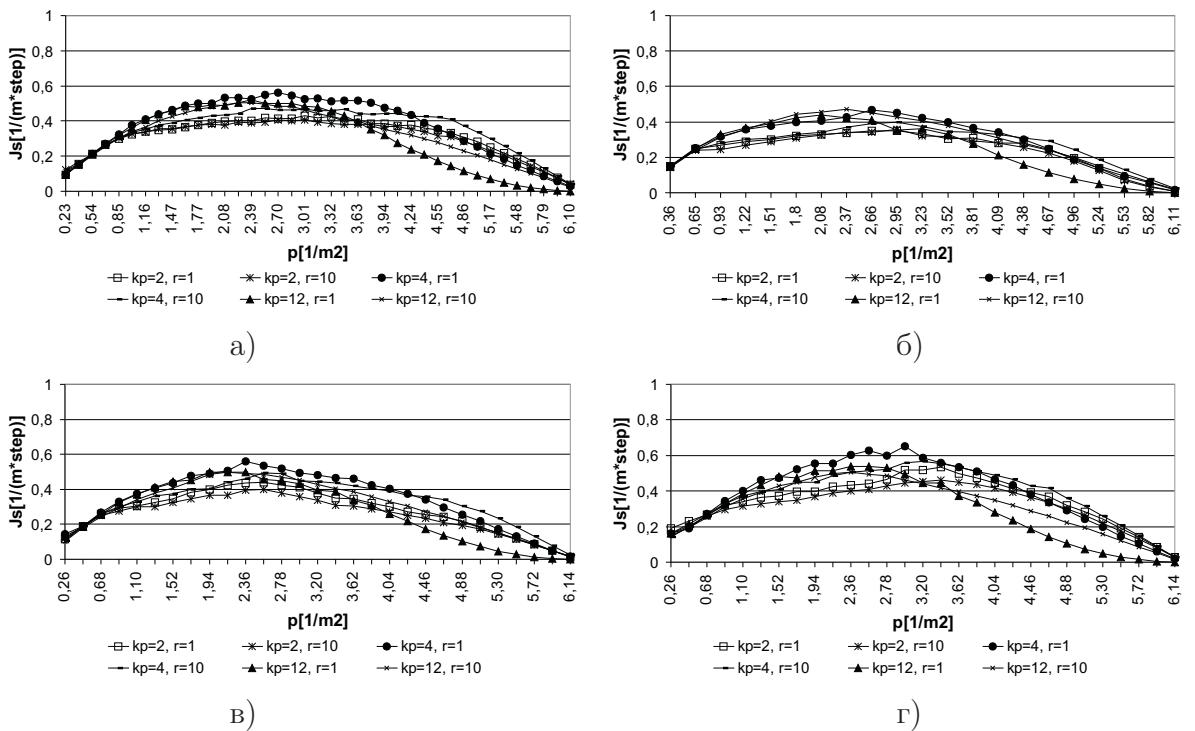


Рисунок 4.9 – Удельный поток J_S при различных параметрах модели k_P и r для коридора а) с одним поворотом под углом 90° ; б) с одним поворотом на 180° ; в) с двумя поворотами на 90° ; г) с двумя поворотами на 90° , но с различным направлением поворотов. Граничные условия – периодические

и r , чем поток для прямого коридора при таких же граничных условиях. В прямом коридоре примерно до плотности $\rho = 2,05[1/m^2]$ кривые потоков совпадают для различных параметров. При этом поток достигает своих максимальных значений при $k_P = 4$, $k_P = 2$ и $r = 1$ независимо от плотности, минимальных – при $k_P = 12$ и $r = 1$. При появлении поворотов влияние параметров зависит от плотности. Так, кривые потоков совпадают для различных параметров модели только до плотности $\rho = 0,7 [1/m^2]$. На средних плотностях поток достигает максимальных значений при $k_P = 4$ и $r = 1$, на больших – при $k_P = 4$ и $r = 10$. Сначала поток принимает минимальные значения при $k_P = 2$ и $r = 10$, а затем, с ростом плотности, при $k_P = 12$ и $r = 1$.

Зависимость потока от плотности достигает своего максимального значения при параметрах $k_P = 4$ и $r = 1$ для всех рассмотренных примеров при периодических граничных условиях. Плотность $\rho(J_s^{max})$, при которой поток достигает максимальных значений для прямого коридора равна

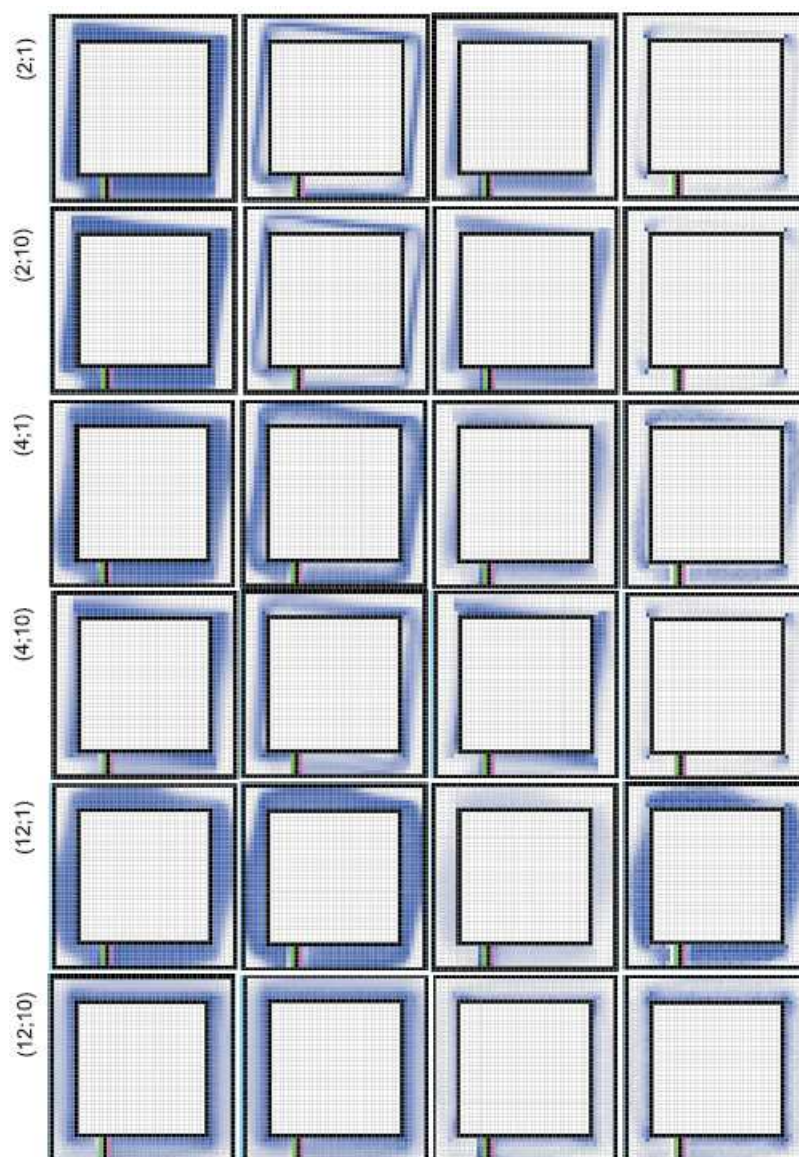


Рисунок 4.10 – Коридор с четырьмя поворотами. Интегральные характеристики движения в зависимости от параметров $(k_P; r)$ (слева направо): интенсивность посещения ячеек, двигательная активность, простаивание, конфликтность

3,08; для коридора с одним поворотом на 90° $\rho(J_s^{max}) = 2,7$; для коридора с двумя поворотами на 90° $\rho(J_s^{max}) = 2,36$; для коридора с четырьмя поворотами на 90° $\rho(J_s^{max}) = 2,52$; для коридора с поворотом на 180° $\rho(J_s^{max}) = 2,65$; для коридора с двумя поворотами на 90° , но с различным направлением поворотов $\rho(J_s^{max}) = 2,99$. Значение $\rho(J_s^{max})$ интерпретируется, как величина плотности, после которой передвижение людей становится затруднительным и падает скорость движения. Таким образом, движение с большей плотностью возможно в прямом коридоре. При наличии

на пути движения поворотов значение $\rho(J_s^{max})$ уменьшается.

Рисунок 4.10 отражает динамику движения частиц на поворотах с помощью интегральных характеристик в зависимости параметров k_P и r . Для этого было организовано движение с плотностью $\rho = 0,5$, после того как через сечение проходило примерно 1000 частиц, движение останавливалось.

При $k_P = 2$ частицы стремятся идти к выходу по кратчайшему пути. При этом перед поворотами образуются скопления и заторы. При увеличении k_P начинает реализовываться и стратегия быстрого пути, частицы начинают заранее обходить образовавшееся перед поворотом скопление, увеличивается радиус обхода поворота. За счет этого эффективнее используется доступное пространство. При $k_P = 12$ движение становится все менее направленным (частицы очень мало стоят на месте, повышается число конфликтных ситуаций), что сказывается и на величине потока.

4.1.3 Сужения

Движение людского потока через проем — сложный процесс, знание которого имеет большое значение, так как с ним связано возникновение ситуаций, которые могут привести к серьезными последствиями (от задержки движения до несчастных случаев с людьми). Избежать наличие проемов и различных сужений в зданиях и сооружениях невозможно.

Много внимания уделялось исследованию зависимости величины потока от плотности для таких геометрий ([2], [12] - [17], [119]), так как она показывает пропускную способность проема и возможность образования скоплений.

Рисунок 4.11 показывает общий и удельный потоки в зависимости от ширины сужения при различных плотностях [2]. Общий поток с увеличением ширины проема возрастает при любой плотности. Удельный поток практически не зависит от ширины проема. Кривые потоков ведут себя одинаково при любой плотности.

Рисунок 4.12 показывает общий и удельный потоки в зависимости от

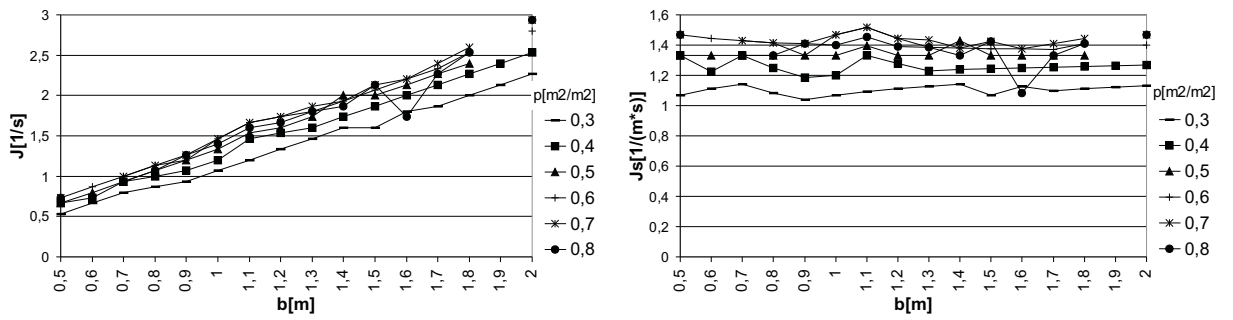


Рисунок 4.11 – Общий (слева) и удельный (справа) в зависимости от ширины дверного проема при различных плотностях по данным Предтеченского и Милинского [2]

ширины проема у различных зарубежных исследователей [13] - [17] (данные взяты из [112]). Соответствующие геометрии пространства представлены на рисунке 4.13. Несмотря на различные начальные условия, поток с ростом ширины дверного проема возрастает. Поведение удельного потока различается для каждого исследователя. В целом наблюдается его понижение с ростом ширины проема.

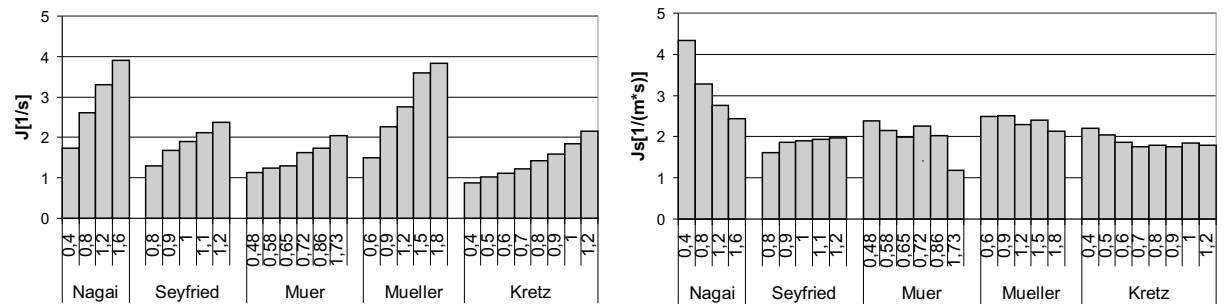


Рисунок 4.12 – Общий (слева) и удельный (справа) потоки в зависимости от ширины дверного проема у различных исследователей [13] - [17]

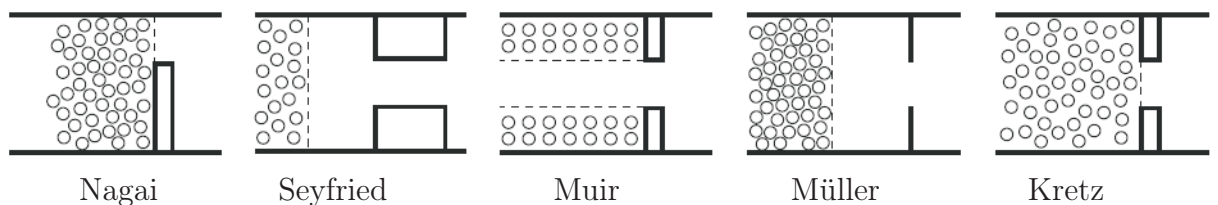


Рисунок 4.13 – Примеры геометрий и начального расположения людей у различных исследователей [13] - [17]

Целью данного раздела является исследование динамики модели в пространствах с сужениями и выявление закономерностей зависимости потока от плотности и от ширины дверного проема в модели.

Сценарий. Исследование величины потока в модели проводилось при различных начальных условиях: изменялись ширина проема b , начальная плотность ρ_0 , количество частиц N , параметры модели k_P и r [?, ?]. Рассматривалась геометрия пространства с рисунка 4.14. Ширина проема изменялась и принимала значения $b = \{0,8 \text{ м}; 1,2 \text{ м}; 1,6 \text{ м}; 2,4 \text{ м}; 4 \text{ м}\}$. Параметры модели $k_P = \{2; 4; 12\}$, $r = \{1; 10\}$, $k_S = k_W = 4$. Более подробные условия будут представлены далее в каждом отдельном случае.

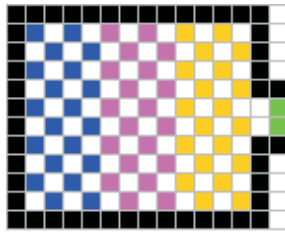


Рисунок 4.14 – Тестовый пример геометрии пространства с сужениями

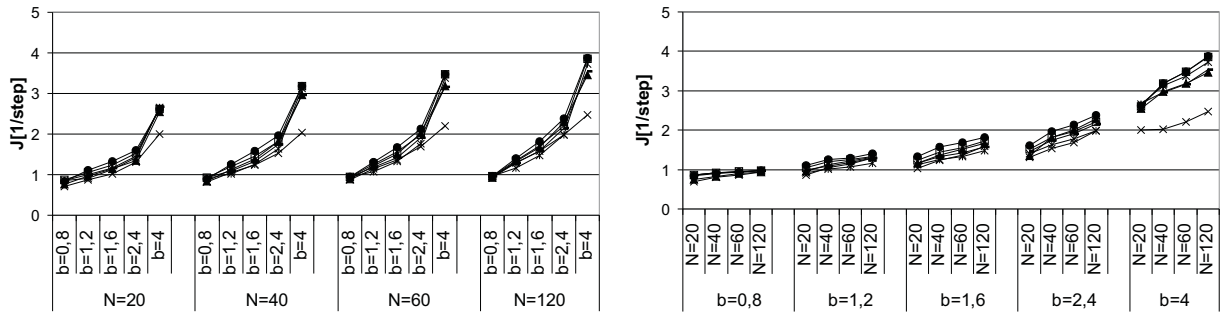
Для каждого набора условий было проведено 500 экспериментов. Затем вычислялось математическое ожидание времени T_{cp} и находились величины общего J и удельного J_s потоков.

Результаты. *Исследование потока при постоянной начальной плотности $\rho_0 = 0,5$.*

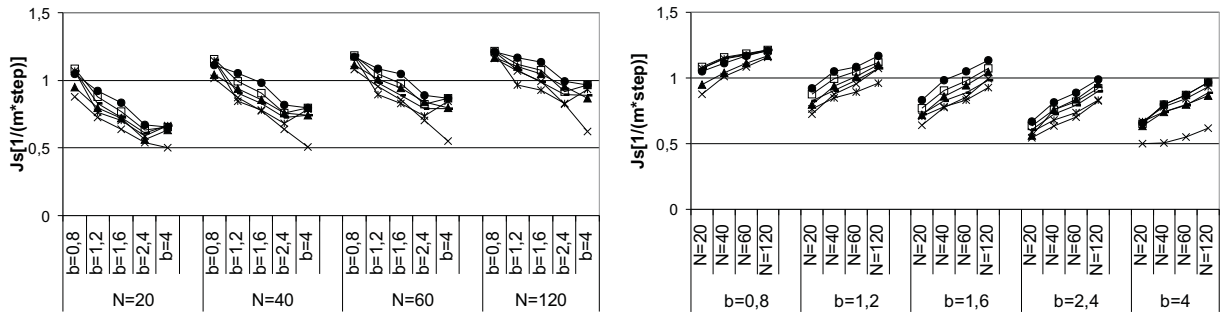
В этом эксперименте изменялось количество частиц в области и $N = \{20; 40; 60; 120\}$. Плотность частиц не менялась и $\rho_0 = 0,5 \approx 3,125 [1/\text{м}^2]$. Чтобы плотность частиц оставалась одинаковой при различных N , изменялась длина комнаты: 1,6 м (4 ячейки), 3,2 м (8 ячеек), 4,8 м (12 ячеек) и 9,6 м (24 ячейки) соответственно. Частицы были расположены по пространству в шахматном порядке. Данный эксперимент был взят из статьи [14].

Рисунок 4.15 показывает зависимости потока и удельного потока от ширины проема b и от количества частиц N для различных параметров k_P и r . Графики зависимостей от b и N эквивалентны, но построены различным образом. Видим, что потоки чувствительны к ширине проема и к количеству частиц в области. Общий поток растет с увеличением b и N . Удельный поток растет с увеличением N и падает с ростом b .

Обсудим сначала зависимости потоков от количества частиц N (рису-



а) Общий поток



б) Удельный поток

\square $k_P=2; r=1$ $*$ $k_P=2; r=10$ \bullet $k_P=4; r=1$ — $k_P=4; r=10$ \blacktriangle $k_P=12; r=1$ \times $k_P=12; r=10$

Рисунок 4.15 – Сужения. Зависимости общего и удельного потоков от ширины проема b и начального количества частиц в области N для различных параметров модели k_P и r . $\rho_0 = 0,5$, $k_S = k_W = 4$

нок 4.15a(справа)). Чувствительность потока J к N растет с увеличением ширины проема. После начала движения перед выходом образуется скопление и его плотность зависит от b . При самой малой рассмотренной ширине $b = 0,8$ м перед проемом образуется скопление максимальной плотности и величина потока не зависит от N (рисунок 4.15a (справа при $b = 0,8$ м)). При меньшей плотности перед проемом (то есть при большем b) получаем большую зависимость потока от N .

При $b = 4$ м получаем наиболее явную зависимость J от N . Но в этом случае сужения не существует (ширина проема равна ширине рассматриваемой комнаты) и начальная плотность практически не изменяется в процессе движения. Теоретически, здесь величина потока не должна зависеть от количества частиц в области, но влияет стохастичность модели. Так как перед проемом в одном ряду стоит 5 частиц, то величина потока должна быть равна 5 [1/шаг], но модельный поток меньше. Для $N = 20$ значение

потока составляет $J = 2,6$ [1/шаг] ($k_P = 4, r = 1$), а $T_{cp} \approx 7,6$ шага. (Распределение времени, математическое ожидание T_{cp} и среднее квадратическое отклонение времени σ_T отражены в приложении А на рисунках А.15 и А.16 соответственно.)

В то же время минимальное теоретическое время равно 4 шагам (длина комнаты в этом случае равна 4 ячейкам). Для $N = 120$ $T_{cp} \approx 31$ шаг (а теоретическое составляет 24 шага) и модельный поток не превышает значение 4 [1/шаг].

Рассмотрим зависимости потоков от b , рисунок 4.15а (слева). Поток в модели зависит от ширины проема. Удельный поток J_s падает с увеличением b , кроме $b = 4$ м. При $N = 120$ наблюдается наименьшая зависимость удельного потока от b .

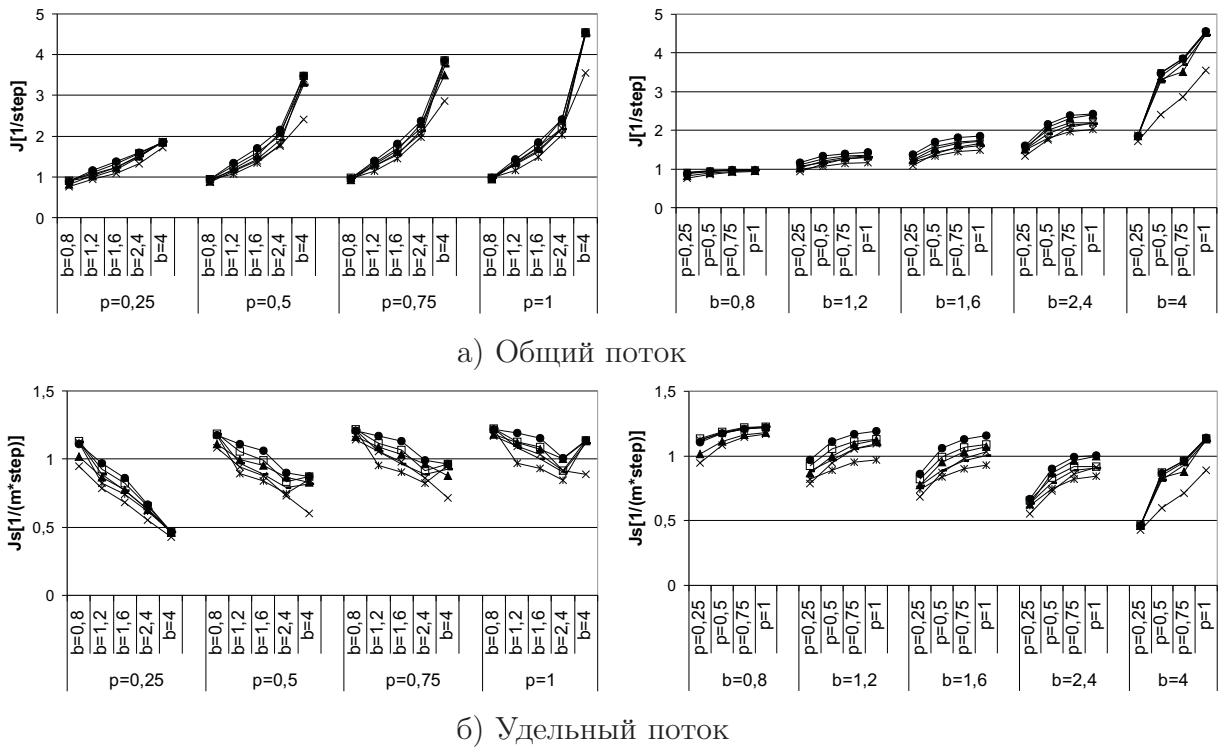
Параметры модели также влияют на величину потока. При малых k_P графики ведут себя одинаково и расположены близко к друг другу. Пара $k_P = 12, r = 10$ дает наименьшую величину потока, что наиболее сильно проявляется при $b = 4$ м.

В эксперименте [14] было получено, что при движениях через проем малого количества человек ($N = 20, N = 40$) время мало и не достигается стационарного состояния потока. Увеличение N дает более корректные значения. В модели стохастичность влияет на время. При $N = 20$ и $N = 40$ ожидаемое теоретическое время сравнимо с влиянием стохастичности модели (примерно от 4 до 7 шагов), и модельная динамика не может быть корректно оценена.

Исследование потока при различных начальных плотностях ρ_0 .

В этом эксперименте размеры пространства не менялись. Изменялась начальная плотность частиц $\rho_0 = \{0, 25; 0, 5; 0, 75; 1\}$, что соответствует количеству частиц $N = \{30; 60; 90; 120\}$.

Рисунок 4.16 показывает зависимости потоков от начальной плотности и от ширины проема. (Распределение времени, его математическое ожидание T_{cp} и среднее квадратическое отклонение времени σ_T отражены в



\square $k_P=2; r=1$ \ast $k_P=2; r=10$ \bullet $k_P=4; r=1$ — $k_P=4; r=10$ \blacktriangle $k_P=12; r=1$ \times $k_P=12; r=10$

Рисунок 4.16 – Сужения. Зависимости общего и удельного потоков от ширины проема b и начальной плотности частиц ρ_0 для различных параметров модели k_P и r , $k_S = k_W = 4$

приложении А на рисунках А.17 и А.18.)

При $b = 0,8$ м величина J не чувствительна к изменению ρ_0 (рисунок 4.16а (справа)). Чувствительность потока к начальной плотности ρ_0 постепенно растет с увеличением b . То есть для тех ширин b , которые приводят к действительному сужению пути, перед проемом образуется скопление частиц и поток не зависит от ρ_0 . Для предыдущего примера получен подобный результат. В этих случаях ситуация перед сужением развивается по похожим сценариям.

Рисунок 4.16а (слева) показывает, что при $\rho_0 = \{0,5; 0,75; 1\}$ форма графиков потоков почти не зависит от начальной плотности, что согласуется с данными из [2], рисунок 4.11.

Натурные данные показывают, что поток возрастает, а удельный поток практически не изменяется с увеличением ширины проема. Но при натуральных наблюдениях плотность перед проемом постоянная. Чтобы срав-

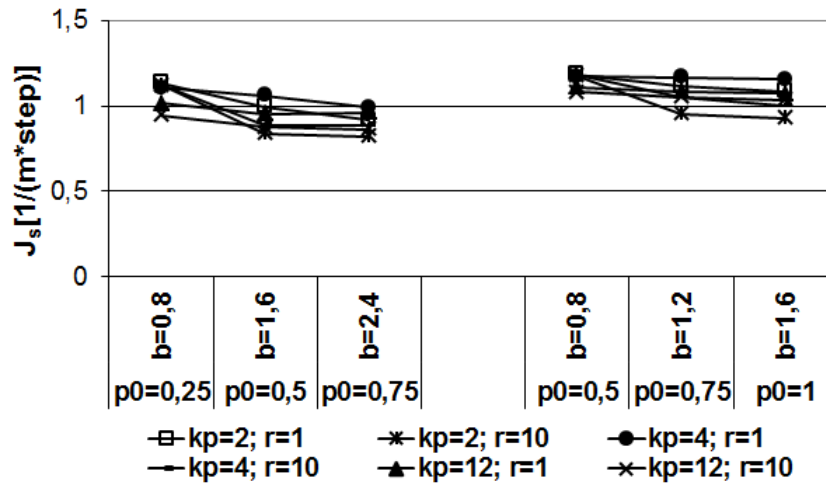


Рисунок 4.17 – Удельный поток при сравнимых условиях перед проемом для различных параметров модели k_P и r

нить полученный модельный результат с натурным, сгруппируем модельные данные по следующему принципу: покажем изменение удельного потока при изменении b вместе с пропорциональным изменением начальной плотности. Такое представление дает постоянные условия перед сужением. Рисунок 4.17 показывает, что удельный поток практически не изменяется с увеличением b , что согласуется с данными [2].

4.2 Уточнение скорости движения. Сравнение с данными натуральных экспериментов

Чтобы сравнить полученные в главе 4.1 потоки, вычисленные по модельным данным $J_s[1/(m \cdot \text{шаг})]$, с потоками, вычисленными по данным натурального эксперимента $J_s[1/(m \cdot c)]$ (данные натурального эксперимента взяты из литературных источников), необходимо модельные единицы измерения перевести в естественные (в минуты или секунды). Таким образом, возникает вопрос о способе перевода дискретного модельного времени в естественное (или о способе шкалирования вычислительного шага). Этот вопрос является наиважнейшим для последующего применения модели на практике.

Будем рассматривать прямой коридор $2 \times 50 \text{ м}^2$, рисунок 4.1 (специально рассматривается область с очень простой геометрией, где лишь огра-

ниченный набор явлений, свойственных реальному процессу может быть реализован и, соответственно, проверен). Параметры модели $k_S = k_W = 4$, $k_P = \{2; 4; 12\}$, $r = \{1; 10\}$. Граничные условия — периодические, так как данные натуральных экспериментов получают в установившемся режиме движения, что в модели соответствует периодическим граничным условиям.

Построим модельные зависимости удельных потоков J_s от плотности в естественных единицах $[1/(м \cdot с)]$ и сравним полученные результаты с потоками, построенными по данным натурального эксперимента. J_s вычисляется по формуле:

$$J_s = \frac{N}{T_{\text{ест}} \cdot b} = \frac{N}{T \cdot \Delta t \cdot b} [1/(м \cdot с)],$$

где N — количество человек в области, b — ширина прохода. $T_{\text{ест}}$ — время в естественных единицах и

$$T_{\text{ест}} = T \cdot \Delta t [с].$$

T — дискретное модельное время, Δt — время дискретного шага и

$$\Delta t = \frac{0,4}{V} [с].$$

0,4 [м] — размер ячейки, V [м/с] — скорость.

Главным вопросом при вычислении Δt является определение скорости движения V .

Обычно, при вычислении Δt используется фиксированное значение скорости [75], [79]. В [75] за V берётся скорость свободного движения 1,34 [м/с] [4] и $\Delta t = \frac{0,4 [м]}{1,34 [м/с]} \approx 0,3 [с]$. Но скорость свободного движения также различается у исследователей: в [4] $V_{\text{св}} = 1,34 [м/с]$, в [2] $V_{\text{св}} = 1,6 [м/с]$, в [79] $V_{\text{св}} = 1 [м/с]$.

На рисунке 4.18 представлены модельные потоки $J_s(V_{\text{св}})$ ПГУ в сравнении с потоками, вычисленными по данным натурального эксперимента. Параметры модели $k_S = k_P = k_W = 4$, $r = 10$. При вычислении Δt использовалась скорость свободного движения и $\Delta t = 0,3 [с]$.

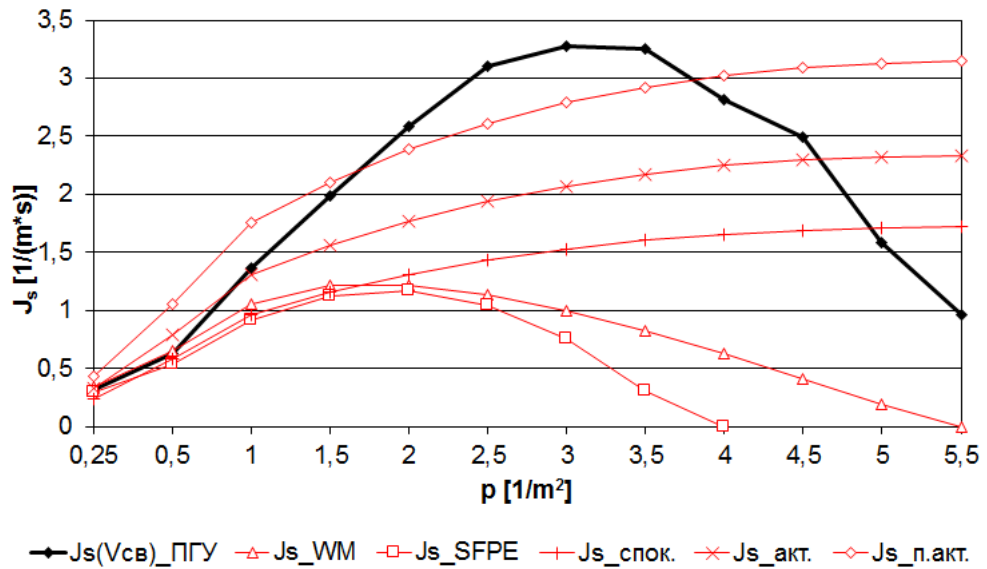


Рисунок 4.18 – Сравнение модельного удельного потока $J_s(V_{св})_{ПГУ}$, вычисленного при $\Delta t = 0,3$ [с], с натурными потоками J_s_{WM} , J_s_{SFPE} , $J_s_{спок.}$, $J_s_{акт.}$, $J_s_{п.акт.}$.

В качестве данных натурального эксперимента использовались аналитические зависимости скорости от плотности V_ρ и $J_s^{нат} = \rho V$. J_s_{WM} — поток, вычисленный по данным Вейдманна [4]. J_s_{SFPE} — данные SFPE [111]. $J_s_{спок.}$, $J_s_{акт.}$, $J_s_{п.акт.}$ — данные В.В. Холщевникова и Д.А. Самошина [1] (различаются по категориям движения: спокойное, активное и повышенной активности). Исследования В.В. Холщевникова и Д.А. Самошина являются продолжением работ В.М. Предтеченского и А.И. Милинского [2].

В [4] используется следующая зависимость для определения скорости движения от плотности: $V(\rho) = 1,34(1 - \exp(-1,913(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{5,4})))$.

В [111]: $V(\rho) = 1,4(1 - 0,266\rho)$.

В [1] говорится, что скорость движения людского потока — величина случайная, которая подчиняется нормальному закону распределения с числовыми характеристиками:

- математическое ожидание $MV(\rho) = v_0(1 - 0,295 \ln \frac{\rho}{\rho_0})$;
- среднее квадратическое отклонение $\sigma_V(\rho) = \sigma_{v_0}(1 - 0,295 \ln \frac{\rho}{\rho_0})$,

где v_0 и σ_{v_0} — математическое ожидание скорости свободного движения

людей в потоке и её среднее квадратическое отклонение, в зависимости от категории движения. При спокойном движении — $v_0 = 0,96$ [м/с], $\sigma_{v_0} = 0,14$ [м/с]; при активном — $v_0 = 1,3$ [м/с], $\sigma_{v_0} = 0,2$ [м/с]; при повышенной активности — $v_0 = 1,75$ [м/с], $\sigma_{v_0} = 0,25$ [м/с]. $\rho_0 = 0,51$ [1/м²] — предельное значение плотности людского потока, до достижения которого возможно свободное движение людей (значение ρ_0 в общем случае зависит от вида пути, но в работе рассматривается только движение по горизонтальным путям в здании, в этом случае $\rho_0 = 0,51$ [1/м²]). ρ — текущая плотность потока. При $\rho \leq \rho_0$: $MV(\rho) = v_0$ и $\sigma_V(\rho) = \sigma(v_0)$.

Рисунок 4.18 показывает, что при фиксированном значении Δt вычисленный удельный поток не соответствует ни одним натурным данным уже при $\rho > 0,5$ [1/м²]; значение модельного потока завышается и, следовательно, занижается время выхода. Такой способ оценивания Δt неприемлем.

В первой главе было сказано, что скорость движения человека зависит от плотности и значения скоростей разнятся в зависимости от исследователя. Поэтому будем вычислять Δt как:

$$\Delta t(\rho) = \frac{0,4}{V(\rho)}[\text{с}].$$

На рисунке 4.19 представлены, вычисленные с использованием $\Delta t(\rho)$, модельные удельные потоки $J_s^{\text{мод}}$ при различных параметрах модели в сравнении с соответствующими натурными потоками. (Результаты отражены в работах [128], [135].)

Наблюдается совпадение модельного удельного потока и натурального до определённой плотности, с дальнейшим ростом плотности движение замедляется. Модельный удельный поток, вычисленный с использованием $\Delta t(\rho)$, всегда ниже натурального для любых данных натурального эксперимента. Следовательно, модель может оценивать время движения с запасом.

Были вычислены абсолютные и относительные погрешности для мо-

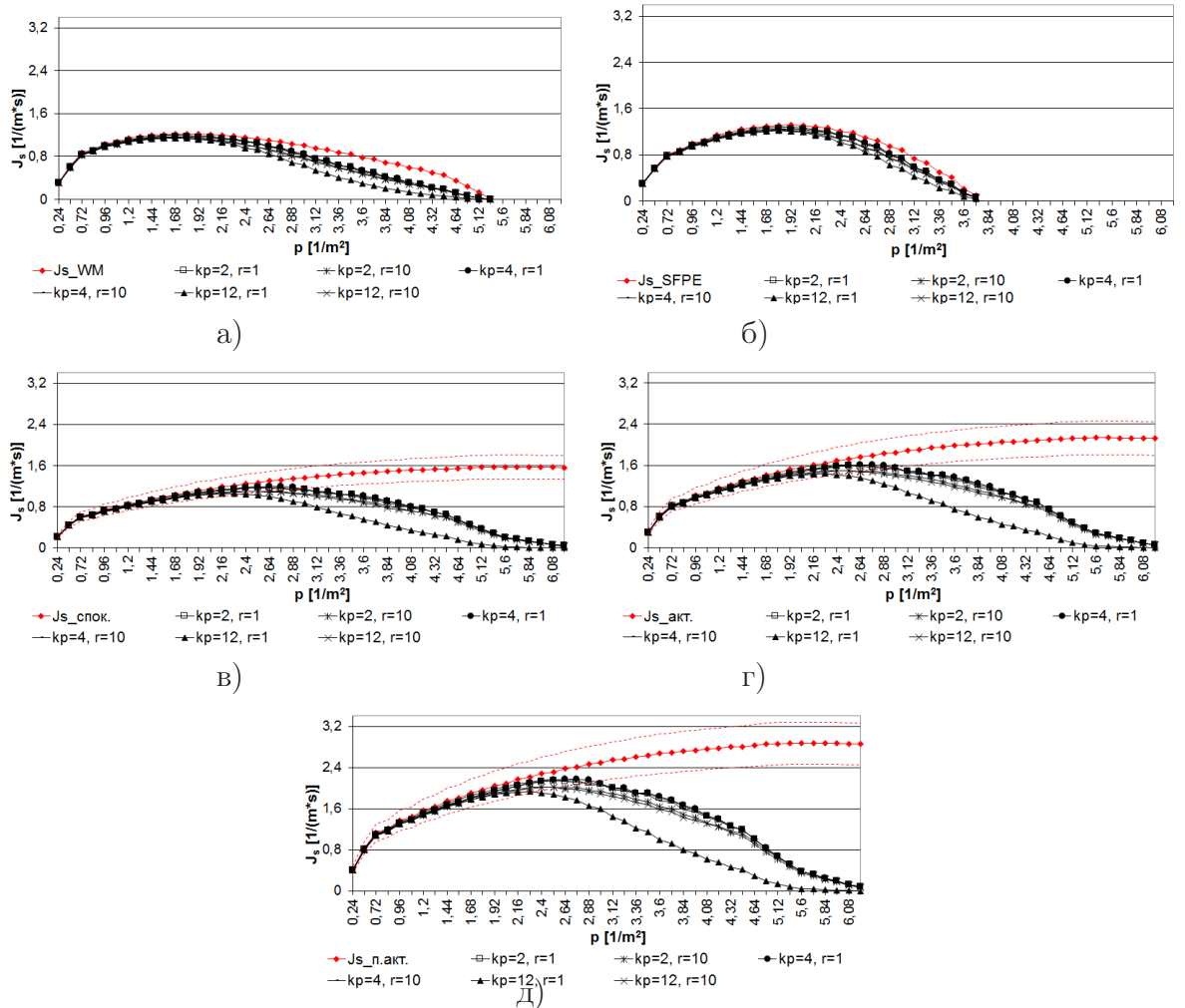


Рисунок 4.19 – Сравнение модельных удельных потоков, вычисленными для различных параметров модели k_p , r и $\Delta t(\rho)$, с соответствующими натурными потоками J_s_WM (а), J_s_SFPE (б), $J_s_спок.$ (в), $J_s_акт.$ (г), $J_s_п.акт.$ (д)

дельных потоков:

$$\Delta J_s = J_s^{\text{нат}} - J_s^{\text{мод}}, \quad \delta_{J_s} = \frac{\Delta J_s}{J_s^{\text{нат}}}.$$

В [1] разброс скорости движения (и, соответственно, значения потока) составляет 14-15% от средней величины (рисунок 4.19 пунктирные красные линии на графиках для $J_s_спок.$, $J_s_акт.$, $J_s_п.акт.$). Поэтому при анализе погрешностей, будем говорить, что модельный поток совпадает с натурным с точностью до 15%.

Анализ абсолютных погрешностей ΔJ_s показал, что чем медленнее скорость людей в натурном эксперименте (т.е. чем ниже поток), тем меньше

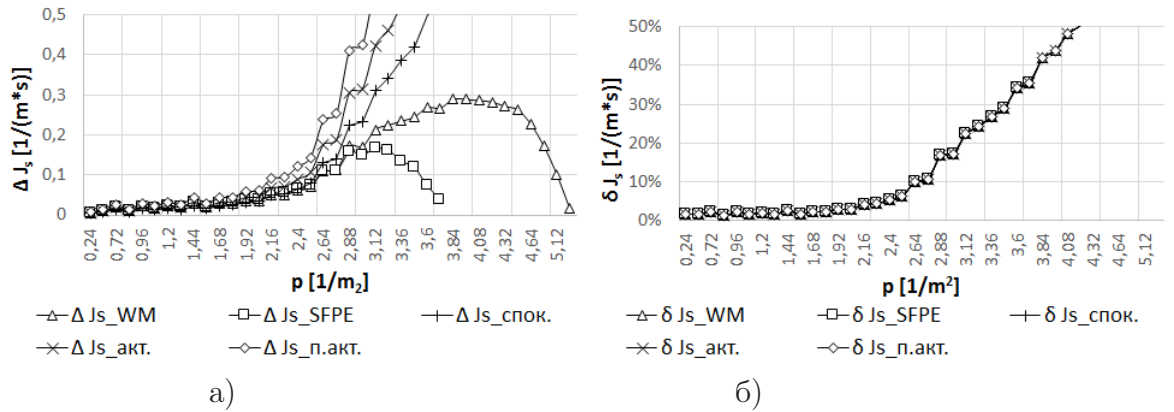


Рисунок 4.20 – Абсолютные (а) и относительные (б) погрешности модельных потоков, вычисленные для различных данных натурального эксперимента

расхождение модельных и натуральных потоков, рисунок 4.20а.

Анализ относительных погрешностей δJ_s показал, что значения δJ_s совпадают по параметрам для всех рассмотренных данных, рисунок 4.20б.

Минимальные значения δJ_s по параметрам достигаются для пары $k_P = 4$, $r = 10$ до $\rho = 2,48$, а затем для $k_P = 4$, $r = 1$, рисунок 4.21. Максимальные плотности, до которых значения ΔJ_s попадают в 15% интервал, составляют: для $k_P = 2$, $k_P = 4$, $r = 1$ – $\rho = 2,88$ [1/m²], для $k_P = 4$, $r = 10$ – $\rho = 2,72$ [1/m²], для $k_P = 2$, $k_P = 12$, $r = 10$ – $\rho = 2,48$ [1/m²], для $k_P = 12$, $r = 1$ – $\rho = 2,24$ [1/m²]. Самый близкий к данным натурального эксперимента удельных поток достигается при такой паре (k_P, r) , при которой время минимально.

В приложении 2 к Методике определения расчетных величин пожарного риска [26], [27] написано, что при интенсивности движения людского потока по участку пути больше, чем 16,5 м/мин (т.е. при плотности движения больше, чем 3,125 [1/m²]), следует увеличивать ширину участка пути. Из этого можно сделать вывод, что при проектировании зданий и сооружений не должно допускаться образование плотностей выше, чем 3,125 [1/m²]. Поэтому можно сказать, что такое совпадение модельных и натуральных значений потоков является хорошим результатом, так как данный диапазон плотностей почти соответствует рабочей области в практических задачах,

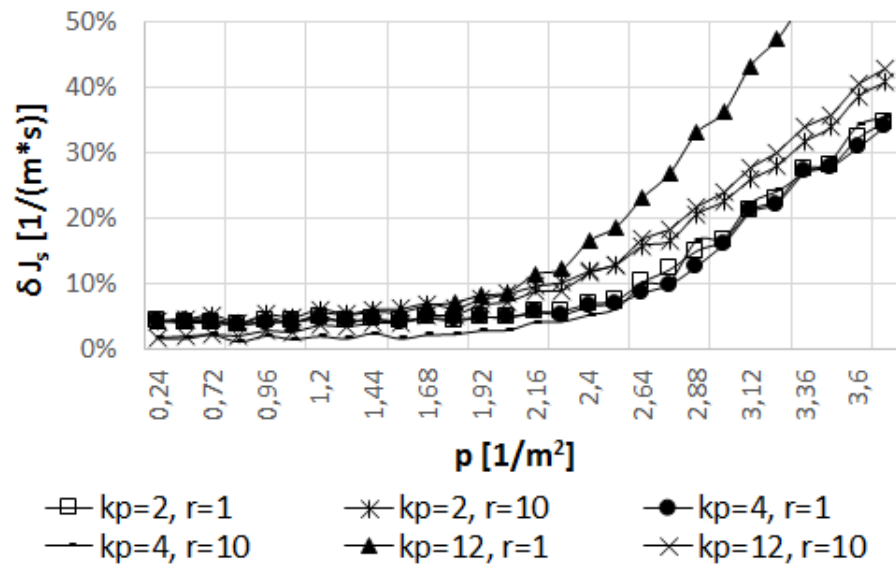


Рисунок 4.21 – Относительная погрешность модельных потоков, вычисленная для J_s_{SFPE} , для различных параметров k_P, r

где требуется моделирование движения людей.

Таким образом, предложенный способ уточнения скорости движения для расчёта времени совершения одного дискретного шага позволяет оценивать модельный поток близко к натурным данным до плотностей $\rho = 2,88$ [1/м²], что соответствует рабочему диапазону в практических задачах. После этой плотности поток в модели замедляется.

Модельный удельный поток всегда ниже натурального, следовательно, время движения может оцениваться с запасом. Самый близкий к данным натурального эксперимента поток среди всех рассматриваемых параметров достигается при такой паре (k_P, r) при которой модельное время T минимально.

4.3 Малый концертный зал и Камерный зал Красноярской краевой филармонии

Сценарий. Рассматриваются Камерный и Малый (МКЗ) залы Красноярской краевой филармонии (г. Красноярск). На рисунках 4.22 и 4.23 представлены расчётные схемы эвакуации (взяты из расчётного обоснования к мероприятиям по обеспечению пожарной безопасности объекта

«Реконструкция Красноярской краевой филармонии» [120]) и геометрии пространств с начальным расположением частиц для моделирования.

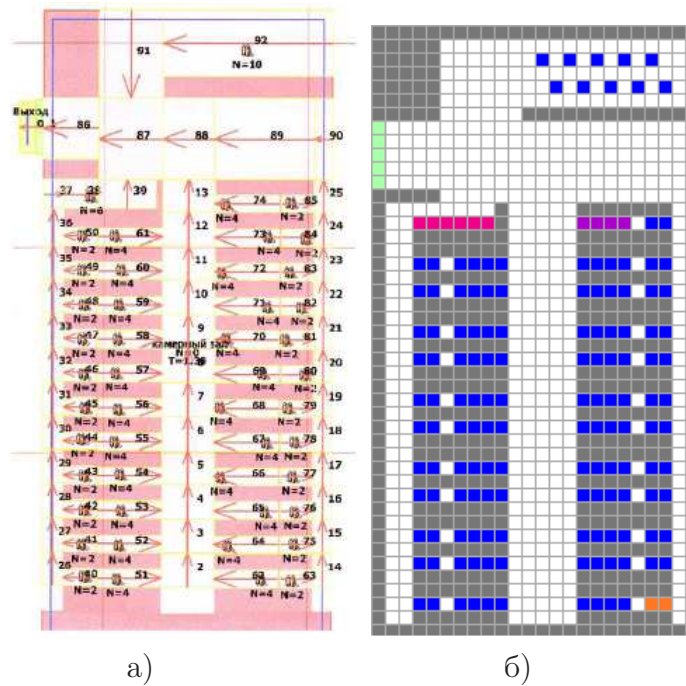


Рисунок 4.22 – Камерный зал филармонии: а) расчётная схема; б) геометрия пространства в модели

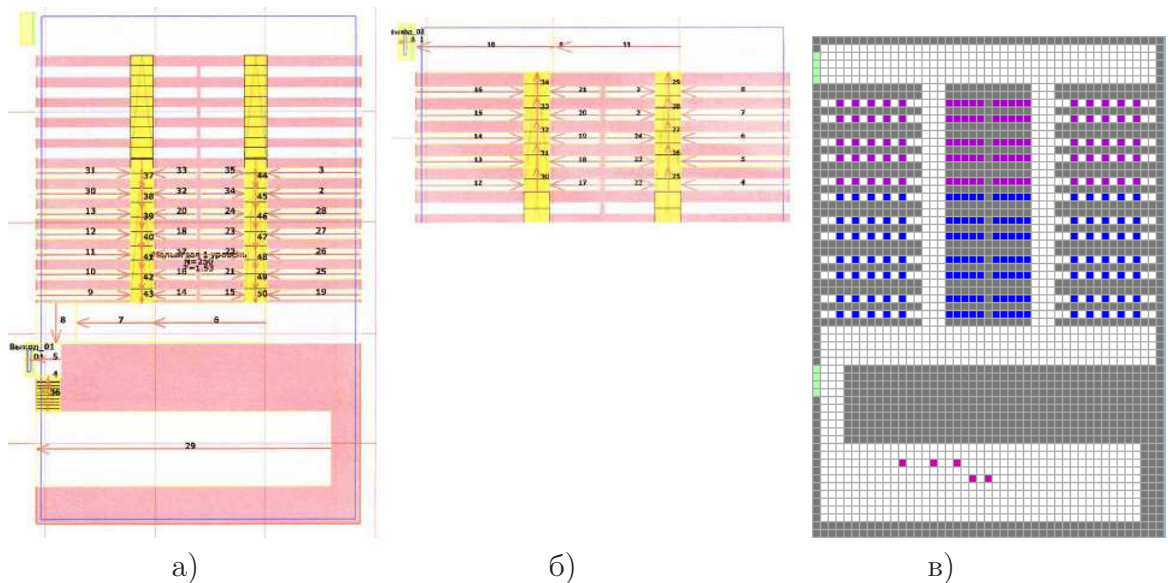


Рисунок 4.23 – Малый концертный зал филармонии: а), б) расчётные схемы; в) геометрия пространства в модели

Параметры модели $k_S = k_W = 4$, $k_P = r = 10$. Количество частиц в области: для камерного зала $N = 154$, для МКЗ $N = 245$. Было произведено $M = 1000$ экспериментов.

Рассматривалось два варианта выхода частиц из области. Свободный сценарий: пути движения выбираются людьми в процессе (как правило, кратчайший путь). Сценарий по расчётной схеме: пути движения назначены согласно расчётной схеме (рисунок 4.23 и рисунок 4.22), где пути обозначены стрелками.

Результаты исследования представлены в работе [143].

Результаты. *Камерный зал.*

Рассмотрим динамику движения частиц в зависимости от сценария движения: свободный и по расчётной схеме. В сценарии по расчётной схеме частицы полностью используют проходы: как центральный, так и боковые (рисунок 4.24а при $t = 3$ с и $t = 18$ с, рисунок 4.25а интенсивность движения). При свободном сценарии используется только центральный и ближайший к выходу боковой проход (рисунок 4.24б при $t = 3$ с и $t = 18$ с, рисунок 4.25б интенсивность движения). Здесь все частицы стремятся идти по кратчайшему пути и поэтому дальний от выхода боковой проход не используется. В итоге происходит задержка движения в ближайшем к выходу боковом проходе и в центральном проходе (рисунок 4.25б простаивание и конфликтность). В сценарии по расчётной схеме задержка движения происходит только в центральном проходе из-за большого количества частиц (рисунок 4.24а при $t = 48$ с, рисунок 4.25а простаивание и конфликтность).

Исследование времени выхода показало, что различие в динамике мало сказывается на нём. На рисунке 4.26 представлено распределение (гистограмма частот) времени выхода частиц для рассмотренных сценариев. Для сценария по расчётной схеме математическое ожидание времени выхода составляет $T_{cp} = 81,5$ с = 1,3584 мин, дисперсия времени $D = 4,8$ с². Для свободного сценария: $T_{cp} = 81,47$ с = 1,3579 мин, $D = 3,6$ с².

Δt выбрано из предположения, что в среднем частицы двигаются с плотностью $0,4$ [м²/м²] и берётся скорость при активном движении (так как предполагается, что движение происходит во время ЧС). Из этого следует

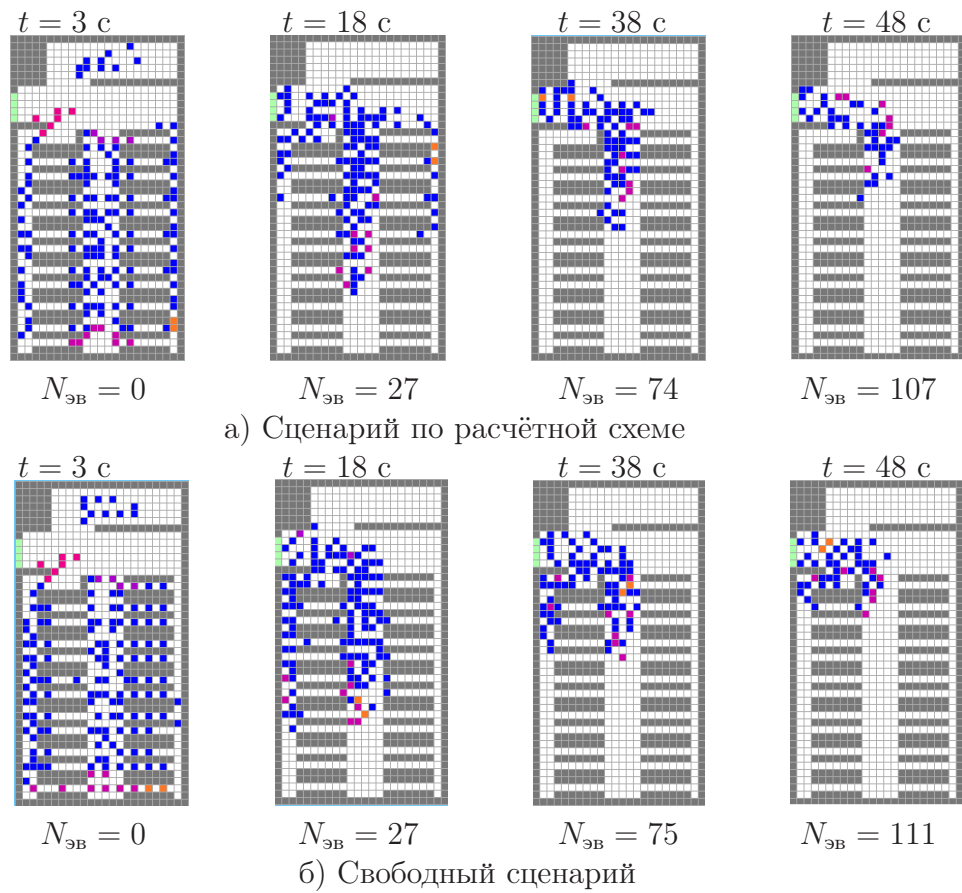


Рисунок 4.24 – Камерный зал филармонии. Динамика движения в моменты времени t . $N_{эв}$ – количество вышедших из области частиц

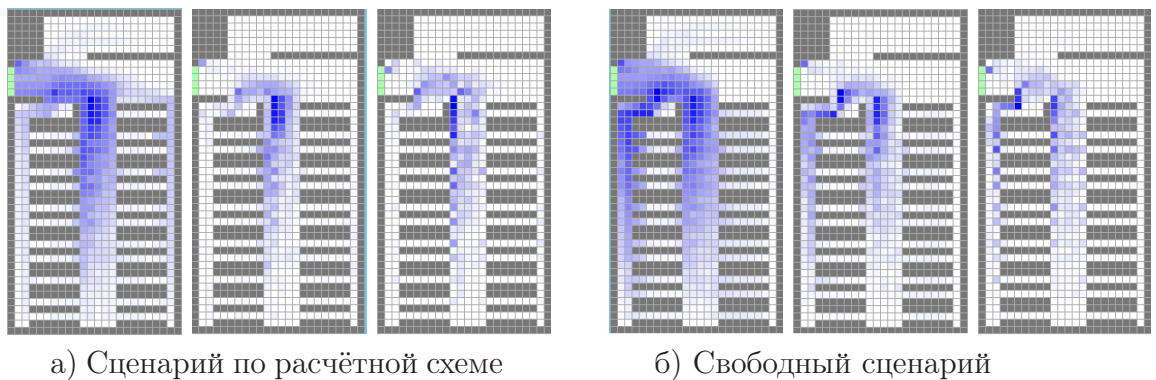


Рисунок 4.25 – Камерный зал филармонии. Интегральные характеристики движения (слева направо): интенсивность посещения ячеек, простаивание, конфликтность

(по формуле 4.2), что

$$\Delta t = \frac{0,4 \text{ м}}{0,572 \text{ м/с}} \approx 0,7 \text{ с} \approx 0,0116 \text{ мин.}$$

В [120] получено время эвакуации (расчётное) из камерного зала, согласно упрощённо-аналитической модели из методики определения расчётных величин пожарного риска ([26], [27]). Расчётное время эвакуации составля-

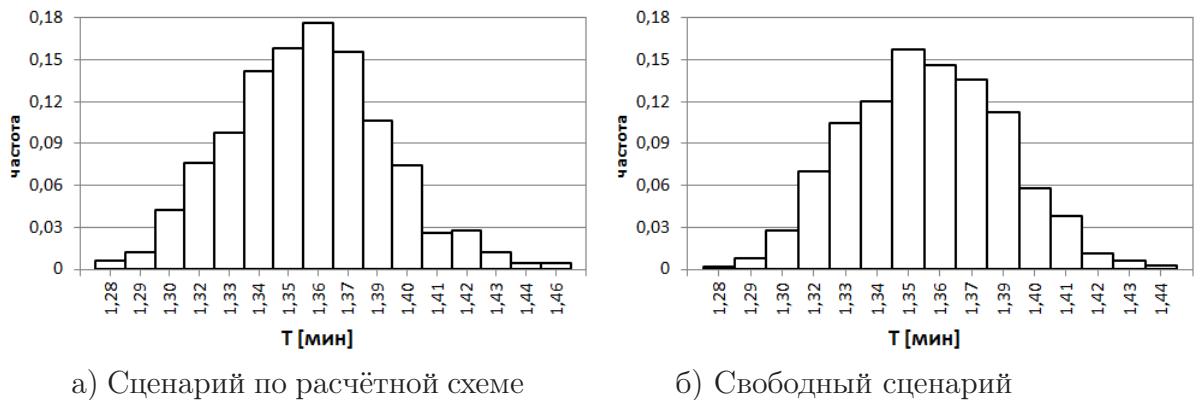


Рисунок 4.26 – Камерный зал филармонии. Распределение времени выхода (гистограммы частот)

ет 1,39 мин=83,4 с. Там же указано и необходимое время эвакуации равное 2 минутам (необходимое время эвакуации — это время за которое один из опасных факторов пожара (повышенная температура среды, дым, приводящий к потере видимости, токсичные газы, пониженная концентрация кислорода) достигнет предельно допустимого для человека значения).

Модельное время близко к расчётному и не превышает необходимого. В данном случае даже максимальные времена, полученные моделью, не превышают необходимого.

Малый концертный зал.

Динамика в МКЗ следующая. В сценарии по расчётной схеме верхние (розовые) частицы выходят быстрее, чем нижние (синие), рисунок 4.27а при $t = 63$ с. Но с другой стороны, перед нижним выходом возникает скопление. При свободном сценарии некоторые синие частицы выходят через верхний выход, рисунок 4.27б при $t = 42$ с и $t = 63$ с. И в момент времени $t = 84$ с в области меньше частиц, чем в тот же момент t при сценарии по расчётной схеме. Интегральные характеристики движения показывают, что в сценарии по расчётной схеме в проходах, которые ведут к нижнему выходу, частицы больше стоят и происходит больше конфликтных ситуаций, чем в проходах для верхнего выхода (рисунок 4.28а). В свободном сценарии интегральные характеристики движения равномерно распределены между двумя выходами (рисунок 4.28б). Можно сказать, что нижний выход в сценарии по расчётной схеме больше загружен.

На рисунке 4.29 представлены распределения времени выхода для рассмотренных сценариев выхода из МКЗ. Для сценария по расчётной схеме математическое ожидание времени выхода составляет $T_{cp} = 109,8 \text{ с} = 1,83 \text{ мин}$, дисперсия времени $D = 2,4 \text{ с}^2$. Для свободного сценария: $T_{cp} = 98,4 \text{ с} = 1,64 \text{ мин}$, $D = 2,4 \text{ с}^2$. Здесь, в отличие от примера для камерного зала, время выхода для свободного сценария меньше, чем при сценарии по расчётной схеме.

Расчётное время эвакуации, вычисленное по упрощённо-аналитической модели [120], составляет $1,53 \text{ мин} = 91,8 \text{ с}$. Необходимое время эвакуации – 2 мин. Модельное время превышает расчётное. Разница составляет 18 секунд для сценария по расчётной схеме и 6,6 секунд для свободного сценария. Тем не менее, модельные времена не превышают необходимого.

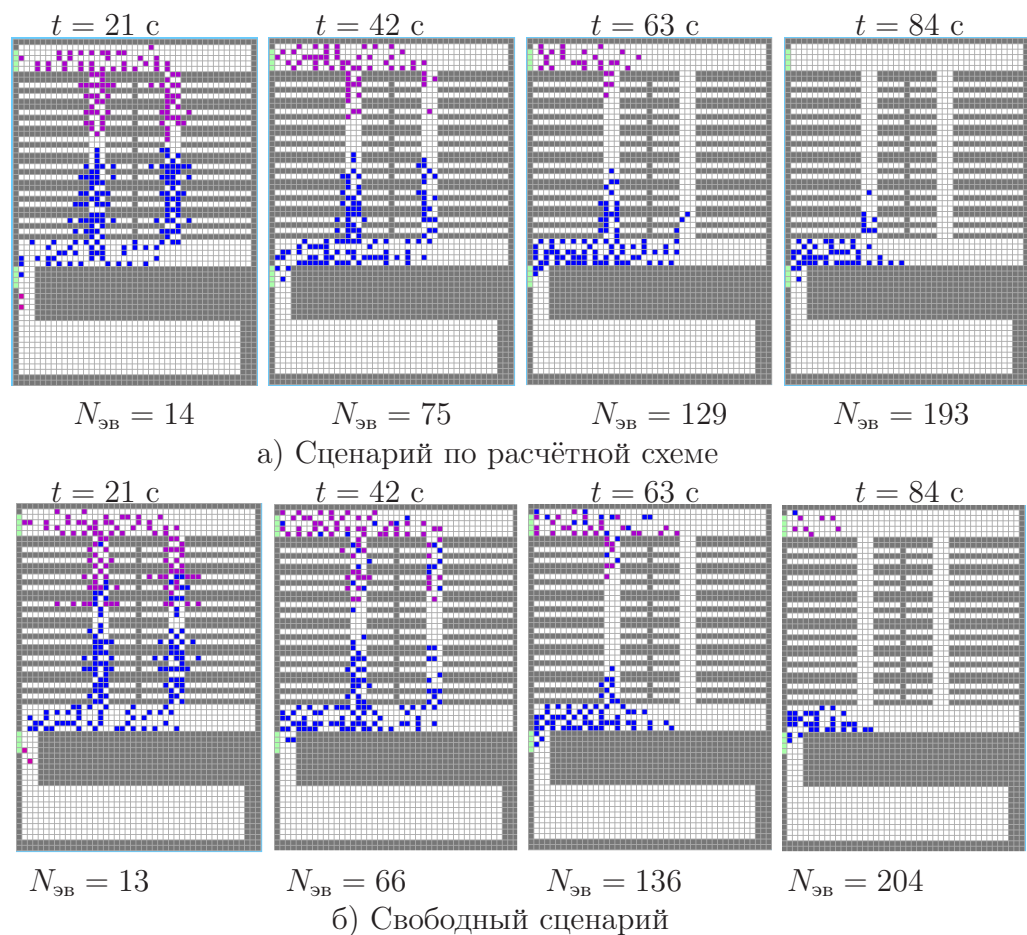
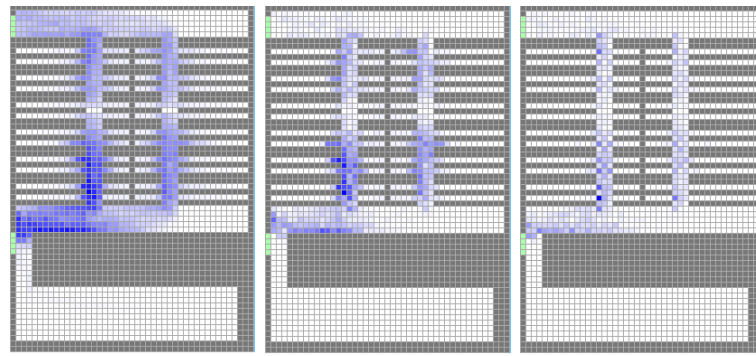
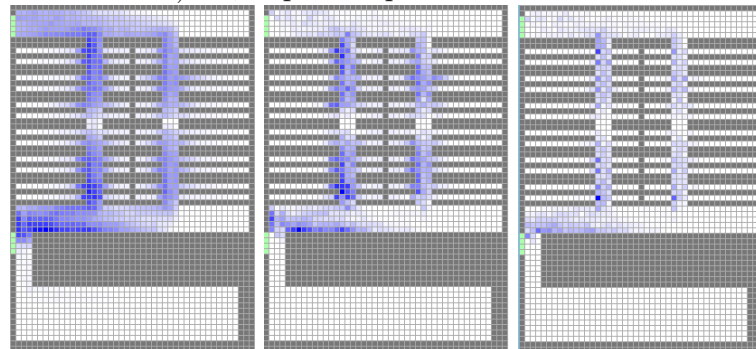


Рисунок 4.27 – МКЗ. Динамика движения в моменты времени t . $N_{эв}$ – количество вышедших из области частиц

Таким образом, была рассмотрена динамика движения в Камерном за-

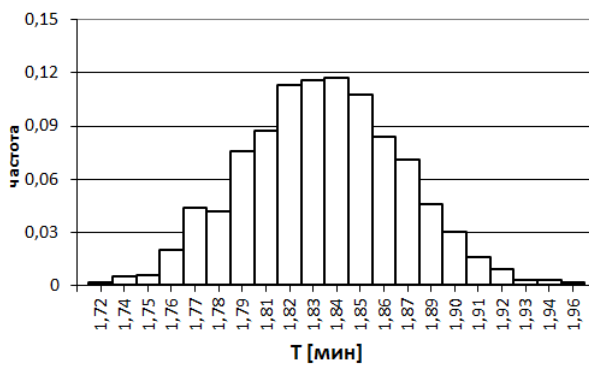


а) Сценарий по расчётной схеме

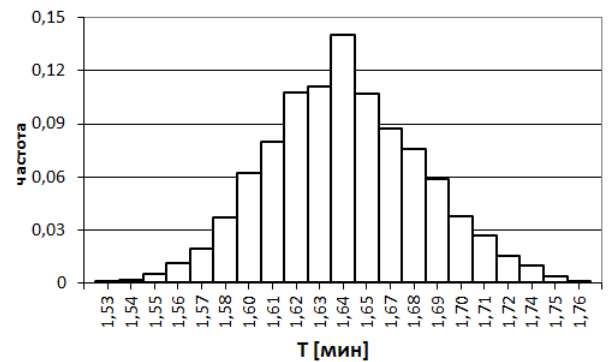


б) Свободный сценарий

Рисунок 4.28 – МКЗ. Интегральные характеристики движения (слева направо): интенсивность посещения ячеек, простаивание, конфликтность



а) Сценарий по расчётной схеме



б) Свободный сценарий

Рисунок 4.29 – МКЗ. Распределение времени выхода (гистограммы частот)

ле и Малом концертном зале филармонии города Красноярска при двух сценариях движения. Исследовано время выхода и проведено сравнение с временем, рассчитанным по упрощённо-аналитической модели из методики определения расчётных величин пожарного риска ([26], [27]).

Модельное время для камерного зала близко к расчётному, а для МКЗ превышает его. Время в модели оценивается с запасом. Тем не менее, модельные времена не превышают необходимого времени. Можно сказать, что модель еще раз подтверждает выполнение условия своевременности

эвакуации из данных помещений.

К плюсам модели можно отнести то, что она позволяет находить не одно значение времени выхода, а его распределение. Также можно рассматривать несколько сценариев движения. И было показано, что маршрутизация людских потоков позволяет уменьшать время выхода.

4.4 Выводы

В главе построены зависимости потока от плотности — фундаментальные диаграммы (ФД), предложен новый способ уточнения скорости движения для определения времени одного дискретного шага (Δt), рассмотрен пример движения в Камерном и Малом залах Красноярской краевой филармонии.

ФД построены для различных тестовых сценариев:

1. прямой коридор при открытых и периодических граничных условиях;
2. коридоры с поворотами при периодических граничных условиях: с одним, с двумя и с четырьмя поворотами на 90° ; с одним поворотом на 180° ; с двумя поворотами на 90° , но с различным направлением поворотов;
3. комната с сужением при открытых граничных условиях.

Результаты исследований показали, что модельные ФД качественно соответствуют ФД, построенным по данным натурального эксперимента (при периодических граничных условиях), и ФД для других моделей. Динамика модели не зависит от граничных условий до плотности $3 [1/\text{м}^2]$. Модельный поток чувствителен к наличию на пути движения поворотов. Количество (больше одного) и вид поворота на величину потока существенно не влияют.

В сужениях модельный поток не зависит от ширины сужения при постоянной плотности потока, что согласуется с результатами натуральных экспериментов.

Новый способ определения скорости движения для расчета Δt — времени совершения одного дискретного шага в модели, основывается на том, что скорость движения людей зависит от плотности людей в рассматриваемой области. Известные способы определения Δt используют скорость свободного движения человека вне зависимости от плотности. Использование скорости свободного движения для определения Δt сильно завышает величину потока.

Предложенное уточнение скорости движения позволяет оценивать модельный поток близко к данным натурального эксперимента. В качестве данных натурального эксперимента использовались данные В.В. Холщевникова и Д.А. Самошина, U.Weidmann, SFPE. Модельный поток согласуется с данными натурального эксперимента на прямых участках пути при плотностях до $2,88 [1/\text{м}^2]$. Модель оценивает время с запасом. Самый близкий к данным натурального эксперимента поток среди всех рассматриваемых параметров достигается при такой паре (k_P, r) при которой модельное время T минимально.

Рассматривался пример движения из Камерного и Малого залов Красноярской краевой филармонии при двух сценариях движения. Модельные времена не превышают необходимого времени и, можно сказать, что модель еще раз подтверждает выполнение условия своевременности эвакуации из данных помещений. Показано, что маршрутизация людских потоков позволяет уменьшать время выхода.

Заключение

В диссертационной работе получены следующие результаты:

- 1) разработана клеточно-автоматная стохастическая модель движения людей, в которой впервые были введены и формализованы понятия стратегии «терпеливого человека», стратегии «кратчайшего пути» и стратегии «быстрого пути». В отличии от других работ при вычислении переходных вероятностей учитывается плотность частиц в направлении в зависимости от близости других частиц к текущей, стены и препятствия учитываются только в тех направлениях, которые ведут к выходу и в которых нет других частиц. Предложен новый способ учёта поля расстояний в формуле переходных вероятностей, что позволило снять существующие ограничения на размеры расчётной области в сравнении с аналогичными моделями. Формализованы правила переходов;
- 2) разработаны и программно реализованы численные алгоритмы модели, позволяющие визуализировать движение частиц и проводить исследования модели;
- 3) изучено влияние параметров модели на динамику движения частиц. Параметры модели влияют на динамику движения частиц, на время выхода, регулируют направленность движения и выбор стратегий «кратчайшего пути» и «быстрого пути»;
- 4) предложены тестовые задачи для исследования модели: растекание потока, сравнение фундаментальных диаграмм для прямых участков пути и с поворотами;

- 5) проведены исследования модели для различных тестовых задач. Построены фундаментальные диаграммы. Результаты исследований согласуются с данными натуральных экспериментов и с результатами других моделей движения людей;
- 6) предложено уточнение скорости движения для перевода дискретного времени в естественные единицы измерения. Разработанная модель согласуется с фундаментальными диаграммами по данным натуральных экспериментов (из литературных источников) на прямых участках пути при плотностях до $2,88 [1/м^2]$.

Результаты работы имеют теоретическую и практическую значимость. Использование результатов диссертационной работы подтверждено актами внедрения. В **Приложении В** приведены копии актов о внедрении результатов диссертационной работы.

Список литературы

- [1] Холщевников, В.В. Эвакуация и поведение людей при пожарах: учебное пособие / В.В. Холщевников, Д.А. Самошин. – М: Академия ГПС МЧС России, 2009. – 212 с.
- [2] Предтеченский, В.М. Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков: учебное пособие для вузов / В.М. Предтеченский, А.И. Милинский – М.: Стройиздат, 1972. – 375 с.
- [3] Беляев, С.В. Эвакуация зданий массового назначения / С.В. Беляев. – М: Всесоюзная академия архитектуры, 1938. – 74 с.
- [4] Weidmann, U. Transporttechnik der Fussgänger. Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (Literaturauswertung) / U. Weidmann. – Zürich: IVT, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen-und Eisenbahnbau, 1992. – 110 p.
- [5] Hankin, B.D. Passenger flow in subways / B.D. Hankin, R.A. Wright // Journal of the Operational Research Society. – 1958. – Vol. 9, N 2. – P. 81-88.
- [6] Helbing, D. Dynamics of crowd disasters: An empirical study / D. Helbing, A. Johansson, H. Z. Al-Abideen // Physical Review E. – 2007. – Vol. 75. – P. 046109.
- [7] Mori, M. A new method for evaluation of level of service in pedestrian facilities / M. Mori, H. Tsukaguchi // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 1987. – Vol. 21, N 3. – P. 223-234.
- [8] Navin, F.P.D. Pedestrian Flow Characteristics / F.P.D. Navin, R.J. Wheeler // Traffic Engineering. – 1969. – Vol. 39. – P. 30-36.
- [9] Oeding, D. Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fußgängerverkehrs / D. Oeding // Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 22, 1963.
- [10] Older, S.J. Movement of pedestrians on footways in shopping streets / S.J. Older // Traffic Engineering and Control. – 1968. – Vol. 10. – P. 160-163.

- [11] Seyfried, A. The fundamental diagram of pedestrian movement revisited / A. Seyfried, B. Steffen, W. Klingsch, M. Boltes // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. – 2005. – Vol. 10. – P. 10002.
- [12] Hoogendoorn, S.P. Pedestrian behavior at bottlenecks / S.P. Hoogendoorn, W. Daamen // Transportation Science. – 2005. – Vol. 39(2). – P. 0147-0159.
- [13] Nagai, R. Evacuation of crawlers and walkers from corridor through an exit / R. Nagai, M. Fukamachi, T. Nagatan // Physica A. – 2006. – Vol. 367. – P. 449-460.
- [14] Seyfried, A. New insights into pedestrian flow through bottlenecks/ A. Seyfried, O. Passon, B. Steffen, M. Boltes, T. Rupprecht, W. Klingsch// Transportation Science. – 2009. – Vol. 43. – P. 395-406.
- [15] Muir, H.C. Effects of motivation and cabin configuration on emergency aircraft evacuation behavior and rates of egress / H.C. Muir, D.M. Bottomley, C. Marrison // International Journal of Aviation Psychology. –1996. – Vol. 6(1). – P. 57-77.
- [16] Müller, K. Zur Gestaltung und Bemessung von Fluchtwegen für die Evakuierung von Personen aus Bauwerken auf der Grundlage von Modellversuchen: Dissertation / Müller Klaus. – Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg, 1981. – 238 p.
- [17] Kretz, T. Experimental study of pedestrian flow through a bottleneck / T. Kretz, A. Grünebohm, M. Schreckenberg // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. – 2006. – Vol. 10. – P. 10014.
- [18] Schadschneider, A. Evacuation dynamics: empirical results, modeling and applications / A. Schadschneider, W. Klingsch, H. Kluepfel, T. Kretz, C. Rogsch, A. Seyfried // Encyclopedia of Complexity and System Science. Springer. – 2009. – Vol. 3. – P. 3142-3197.
- [19] Милинский, А.И. Исследование процесса эвакуации зданий массового назначения: дис. ... канд. тех. наук / А.И. Милинский. – М.: МИСИ, 1951.
- [20] Gwynne, S. A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment / S. Gwynne, E.R. Galea, M. Owen, P. J. Lawrence, L. Filippidis // Building and Environment. –1999. – Vol. 34. – P. 741-749.
- [21] Kuligowsky, E.D. A review of building evacuation models/ E.D. Kuligowsky, R.D. Peacock. – National Institute of Standards

- and Technology, U.S. Department of Commerce, Technical note 1471, 2005. — 156p.
- [22] Das, P. Review of simulation techniques for microscopic mobility of pedestrian movement / P. Das, M. Parida, V.K. Katiyar // Trends in Transport Engineering and Applications. — 2014. — Vol. 1(1). — P. 27-45.
- [23] Henderson, L.F. On the fluid mechanics of human crowd motion / L.F. Henderson // Transportation Research. — 1974. — Vol. 8 — P. 509-515.
- [24] Helbing, D. A fluid dynamic model for the movement of pedestrian / D. Helbing // Complex System. — 1992. — Vol. 6. — P. 391-415.
- [25] Hughes, R.L. A continuum theory for the flow of pedestrians / R.L. Hughes // Transportation Research. Part B. — 2002. — Vol. 36 — P. 507-535.
- [26] Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности / Приказ МЧС РФ от 30.06.2009 N 382 (Зарегистрировано в Минюсте РФ 06.08.2009 N 14486).
- [27] О внесении изменений в методику определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности, утвержденную приказом МЧС России от 30.06.2009 N 382 / Приказ МЧС РФ от 12.12.2011 N 749 (Зарегистрировано в Минюсте РФ 30.12.2011 N 22871).
- [28] Самошин, Д.А. Расчет времени эвакуации людей. Проблемы и перспективы / Д.А. Самошин // Пожаровзрывобезопасность. — 2004. — N 1. — С. 33-46.
- [29] Daamen, W. First-order pedestrian traffic flow theory / W. Daamen, S.P. Hoogendoorn, P.H.L. Bovy // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. — 2005. — Vol. 1934, N.1. — P. 43-52.
- [30] Bruno, L. Non-local first-order modelling of crowd dynamics: A multidimensional framework with applications / L. Bruno, A. Tosin, P. Tricerri, F. Venuti // Applied Mathematical Modelling. — 2011. — Vol. 35, N. 1. — P. 426-445.

- [31] Colombo, R.M. A macroscopic model for pedestrian flows in panic situations / R.M. Colombo, P. Goatin, M.D. Rosini // International Series Mathematical Sciences and Applications. — 2010. — Vol. 32. — P. 255-272.
- [32] Lighthill, M.J. On kinematic waves: II. A theory of traffic flow on long crowded roads / M.J. Lighthill, G.B. Whitham // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. — 1955. — Vol. 229. — P. 317-345.
- [33] Richards, P.I. Shock waves on the highway / P.I. Richards // Operations Res. — 1956. — Vol. 4. — P. 42-51.
- [34] Helbing, D. Social force model for pedestrian dynamics / D. Helbing, P. Molnár // Physical Review E. — 1998. — Vol. 51. — P. 4282-4286.
- [35] Helbing, D. Simulation dynamics features of escape panic / D. Helbing, I. Farcas, T. Vicsek // Nature. — 2000. — Vol. 407. — P. 487-490.
- [36] Lewin, K. Field Theory in Social Science: selected theoretical papers / K. Lewin. — D. Cartwright (Ed.). New York: Harper and Row, 1951. — 346 p.
- [37] Kretz, T. On oscillations in the social force model / T. Kretz // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. — 2015. — Vol. 438. — P. 272-285.
- [38] Аптуков, А.М. Моделирование поведения паникующей толпы в многоуровневом разветвлённом помещении / А.М. Аптуков, Д.А. Брацун, А.В. Люшин // Компьютерные исследования и моделирование. — 2013. — Т. 5, № 3. — С. 491-508.
- [39] Zeng, W. A Modified Social Force Model for Pedestrian Behavior Simulation at Signalized Crosswalks / W. Zeng, H. Nakamura, P. Chen // Procedia — Social and Behavioral Sciences. — 2014. — Vol.138(14). — P. 521-530.
- [40] Nakayama, A. Instability of pedestrian flow and phase structure in a two-dimensional optimal velocity model / A. Nakayama, K. Hasebe, Y. Sugiyama // Physical Review E. — 2005. — Vol. 71. — P. 036121.
- [41] Okazaki, S. A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing / S. Okazaki, S. Matsushita // Proceedings of International Conference on Engineering for Crowd Safety. — 1993. — P. 271-280.
- [42] Rogsch, C. Vergleichende Untersuchungen zur dynamischen Simulation von Personenströmen: Diploma thesis / C. Rogsch. — The University of Wuppertal, 2005. — 103 p.

- [43] Техническое руководство «СИТИС: Флоутек ВД 2.70» [Электронный ресурс]. – ООО «Ситис». – 2013. – Режим доступа: <http://sitis.ru/media/documentation/FVD-TR-06.pdf>
- [44] Валидация и верификация эвакуационной модели СИТИС: Эватек [Электронный ресурс]. – ООО «Ситис». – 2008. – Режим доступа: <http://sitis.ru/media/documentation/EVA-TR-1-12.pdf>.
- [45] Сайт компании «The AnyLogic Company». Пешеходные потоки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.anylogic.ru/consulting/pedestrian-traffic-flows>.
- [46] Ноженкова, Л.Ф. О создании информационно-управляющей системы поддержки принятия решений по обеспечению пожарной безопасности на объектах науки и образования / Л.Ф. Ноженкова, Е.С. Кирик, А.А. Мельник, К.Ю. Литвинцев // Материалы XIX науч.-техн. конф. «Системы безопасности – СБ2010». – Москва: АГПС МЧС РФ, 2010. – С. 94-97.
- [47] Ноженкова, Л.Ф. ПБ-ЭКСПЕРТ: система обеспечения пожарной безопасности на объектах с массовым пребыванием людей / Л.Ф. Ноженкова, А.А. Мельник // Материалы III Междунар. науч.-практ. конф. «Сервис безопасности на объектах олимпийского комплекса во время подготовки и проведения XXII зимних олимпийских игр в 2014 году в г. Сочи». – Санкт-Петербург, 2010.
- [48] Сайт компании «Зк-эксперт» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zksigma.ru>.
- [49] Кирик, Е.С. О непрерывно-дискретной стохастической модели движения людей / Е.С. Кирик, Т.Б. Юргельян, Д.В. Круглов, А.В. Малышев // Материалы XIII Всероссийского семинара Моделирование неравновесных систем. – Красноярск: ИВМ СО РАН, 2010. – С. 81-85.
- [50] Kirik, E. A discrete-continuous agent model for fire evacuation modeling from multistory buildings / E. Kirik, A. Malyshev // Civil Engineering and Urban Planning III. – 2014. – P. 5-8.
- [51] Тоффоли, Т. Машины клеточных автоматов / Т. Тоффоли, Н. Марголюс, Пер. с англ. П. А. Власова, Н. В. Баранова. – М.: Мир, 1991. – 280 с.
- [52] Бандман, О.Л. Клеточно-автоматные модели пространственной динамики / О.Л. Бандман // Системная информатика: сб. научн. тр./ под

- ред. А.Г.Марчука. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2006. – С. 59-113.
- [53] Blue, V.J. Cellular automata modeling of pedestrian movements / V.J. Blue, M. Embrechts, J.L. Adler // Computational Cybernetics and Simulation, 1997 IEEE International Conference. – 1997. – Vol. 3. – P. 2320 - 2323.
- [54] Blue, V.J. Cellular automata microsimulation of bi-directional pedestrian flows / V.J. Blue, J.L. Adler // Journal of the Transportation Research Board. – 2000. – Vol. 1678. – P. 135-141.
- [55] Fukui, M. Self-organized phase transitions in cellular automaton models for pedestrians / M. Fukui, Y. Ishibashi // Journal of the Physical Society of Japan. – 1999. – Vol. 68. – P. 2861-2863.
- [56] Klüpfel, H. Microscopic simulation of evacuation processes on passenger ships / H. Klüpfel, H.T. Meyer-König, J. Wahle, M. Schreckenberg // S. Bandini, T. Worsch (Eds.). ACRI 2000, London, Springer, 2000. – P. 63-71.
- [57] Muramatsu, M. Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic / M. Muramatsu, T. Nagatani // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2000. – Vol. 275, N 1. – P. 281-291.
- [58] Fukui, M. Jamming transition in cellular automaton models for pedestrians on passageway / M. Fukui, Y. Ishibashi // Journal of the Physical Society of Japan. – 1999. – Vol. 68. – P. 3738-3739.
- [59] Weifeng, F. Simulation of bi-directional pedestrian movement using a cellular automata model / F. Weifeng, Y. Lizhong // Physica A. – 2003. – Vol. 321. – P. 633-640.
- [60] Maniccam, S. Effects of back step and update rule on congestion of mobile objects / S. Maniccam // Physica A. – 2005. – Vol. 346. – P. 631-650.
- [61] Nagai, R. Jamming transition in counter flow of slender particles on square lattice / R. Nagai, T. Nagatani // Physica A. – 2006. – Vol. 366. – P. 503-512.
- [62] Muramatsu, M. Jamming transition of pedestrian traffic at crossing with open boundary conditions / M. Muramatsu, T. Nagatani // Physica A. – 2000. – Vol. 286. – P. 377-390.
- [63] Tajima, Y. Clogging transition of pedestrian flow in t-shaped channel / Y. Tajima, T. Nagatani // Physica A. – 2002. – Vol. 303. – P. 239-250.
- [64] Blue, V.J. Flow capacities from cellular automata modeling of proportional splits of pedestrians by direction / V.J. Blue, J.L. Adler //

- M. Schreckenberg, S. D. Sharma (Eds.). Pedestrian and Evacuation Dynamics, Berlin Heidelberg, Springer, 2002. — P. 115-122.
- [65] Gipps, P.G. A micro-simulation model for pedestrian flows / P.G. Gipps, B. Marksjö // Mathematics and Computers in Simulation. — 1985. — Vol. 27. — P. 95-105.
- [66] Marconi, S. A multiparticle lattice gas automata model for a crowd / S. Marconi, B. Chopard // Lecture Notes in Computer Science. Cellular Automata. — 2002. — Vol. 2493. — P. 231-238.
- [67] Yamamoto, K. Simulation for pedestrian dynamics by real-coded cellular automata (RCA) / K. Yamamoto, S. Kokubo, K. Nishinari // Physica A. — 2007. — Vol. 379. — P. 654-660.
- [68] Rothman, D. H. Lattice-gas cellular automata / D. H. Rothman, S. Zaleski. — Cambridge: Cambridge University Press, 1997. — 297 p.
- [69] Yamamoto, K. Evacuation Dynamics in Room with Multiple Exits by Real-Coded Cellular Automata (RCA) / K. Yamamoto, R. Nonomura // Lecture Notes in Computer Science. Cellular Automata. — 2016. — Vol. 9863. — P. 344-352.
- [70] Малинецкий, Г.Г. Применение клеточных автоматов для моделирования движения группы людей / Г.Г. Малинецкий, М.Е. Степанцов // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2004. — Т. 44, N 11. — С. 2094-2098.
- [71] Burstedde, C. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton / C. Burstedde, K. Klauck, A. Schadschneider, J. Zittartz // Physica A. — 2001. — Vol. 295. — P. 507-525.
- [72] Burstedde, C. Cellular automaton approach to pedestrian dynamics-applications / C. Burstedde, A. Kirchner, K. Klauck, A. Schadschneider, J. Zittartz // M. Schreckenberg, S. D. Sharma (Eds.). Pedestrian and Evacuation Dynamics, Berlin Heidelberg, Springer, 2002. — P. 87-98.
- [73] Kirchner, A. Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics / A. Kirchner, A. Schadschneider // Physica A. — 2002. — Vol. 312. — P. 260-276.
- [74] Schadschneider, A. Cellular automaton approach to pedestrian dynamics-theory / A. Schadschneider // M. Schreckenberg, S.D. Sharma (Eds.). Pedestrian and Evacuation Dynamics, Berlin Heidelberg, Springer, 2002. — P. 75-86.
- [75] Kirchner, A. Discretization effects and the influence of walking speed in cellular automata models for pedestrian dynamics / A. Kirchner,

- H. Klüpfel, K. Nishinari, A. Schadschneider, M. Schreckenberg // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. — 2004. — Vol. 10. — P. 10011.
- [76] Schadschneider, A. Validation of CA models of pedestrian dynamics with fundamental diagrams / A. Schadschneider, A. Seyfried // Cybernetics and Systems. — 2009. — Vol. 40(5). — P. 367-389.
- [77] Meyer-König, T. A microscopic model for simulation mustering and evacuation process onboard passenger ships / T. Meyer-König, H. Klüpfel, M. Schreckenberg // Proceeding of the International Emergency Management Society Conference. — 2001.
- [78] Bandini, S. A Cellular Automata Model for Pedestrian and Group Dynamics: Motivations and First Experiments. / S. Bandini, F. Rubagotti, G. Vizzari, K. Shimura // Parallel Computing Technologies. Lecture Notes in Computer Science. — 2011. — Vol. 6873. — P. 125-139.
- [79] Gwizdała, T.M. Some properties of the floor field cellular automata evacuation model / T.M. Gwizdała // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. — 2015. — Vol. 419. — P. 718-728.
- [80] Сайт компании «Mott MacDonald Group Limited» [Электронный ресурс]. — Режим доступа:<http://www.steps.mottmac.com/>.
- [81] Bensilum, M. Grid Flow: An Object-oriented Building Evacuation Model Combining Pre-movement And Movement Behaviours For Performance-based Design M. Bensilum, D.A. Purser Fire Safety Science. — 2003. — Vol.7. — P.941-952.
- [82] Was, J. Crowd dynamics modeling in the light of proxemic theories / J.Was // Artificial Intelligence and Soft Computing. — 2010. — Vol.6114. — P. 683-688.
- [83] Thompson, P.A. Simulex: developing new computer modelling techniques for evacuation / P.A. Thompson, E.W. Marchant // Fire Safety Science — Proceedings of the 4th Intenational Symposium. — 1994. — P. 613-624.
- [84] Klein, W. Towards the calibration of pedestrian stream models / W. Klein, G. Köster, A. Meister // Lecture Notes in Computer Science. Parallel Processing and Applied Mathematics. — 2010. — Vol. 6068. — P. 521-528.
- [85] Ketchell, N. The EGRESS Code for Human Movement and Behaviour in Emergency Evacuation / N. Ketchell, S.S. Cole, D.M. Webber // Engineering for Crowd Safety. — 1994. — P.361-370.

- [86] Leng, B. An extended floor field model based on regular hexagonal cells for pedestrian simulation / B.Leng, J.Wang, W.Zhao, Z.Xiong // *Physica A*. – 2014. – Vol.402(0). – P.119-133.
- [87] Varas, A. Cellular automaton model for evacuation process with obstacles / A. Varas, M.D. Cornejo, D. Mainemer, B. Toledo, J. Rogan, V. Munoz, J.A. Valdivia // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. –2007. – Vol. 382(2). – P.631–642.
- [88] Yue, H. Simulation of pedestrian flow on square lattice based on cellular automata model / H. Yue, H. Hao, X. Chen, C. Shao // *Physica A*. – 2007. – Vol.384(2). – P.567-588.
- [89] Kretz, T. Comparison of various methods the calculation of the distance potential field / T. Kretz, C. Bönisch, P. Vortisch // W.W.F. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, M. Schreckenberg (Eds.). *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – P. 335-346.
- [90] Dijkstra, E. W. A note on two problems in connexion with graphs / E. W. Dijkstra // *Numerische Mathematik*. – 1959. – Vol. 1.– P. 269-271.
- [91] Nishinari, K. Toward smooth movement of crowds / K. Nishinari, Y. Suma, D. Yanagisawa, A. Tomoeda, A. Kimura, R. Nishi // W.W.F. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, M. Schreckenberg (Eds.). *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – P. 293-308.
- [92] Kirchner, A. Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics / A. Kirchner, K. Nishinari, A. Schadschneider // *Physical Review E*. – 2003. – Vol. 67(5). – P. 056122/1-056122/10.
- [93] Song, W. A cellular automata evacuation model considering friction and repulsion / W. Song, Y. Yu, W. Fan, H. Zhang // *Science in China Ser. E Engineering and Materials Science*. – 2005. – Vol. 48, N 4. – P. 403-413.
- [94] Yanagisawa, D. Mean-field theory for pedestrian outflow through an exit / D. Yanagisawa, K. Nishinari // *Physical Review E*. – 2007. – Vol. 76(2). – 061117.
- [95] Yanagisawa, D. Introduction of frictional and turning function for pedestrian outflow with an obstacle / D. Yanagisawa, A. Kimura, A. Tomoeda, R. Nishi, Y. Suma, K. Ohtsuka, K. Nishinari // *Physical Review E*. – 2009. – Vol. 80. – 036110.

- [96] Kretz, T. F.A.S.T. – Floor field and agent-based simulation tool / T. Kretz, M. Schreckenberg // Proceedings of International Symposium of Transport Simulation. – 2006. – P. 125-136.
- [97] Nishinari, K. Extended floor field CA model for evacuation dynamics / K. Nishinari, A. Kirchner, A. Namazi, A. Schadschneider // IEICE Transactions on Information and Systems, E87-D. – 2004. – P. 726-732.
- [98] Bandini, S. Towards an Integrated Approach to Crowd Analysis and Crowd Synthesis: a Case Study and First Results / S. Bandini, A. Gorrini, G. Vizzari // Pattern Recognition Letters. – 2014. – Vol. 44. – P. 16-29.
- [99] Henein, C. Macroscopic effects of microscopic forces between agents in crowd models / C. Henein, T. White // Physica A: Statistical and Theoretical Physics. – 2007. – Vol. 373. – P. 694-712.
- [100] Ezaki, T. Simulation of space acquisition process of pedestrians using proxemic floor field model / T. Ezaki, D. Yanagisawa, K. Ohtsuka, K. Nishinari // Physica A. – 2012. – Vol. 391(1). – P. 291-299.
- [101] Dudek-Dyduch, E. Knowledge representation of pedestrian dynamics in crowd: Formalism of cellular automata / E. Dudek-Dyduch, J. Was // Artificial Intelligence and Soft Computing – ICAISC 2006. Lecture Notes in Computer Science. – 2006. – Vol. 4029. – P. 1101-1110.
- [102] Meyer-König, T. The RiMEA Project – development of a new regulation / T. Meyer-König, N. Waldau, H. Klüpfel // N. Waldau, P. Gattermann, H. Knoflacher, M. Schreckenberg (Eds.). Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005, Springer, Heidelberg. – 2007. – P. 309-313.
- [103] Кирик, Е.С., Тестирование компьютерных программ по расчёту времени эвакуации на примере модуля SIGMAEVA / Е.С. Кирик, А.В. Малышев // Пожарная безопасность. – 2014. – № 1. – С. 78-85.
- [104] Ronchi, E. Assessing the verification and validation of building fire evacuation models / E. Ronchi, E.D. Kuligowski // Fire Technology. – 2016. – Vol.52. – P. 197-219.
- [105] Gwynne, S. A systematic comparison of model predictions produced by the buildingEXODUS evacuation model and the Tsukuba Pavilion evacuation data / S. Gwynne, E.R. Galea, P. Lawrence, L. Fillippidis // Applied Fire Science. – 1998. – Vol. 7. – P. 235-266.
- [106] Parke, J. Validation the buildingEXODUS evacuation model using data from an unannounced trial evacuation / J. Parke, S. Gwynne, E.R. Galea, P. Lawrence // University of Greenwich, UK: CMS Press. – 2003. – P. 295-306.

- [107] Klupfel, H. Characteristics of the PedGo software for crowd movement and egress simulation / H. Klupfel, T. Meyer-König // Proceeding of the 2th International Conference on Pedestrian Evacuation Dynamics (PED). – 2003. – P. 331-340.
- [108] Shneider, V. Application of the Individual-Based Evacuation Model ASERI in designing safety concepts / V. Shneider // Proceedings of the 2th International Symposium on Human Behaviour in Fire. – 2001. – P. 41-51.
- [109] Shneider, V. Simulation evacuation processes with ASERI / V. Shneider, R. Konnecke // Tagungsband International Conference on Pedestrian Evacuation Dynamics (PED). – 2001.
- [110] Thompson, P.A. Testing and application of the computer model «SIMULEX» / P.A. Thompson, E.W. Marchant // Fire Safety Journal. – 1995. – Vol. 24. – P. 149-166.
- [111] Nelson, H.E. Emergency Movement / H.E. Nelson, F.W. Mowrer // P. DiNenno, D.W. Walton (Eds.). The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. National Fire Protection Association 2002. – pp. 3-367 - 3-380.
- [112] Fundamental Diagrams [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.asim.uni-wuppertal.de/en/database/data-from-literature/fundamental-diagrams.html> (дата обращения 10 июня 2016).
- [113] Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008 / W.W.F. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, M. Schreckenberg (Eds.). – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 833 p.
- [114] Pedestrian and Evacuation Dynamics 2010 / R.D. Peacock, E.D. Kuligowski, J.D. Averill (Eds.). – Springer, 2011. – 910 p.
- [115] Соболев, И.М. Метод Монте-Карло / И.М. Соболев. – М.: Наука, 1972. – 64 с.
- [116] Rosenblatt, M. Remarks on some non-parametric estimates of a density function / M. Rosenblatt // Annals of Mathematical Statistics. – 1956. – Vol. 27. – P. 832-837.
- [117] Parzen, E. On estimation of probability density function / E. Parzen // Annals of Mathematical Statistics. – 1962. – Vol. 33. – P. 1065-1076.
- [118] Zhang, J. Empirical study of turning and merging of pedestrian streams in T-junction [Электронный ресурс] / J. Zhang, W. Klingsch,

T. Rupprecht, A. Schadschneider, A. Seyfried. — 2012. — Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/1112.5299v2>.

- [119] Liddle, J. An experimental study of pedestrian congestions: influence of bottleneck width and length [Электронный ресурс] / J. Liddle, A. Seyfried, W. Klingsch, T. Rupprecht, A. Schadschneider, A. Winkens. — 2009. — Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/0911.4350>.
- [120] Расчётное обоснование к мероприятиям по обеспечению пожарной безопасности для объекта «Реконструкция Красноярской краевой филармонии», ООО «ПроектСтройСервис», шифр-265-07-ПБ.РО.

Публикации автора

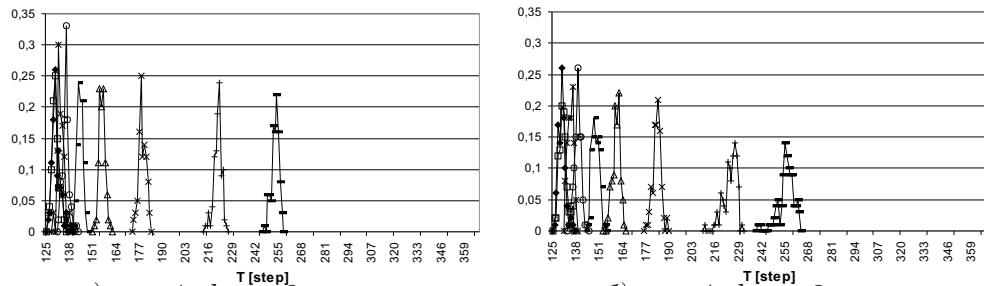
- [121] Kirik, E. An intelligent floor field cellular automation model for pedestrian dynamics / E. Kirik, T. Yurgel'yan, D. Krouglov // Proceedings of The Summer Computer Simulation Conference 2007, The Mission Valley Marriott San Diego, California — 2007. — P. 1031-1036.
- [122] Юргельян, Т.Б. Моделирование движения людей с применением теории клеточного автомата / Т.Б. Юргельян // Материалы VIII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. — Новосибирск: ИВТ, 2007. — С. 125-126.
- [123] Кирик, Е.С. Моделирование передвижения людей с применением теории клеточных автоматов / Е.С. Кирик, Т.Б. Юргельян // V Всесибирский конгресс женщин-математиков: Материалы конференции. — Красноярск: СФУ, 2008. — С. 196-201.
- [124] Кирик, Е.С. О дискретной модели движения людей с элементом анализа окружающей обстановки / Е.С. Кирик, Д.В. Круглов, Т.Б. Юргельян // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Математика и физика. — 2008. — Т. 1, N 3. — С. 266-276.
- [125] Kirik, E. The shortest time and/or the shortest path strategies in a CA FF pedestrian dynamics model / E. Kirik, T. Yurgel'yan, D. Krouglov // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Математика и физика. — 2009. — Т. 2, N 3. — С. 271-278.
- [126] Кирик, Е.С. О валидации дискретной стохастической модели движения людей и шкалировании временных шагов / Е.С. Кирик, Т.Б. Юргельян, Д.В. Круглов // VI Всесибирский конгресс женщин-математиков: Материалы Всероссийской конференции. — Красноярск: РИЦ СибГТУ, 2010. — С. 182-186.

- [127] Юргельян, Т.Б. О дискретной стохастической модели движения людей / Т.Б. Юргельян // Материалы конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям Института вычислительного моделирования СО РАН. — Красноярск: ИВМ СО РАН, 2010. — С. 32-33.
- [128] Юргельян, Т.Б. О валидации модели движения людей SIGMA.CA по данным фундаментальных диаграмм / Т.Б. Юргельян, Е.С. Кирик, Д.В. Круглов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. — 2010. — N 5. — С. 162-166.
- [129] Kirik, E. Artificial Intelligence of Virtual People in CA FF Pedestrian Dynamics Model / E. Kirik, T. Yurgel'yan, D. Krouglov // Lecture Notes in Computer Science. Parallel Processing and Applied Mathematics. — 2010. — Vol. 6068. — P. 513-520.
- [130] Kirik, E. On Influencing of a Space Geometry on Dynamics of Some CA Pedestrian Movement Model / E. Kirik, T. Yurgel'yan, D. Krouglov // Lecture Notes in Computer Science. Cellular Automata. — 2010. — Vol. 6350. — P. 474-479.
- [131] Юргельян, Т.Б. О чувствительности математической модели движения людей SIGMA.CA к геометрии пути / Т.Б. Юргельян, Е.С. Кирик, Д.В. Круглов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Математика и физика. — 2011. — Т. 4, № 4. — С. 556-568.
- [132] Kirik, E. On realizing the shortest time strategy in a CA FF pedestrian dynamics model / E. Kirik, T. Yurgel'yan, D. Krouglov // Cybernetics and Systems. — 2011. — Vol. 42(1) — P. 1-15.
- [133] Витова, Т.Б. О дискретном стохастическом подходе моделирования движения людей на примере модели SIGMA.CA / Т.Б. Витова, Е.С. Кирик, Д.В. Круглов // Труды X международной ФАМЭТ'2011 конференции. — Красноярск: НИИППБ, СФУ, КГТЭИ, 2011. — С. 87-92.
- [134] Юргельян, Т.Б. Об исследовании дискретно-стохастической модели движения людей SIGMA.CA с помощью фундаментальных диаграмм / Т.Б. Юргельян // Сборник трудов конференции молодых ученых КНЦ СО РАН. — Красноярск, Институт физики СО РАН, 2011. — С. 26-28.
- [135] Кирик, Е.С. Об исследовании модели движения людей SIGMA.CA с помощью фундаментальных диаграмм в пространствах типа «коридор» / Е.С. Кирик, Т.Б. Витова, Д.В. Круглов // Материалы XIV

- Всероссийского семинара «Моделирование неравновесных систем». — Красноярск: ИВМ СО РАН, 2011. — С. 120-126.
- [136] Kirik, E. On Time Scaling and Validation of a Stochastic CA Pedestrian Dynamics Model / E. Kirik, T. Yurgel'yan, D. Krouglov // Richard D. Peacock, Erica D. Kuligowski, Jason D. Averill (Eds.). Pedestrian and Evacuation Dynamics, Springer, 2011. — P. 819-822.
- [137] Kirik, E. On Validation of the SIgMA.CA Pedestrian Dynamics Model with Bottleneck Flow / E. Kirik, T. Vitova // Lecture Notes in Computer Science. Cellular Automata. — 2012. — Vol. 7495. — P. 719-727.
- [138] Витова, Т.Б. Об исследовании пересечения и слияния потоков в модели движения людей SIgMA.CA / Т.Б. Витова // Материалы XVI Всероссийского семинара «Моделирование неравновесных систем». — Красноярск: ИВМ СО РАН, 2013. — С. 19-24.
- [139] Витова, Т.Б. О тестировании дискретной стохастической модели движения людей SIgMA.CA в различных пространственных ситуациях / Т.Б. Витова // Образовательные ресурсы и технологии. — 2014. — № 1(4). — С. 279-289.
- [140] Kirik, E. Cellular Automata Pedestrian Movement Model SIgMA.CA: Model Parameters as an Instrument to Regulate Movement Regimes / E. Kirik, T. Vitova // Cellular Automata. Lecture Notes in Computer Science. — 2014. — Vol. 8751. — P. 501-507.
- [141] Витова, Т.Б. Модель движения людей SIgMA.CA / Т.Б. Витова // Материалы XVI Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. Красноярск. — Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2015. — С. 25-26.
- [142] Витова, Т.Б. О формализации правил переходов в модели движения людей SIgMA.CA / Т.Б. Витова, Е.С. Кирик // Образовательные ресурсы и технологии. — 2016. — № 2 — С. 293–300.
- [143] Витова, Т.Б. Моделирование эвакуации из Камерного и Малого залов Красноярской филармонии с помощью модели пешеходных потоков SIgMA.CA / Т.Б. Витова // Молодой ученый. — 2016. — № 11. — С. 13–18.
- [144] Kirik, E. On Formal Presentation of Update Rules, Density Estimate and Using Floor Fields in CA FF Pedestrian Dynamics Model SIgMA.CA / E. Kirik, T. Vitova // Lecture Notes in Computer Science. Cellular Automata. — 2016. — Vol. 9863. — P. 435–445.

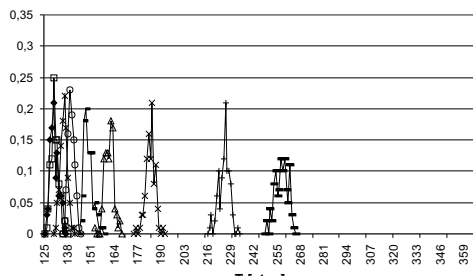
Приложение А

Результаты численных исследований на тестовых задачах

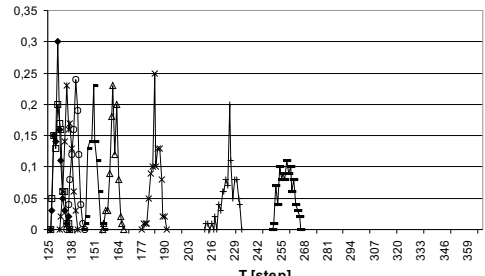


а) $r = 1, k_P = 2$

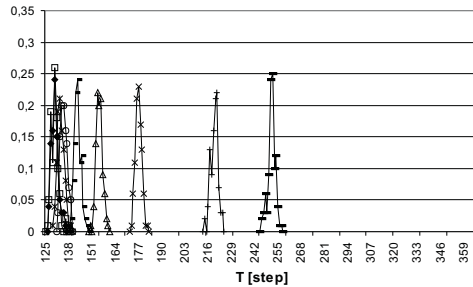
б) $r = 4, k_P = 2$



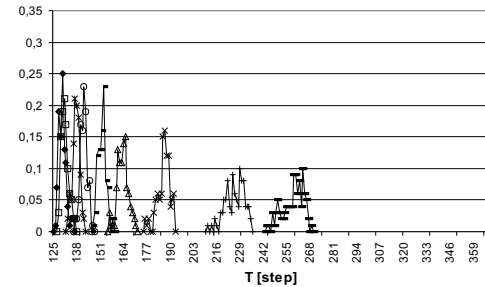
в) $r = 7, k_P = 2$



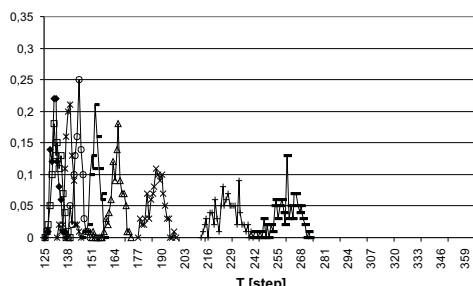
г) $r = 10, k_P = 2$



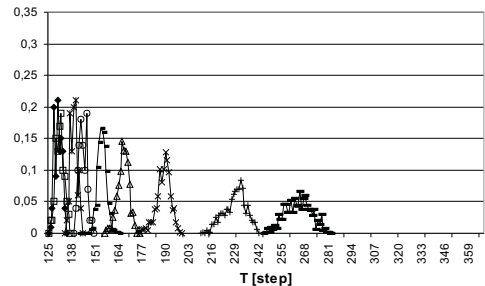
д) $r = 1, k_P = 4$



е) $r = 4, k_P = 4$



ё) $r = 7, k_P = 4$



ж) $r = 10, k_P = 4$

◆ 0,04 □ 0,16 * 0,32 ◇ 0,4 — 0,48 △ 0,56 × 0,64 + 0,8 — 0,92

Рисунок А. 1 – Коридор 50 м. Распределение времени выхода (полигоны частот) в зависимости от ρ_0 для различных $r, k_P = 2, k_P = 4$

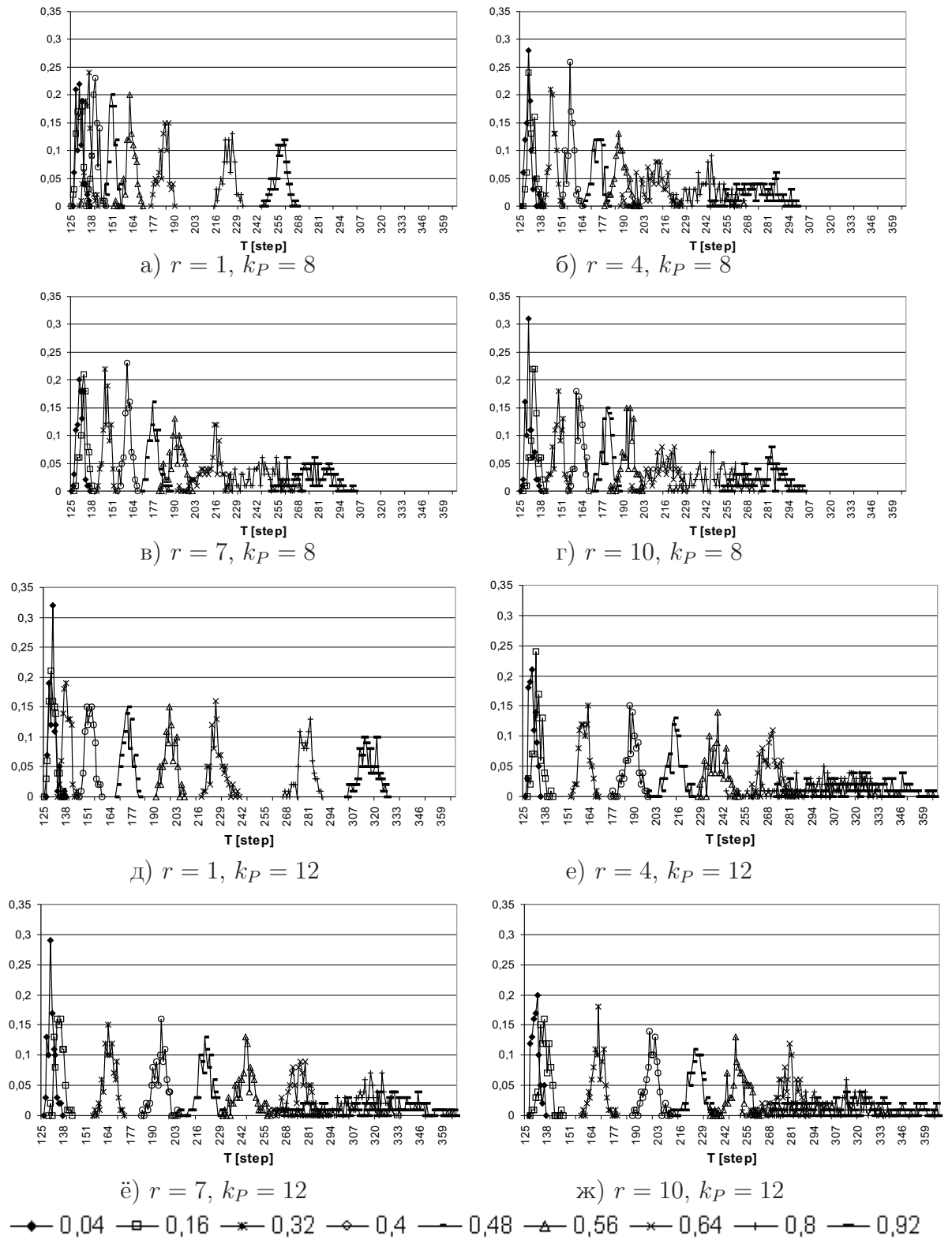


Рисунок А. 2 – Коридор 50 м. Распределение времени выхода (полигоны частот) в зависимости от ρ_0 для различных $r, k_P = 8, k_P = 12$

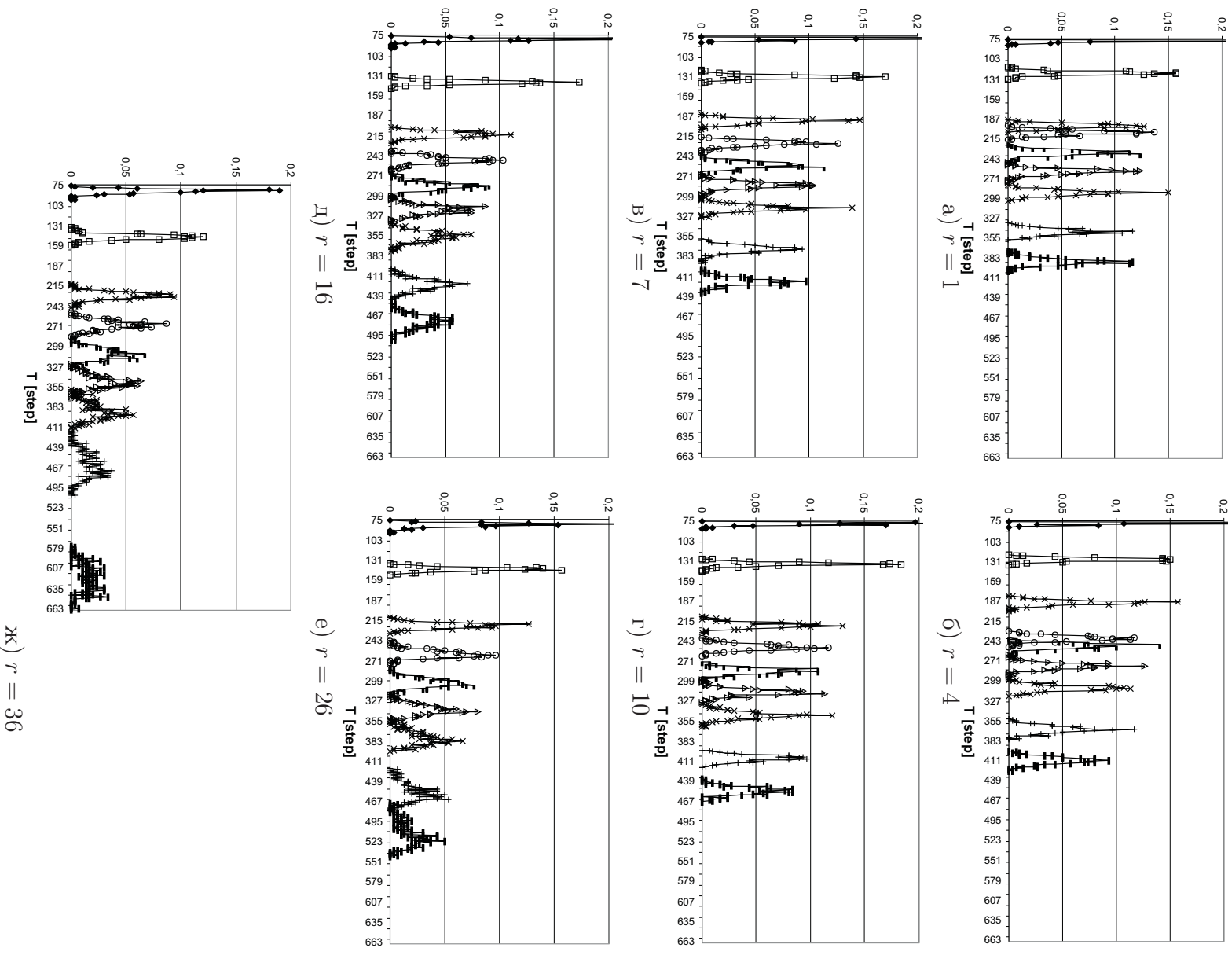


Рисунок А. 3 – Сложная геометрия. Распределение времени выхода (полигоны частот) в зависимости от ρ_0 для различных r , $k_P = 2$

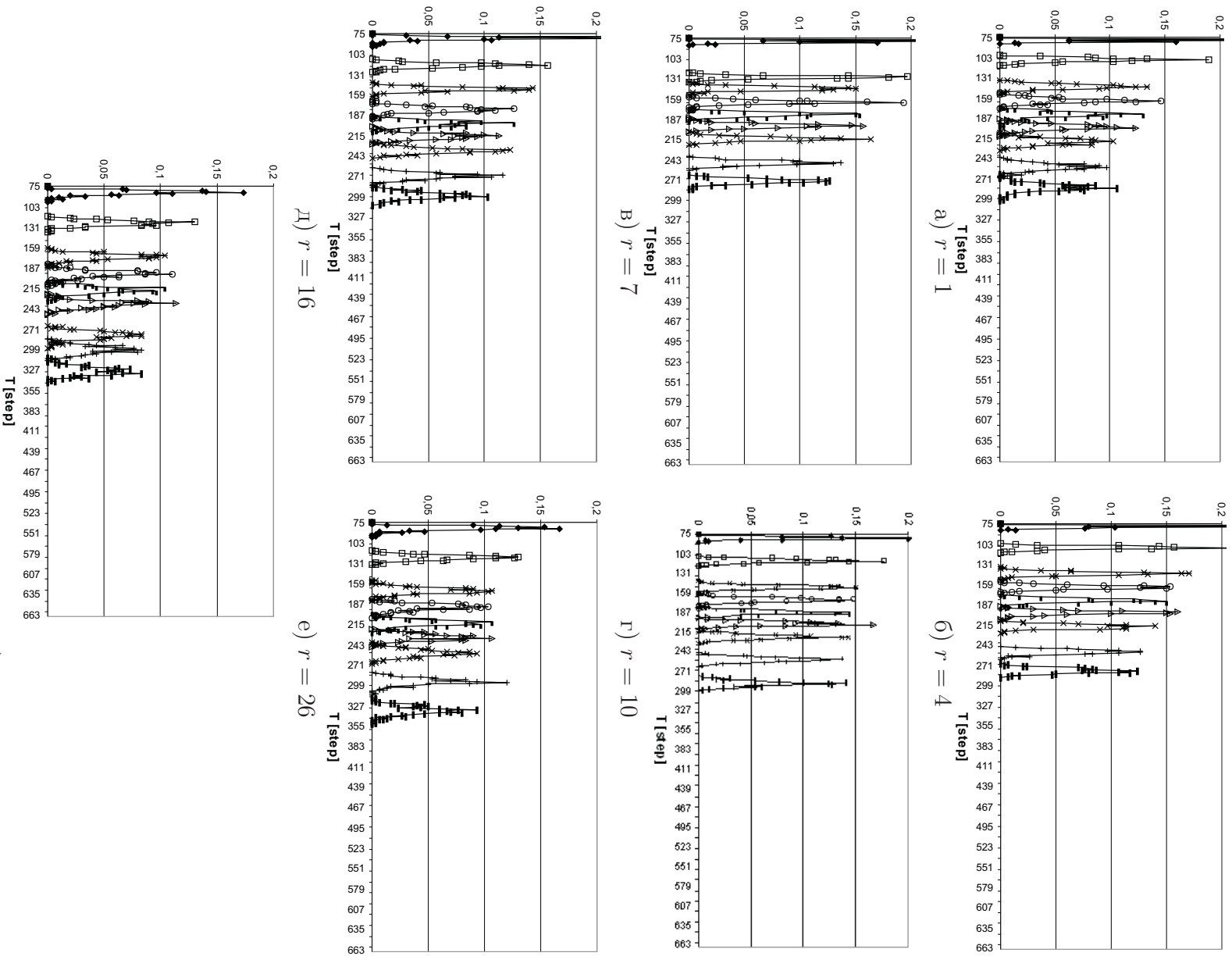
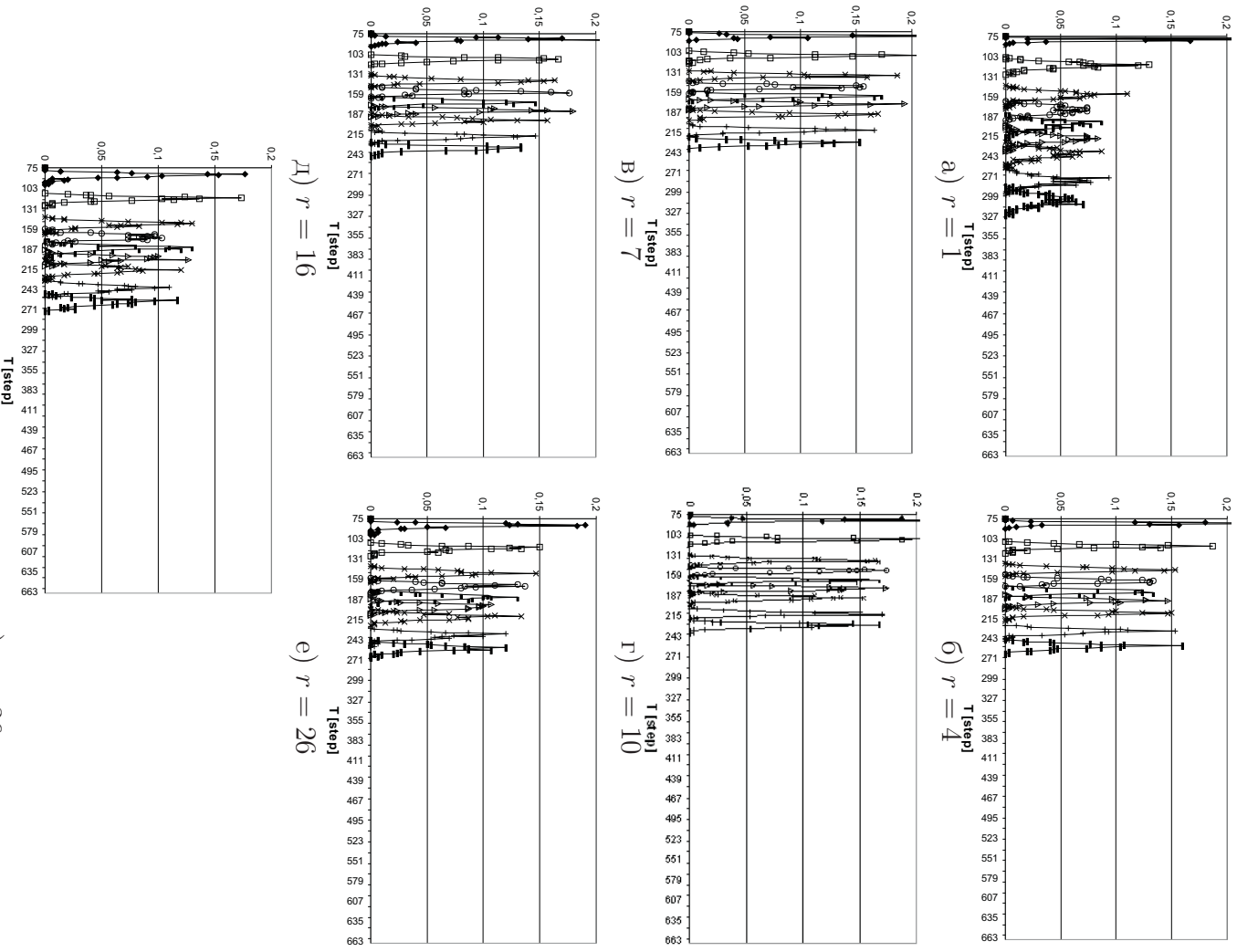


Рисунок А. 4 – Сложная геометрия. Распределение времени выхода (полигоны частот) в зависимости от ρ_0 для различных r , $k_P = 6$



Рисунок А. 5 – Сложная геометрия. Распределение времени выхода (полигоны частот) в зависимости от ρ_0 для различных r , $k_P = 8$



—◆— 0,04 —□— 0,16 —*— 0,32 —◇— 0,4 —▬— 0,48 —△— 0,56 —*— 0,64 —↔— 0,8 —▬— 0,92

Рисунок А. 6 – Сложная геометрия. Распределение времени выхода (полигоны частот) в зависимости от ρ_0 для различных r , $k\rho = 12$

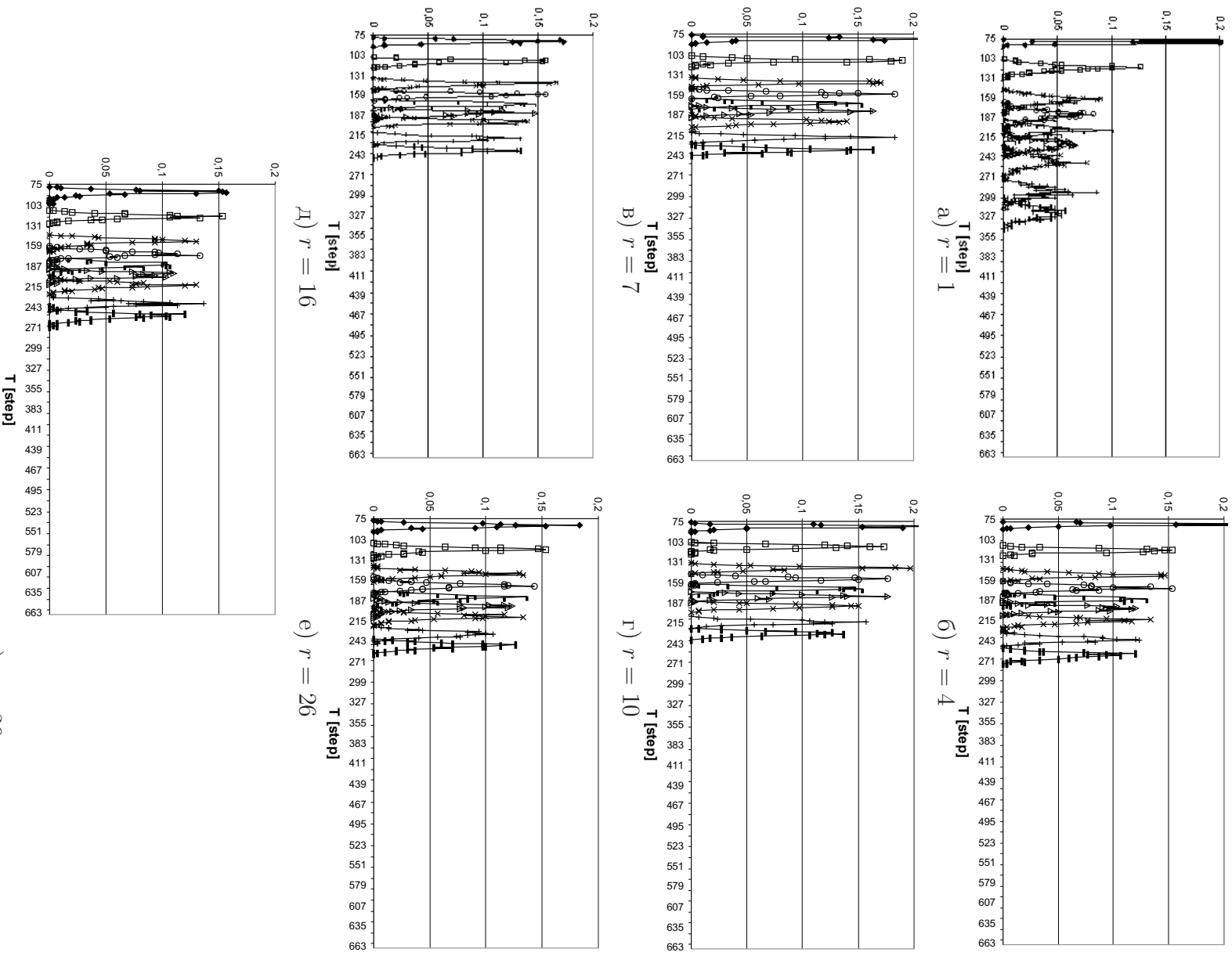


Рисунок А. 7 – Сложная геометрия. Распределение времени выхода (полигоны частот) в зависимости от ρ_0 для различных r , $k_P = 14$

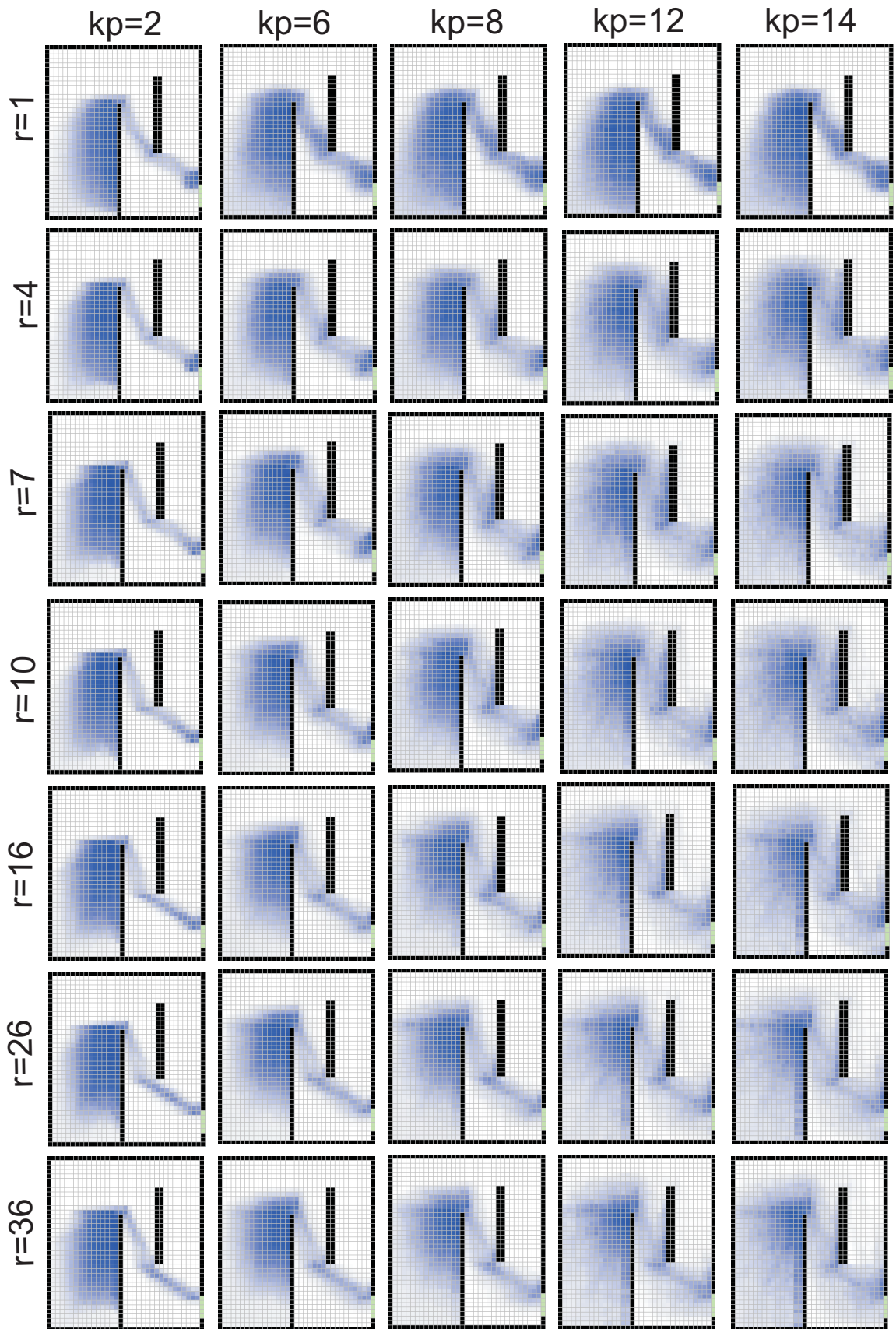


Рисунок А. 8 – Сложная геометрия. Интегральная характеристика движения «интенсивность посещения ячеек» в зависимости от параметров k_p и r

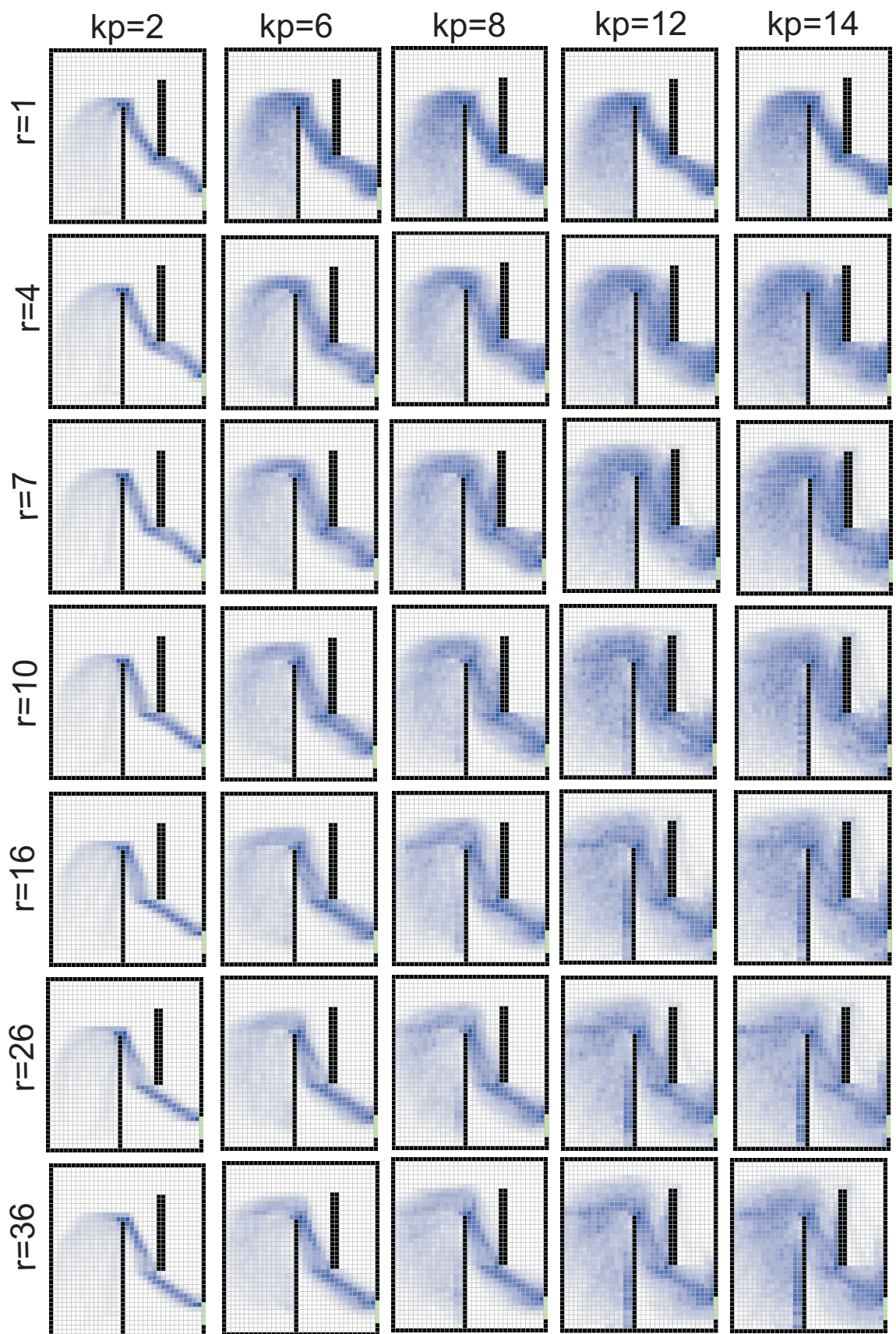


Рисунок А. 9 – Сложная геометрия. Интегральная характеристика движения «двигательная активность» в зависимости от параметров k_p и r

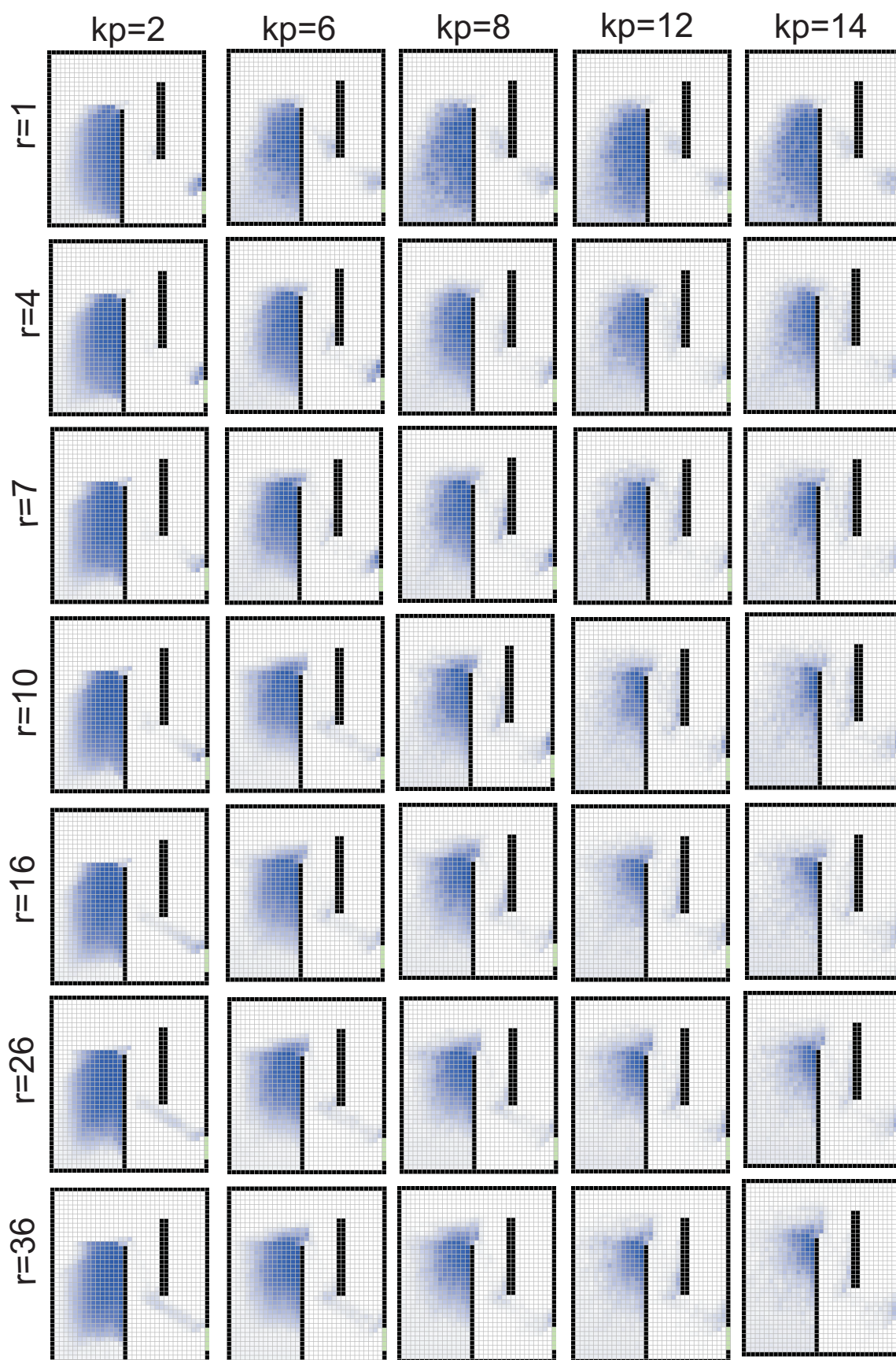


Рисунок А. 10 – Сложная геометрия. Интегральная характеристика движения «простаивание» в зависимости от параметров k_P и r

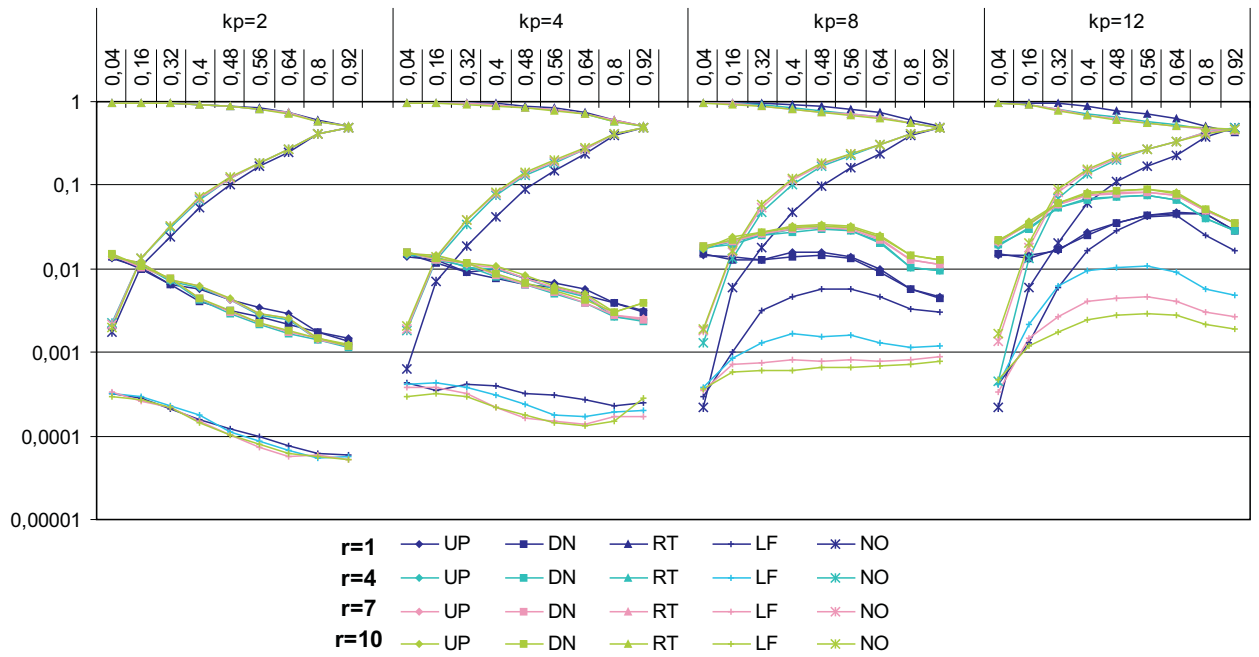


Рисунок А. 11 – Коридор 50 м. Частоты выбора направлений в зависимости от начальной плотности ρ_0 и параметра r по сериям для k_P

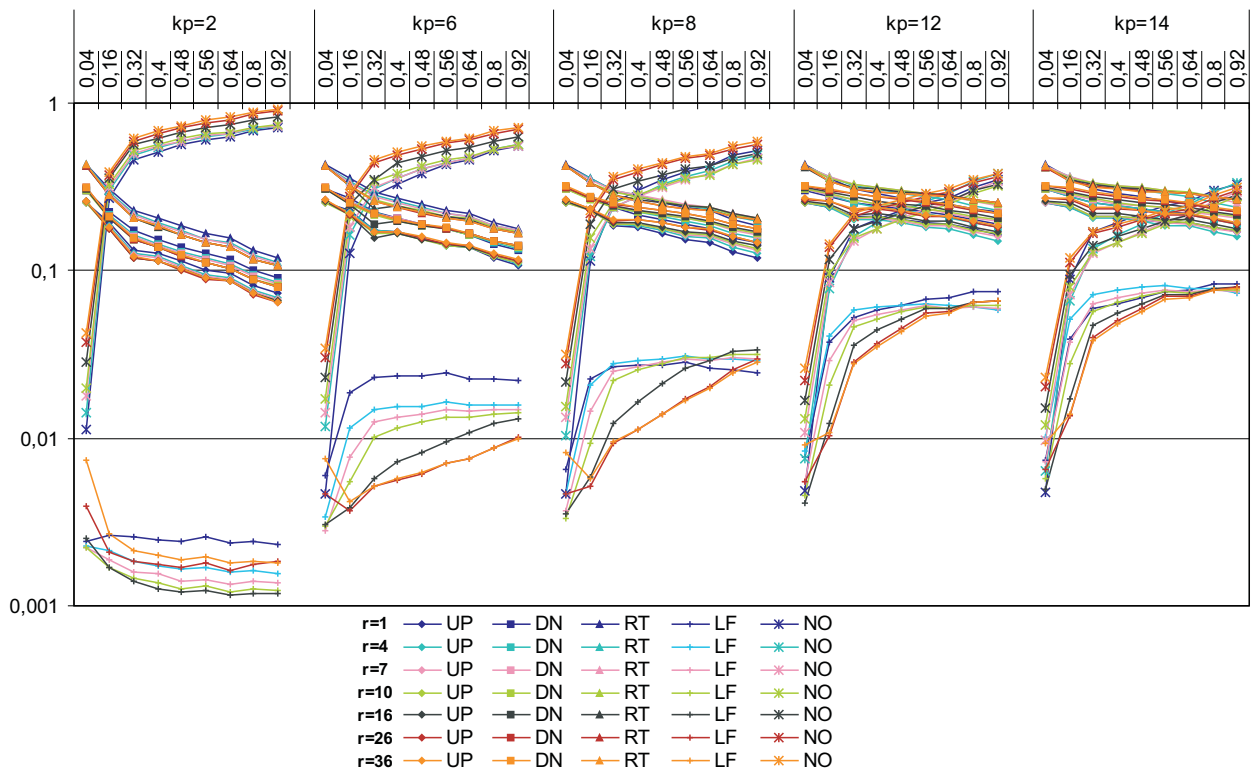
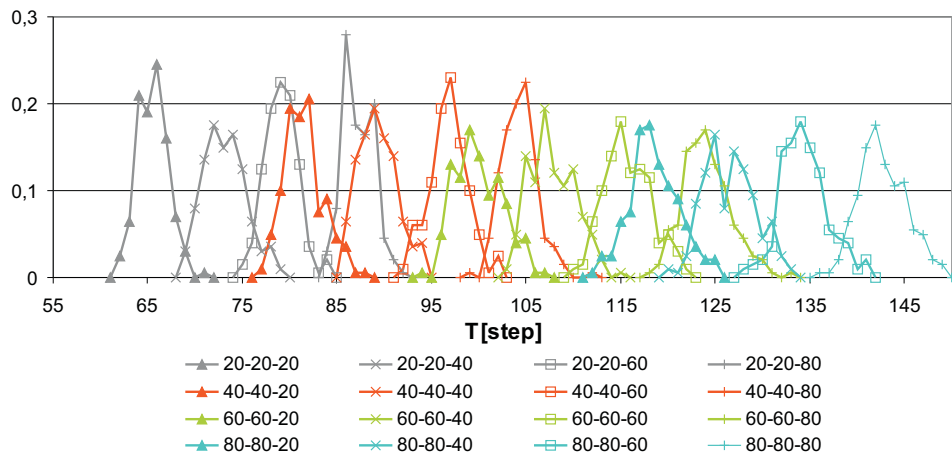
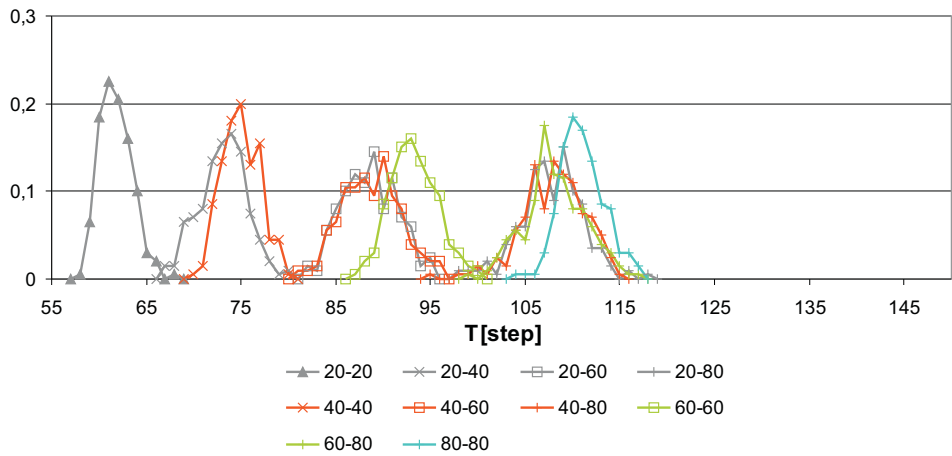


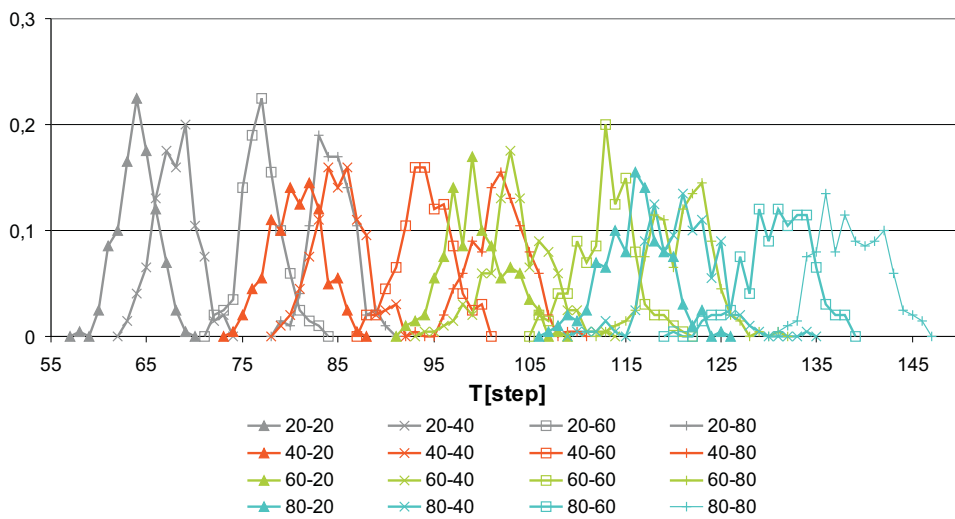
Рисунок А. 12 – Сложная геометрия. Частоты выбора направлений в зависимости от начальной плотности ρ_0 и параметра r по сериям для k_P



а) «ABC»

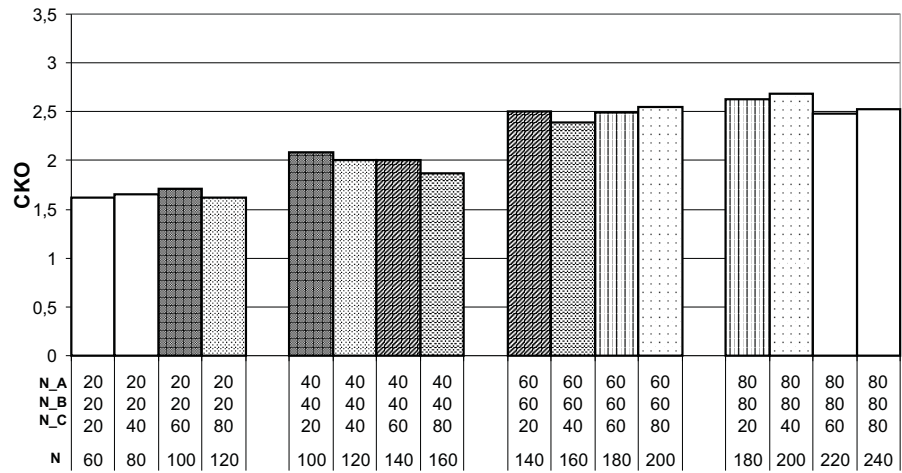


б) «AB»

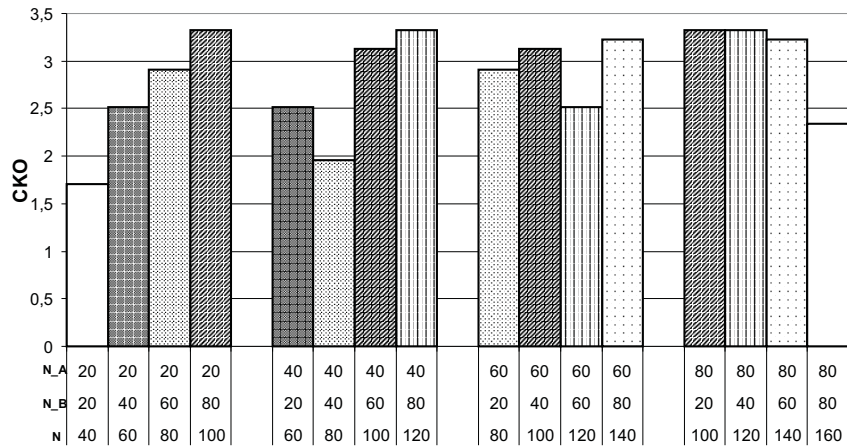


в) «AC»

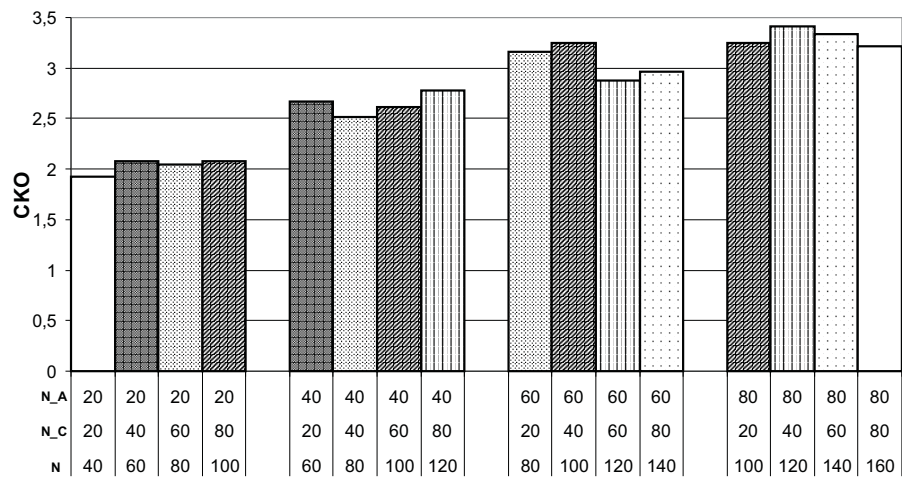
Рисунок А. 13 – Слияние потоков. Распределение времени выход (полигоны частот) для примеров «ABC», «AB», «AC» в зависимости от количества частиц в сливающихся коридорах. Количество частиц в соответствующих коридорах обозначено через дефис



а) «ABC»



б) «AB»



в) «AC»

Рисунок А. 14 – Слияние потоков. Среднее квадратичное отклонение времени выхода для примеров «ABC», «AB», «AC» в зависимости от количества частиц в коридорах

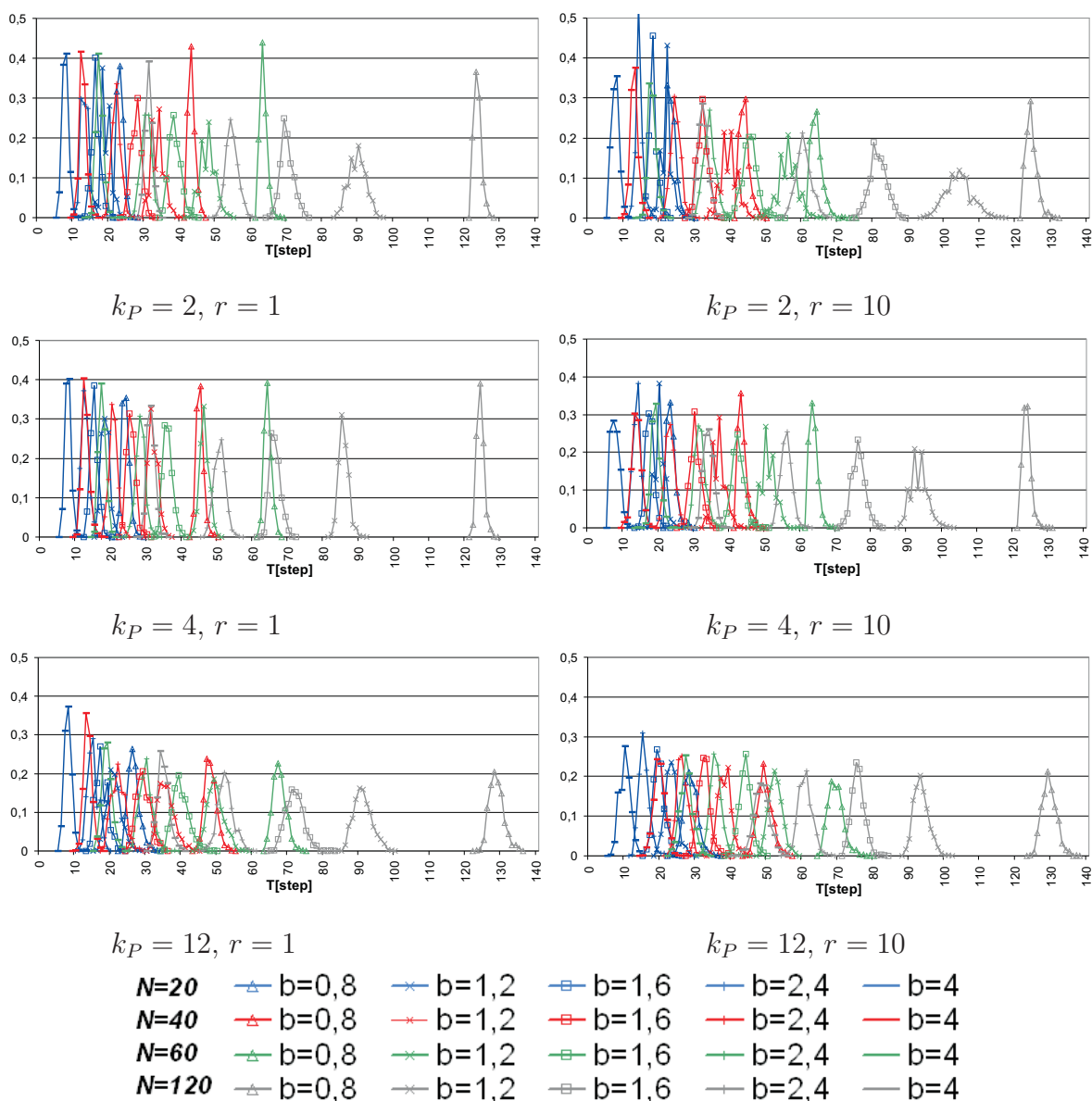


Рисунок А. 15 – Сужения. Распределение времени выхода (полигоны частот) в зависимости от N и b для пар k_P и r . $\rho_0 = 0,5$

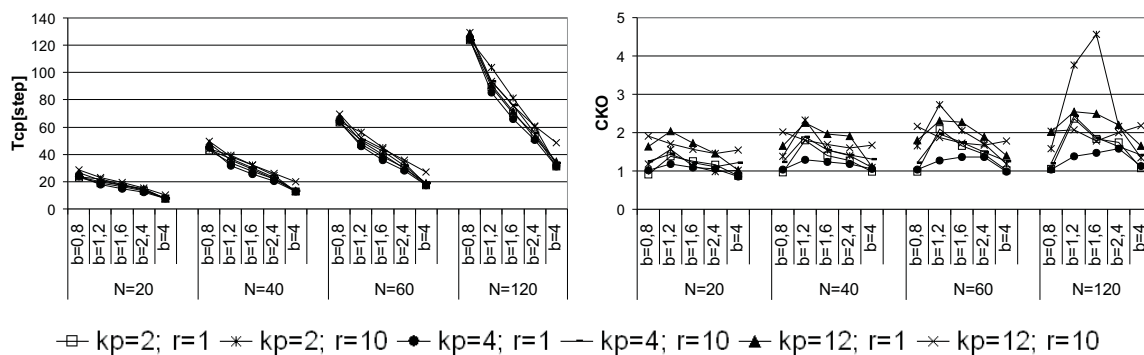


Рисунок А. 16 – Сужения. Зависимости T_{cp} и σ_T (СКО) от b по сериям для фиксированного N для различных пар k_P и r . $\rho_0 = 0,5$

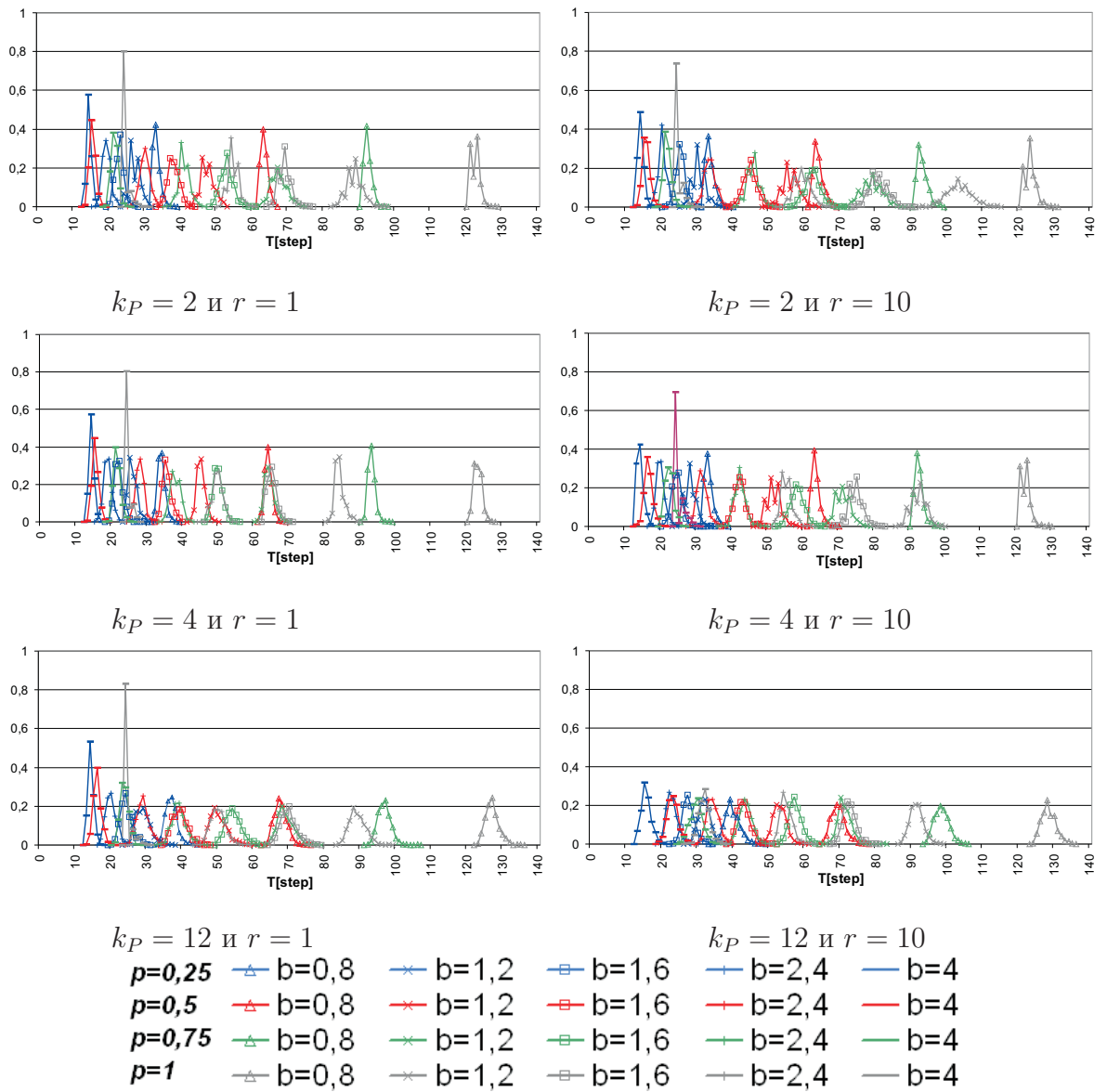


Рисунок А. 17 – Сужения. Распределение времени выхода (полигоны частот) в зависимости от ρ_0 и b для пар k_P и r

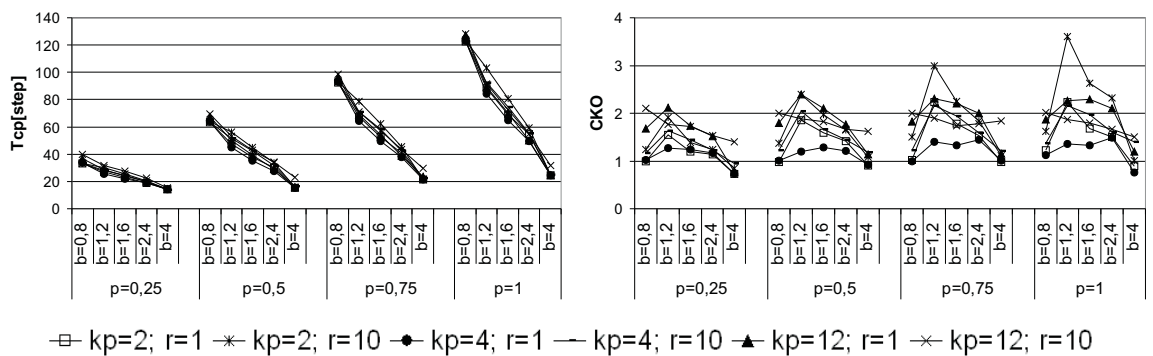


Рисунок А. 18 – Сужения. Зависимости T_{cp} и σ_T (СКО) от b по сериям для фиксированного ρ_0 для различных пар k_P и r

Приложение В

Копии документов о внедрении результатов диссертационной работы

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель начальника
ФГБУ ВНИИПО МЧС России

д.т.н., с.н.с.

И.Р. Хасанов



11 2015 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
Витовой Татьяны Брониславовны на тему: «Построение и исследование
клеточно-автоматной стохастической модели движения людей»

Комиссия в составе: начальника сектора (председатель) Абашкина Александра Анатольевича; ведущего научного сотрудника к.т.н. Карпова Алексея Васильевича; ведущего научного сотрудника к.т.н. Полетаева Александра Николаевича, подтверждает, что при разработке рекомендаций по организации поэтапной эвакуации из высотных и многофункциональных зданий использовались результаты диссертационной работы Витовой Т.Б. для проведения вариативного компьютерного моделирования различных сценариев эвакуации.

Председатель комиссии

А.А. Абашкин

Члены комиссии

А.В. Карпов

А.Н. Полетаев

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт вычислительного моделирования
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИВМ СО РАН)**



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИВМ СО РАН
член-корреспондент РАН
В.В. Шайдуров
«26» августа 2015 г.

АКТ № 7/15

**об использовании результатов диссертационной работы
Витовой Татьяны Брониславовны на тему «Построение и исследование
клеточно-автоматной стохастической модели движения людей»**

Комиссия в составе:

председатель комиссии: ИСАЕВ С.В. – зам. директора по научной работе, к.т.н., секретарь комиссии: ИСАЕВА О.С. – с.н.с. отд. № 8, к.т.н.,


члены комиссии: ВЯТКИН А.В. – ученый секретарь института, к.ф.-м.н., ПУСТЫНСКАЯ И.А. – главный бухгалтер составили настоящий акт об использовании результатов диссертационной работы Витовой Татьяны Брониславовны.

Результаты кандидатской диссертационной работы Витовой Т.Б. «Построение и исследование клеточно-автоматной стохастической модели движения людей» по специальности «05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» применялись при выполнении государственного контракта № 09.0708.11.014 «Разработка модели информационно-управляющей системы принятия решений при возникновении угроз пожарной безопасности на объектах сферы науки и образования на основе оценки рисков и моделирования последствий воздействия опасных факторов в условиях дефицита времени и пространства» от 19.03.2010 г. в рамках федеральной целевой программы «Пожарная безопасность в Российской Федерации на период до 2012 года».


Разработанные методы (способ определения переходных вероятностей, взаимодействие и область значений параметров модели) применялись в

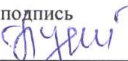
задачах оценки угроз пожарной безопасности на объектах сферы науки и образования для моделирования последствий возникновения чрезвычайных ситуаций. Методы позволили повысить достоверность результатов моделирования движения людей при эвакуации из зданий объектов образования.


Председатель комиссии:

 / Исаев С.В.
подпись

Члены комиссии:

 / Вяткин А.В.
подпись

 / Пустынская И.А.
подпись

 / Исаева О.С.
подпись