

На правах рукописи



Чирков Борис Владимирович

**МЕТОД И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ЛЮДСКИХ  
ПОТОКОВ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ижевск - 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Удмуртский государственный университет» на кафедре математического моделирования и прогнозирования.

Научный руководитель: **Колодкин Владимир Михайлович**  
доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Удмуртской Республики, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», заведующий кафедрой математического моделирования и прогнозирования.

Официальные оппоненты: **Таранцев Александр Алексеевич**,  
доктор технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации,  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России», профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ, г. Санкт-Петербург.

**Рыбаков Анатолий Валерьевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России», начальник научно-исследовательского отдела (по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций) научно-исследовательского центра, Московская обл., г. Химки.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Академия ГПС МЧС России».

Защита диссертации состоится «14» мая 2021 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.10, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» и на сайте <http://old.kai.ru/science/disser/>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.079.10  
к.т.н., доцент

*Анон*

Каляшина Анна Викторовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследований**

Управление движением людских потоков в зданиях (ограниченном пространстве) встречается в ряде важных практических задач. Это задачи управления эвакуацией из здания в условиях возникновения чрезвычайных ситуаций, в том числе, при пожаре; задачи управления движением людских потоков при проявлении террористической активности; управление движением при возникновении химической опасности и т. д. В этих задачах есть общая составляющая – управление движением людских потоков в здании. На определенных пространственно-временных масштабах, для всего класса задач управления движением людских потоков появляется еще одна существенная составляющая – динамическая среда. В пределах здания эта составляющая становится весьма значимой, когда пространственно-временной масштаб движения людских потоков становится сопоставим с масштабом изменения параметров окружающей среды, состояние которой может изменяться от безопасного до смертельно опасного по отношению к человеку.

Совпадение пространственно-временных масштабов движения людских потоков и изменения состояния среды, в частном случае, если масштаб соответствует масштабу «метр-секунда», приводит к необходимости разработки (или адаптации существующих) моделей движения людских потоков, новых методов, алгоритмов и программ управления. Например, задача управления движением людских потоков в горящем здании, где пространственно-временной масштаб скорости движения людских потоков и изменения параметров окружающей среды «метр-секунда», приводит к необходимости автоматического управления движением. Под автоматическим управлением движением людских потоков в здании понимается следующее: формирование и доведение до людей команд о направлениях движения происходит без участия оператора. Автоматическое управление движением людских потоков применяется в практических задачах, когда важно предусмотреть формирование и доведение до людей маршрутов движения в режиме реального времени.

Например, управление требуется в горящем здании, где с одной стороны, люди стремятся покинуть здание, с другой стороны – пожар в здании может создать преграды в виде областей, пребывание в которых сопряжено с риском для жизни и здоровья людей.

В настоящее время, задача управления движением людских потоков решается с помощью заранее спроектированных планов эвакуации или оператора. В первом случае до людей доводят маршруты до выхода с этажа (план эвакуации этажа). Указываемые на планах маршруты являются кратчайшими по расстоянию. Они не меняются во времени и не зависят от состояния среды. Во втором случае оператор получает данные от системы мониторинга и на основании этих данных принимает решение о

направлениях движения. Оба подхода являются проблематичными при управлении движением людских потоков в динамической среде, например, в горящем здании, когда помещение в здании или участок пути может стать опасным для человека за несколько секунд. Аналогичная задача может иметь место при химической и террористической опасности. В этих случаях определение подходящих маршрутов для движения и доведение их до людей должно выполняться автоматически в режиме реального времени. Указанные примеры показывают актуальность задачи управления движением людских потоков в динамической среде, изменяющейся на пространственно-временных масштабах «метр-секунда».

### **Степень разработанности темы**

Вопросы исследования движения людских потоков, изменяющихся на пространственно-временных масштабах «метр-секунда», рассматриваются в работах отечественных и зарубежных авторов: С.В. Беляева, А.И. Милинского, В.М. Предтеченского, В.В. Холщевникова, Д.А. Самошина, Р.Г. Григорьянца, В.А. Копылова, И.И. Исаевича, К. Kimura, J. Fruin, D. Helbing, U. Kemloh, A. Seyfried, M. Chraibi и др. В частности, усилиями научной школы В.В. Холщевникова установлена и экспериментально подтверждена зависимость скорости движения людского потока от эмоционального состояния людей в потоке и их количества в ближайшем окружении. Вопросы управления эвакуацией рассматриваются в работах: Р.Ш. Хабибулина, С.С. Валеева, Д.В. Шихалева, Т. Tabirca и др.

### **Объект исследования**

Движение людских потоков в динамической среде.

### **Предмет исследования**

Математическое обеспечение формирования направлений движения людских потоков в динамической среде.

### **Цель исследования**

Повышение безопасности движения людей в здании путем разработки метода автоматического построения кратчайших по времени и безопасных маршрутов движения в динамической среде.

### **Задачи исследования**

- 1) Разработать модель представления ограниченного пространства.
- 2) Разработать метод и алгоритмы автоматического управления движением людских потоков в динамической среде с пространственно-временным масштабом «метр-секунда».
- 3) Разработать комплекс программ, реализующих алгоритмы управления движением людских потоков в ограниченном пространстве с динамической средой.
- 4) Подтвердить валидность модели управления движением людских потоков в ограниченном пространстве с динамической средой.

5) Подтвердить возможность использования разработанного нового метода автоматического управления движением людских потоков в ограниченном пространстве путем создания прототипа технической системы.

### **Методология и методы исследования**

Для решения перечисленных задач в диссертационной работе использовались: аппарат теории вероятностей и математической статистики, имитационного моделирования, методы теории графов, разработки программного обеспечения и экспериментальных исследований.

### **Научная новизна исследования**

1) Разработан метод управления движением людских потоков, обеспечивающий формирование безопасных и кратчайших по времени маршрутов движения в динамической среде и отличающийся поддержкой режима реального времени.

2) Разработан метод оценки сложности здания, позволяющий учесть влияние имманентных свойств здания на длительность его освобождения.

3) Разработана новая процедура проверки адекватности модели управления движением людских потоков, отличающаяся использованием новой характеристики – сложности здания и позволяющая настроить модель для однотипных зданий или зданий определенного функционального назначения.

4) Разработан новый программный комплекс, реализующий алгоритм управления движением людских потоков в ограниченном пространстве с динамической средой и отличающийся поддержкой моделирования в режиме реального времени.

### **Область исследования**

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по пунктам:

1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений» в части разработки метода моделирования управляемого движения людских потоков в ограниченном пространстве с динамической средой.

5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента» в части исследования модели движения людских потоков и области применимости метода управления движением людских потоков в динамической среде в пространственно-временном масштабе «метр-секунда».

6 «Разработка новых математических методов и алгоритмов проверки адекватности математических моделей объектов на основе данных натурального эксперимента» в части разработки процедуры проверки адекватности модели управления движением людских потоков с использованием новой характеристики – сложность здания.

8 «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования» в части разработки системы компьютерного моделирования управляемого движения людских

потоков в ограниченном пространстве в пространственно-временном масштабе «метр-секунда».

**Теоретическая значимость работы** заключается в:

- разработке математической модели ограниченного пространства;
- разработке математической модели и алгоритмов управления движением людских потоков в динамической среде;
- определении области применимости метода управления;
- разработке методики оценки топологической сложности здания.

**Практическая значимость работы** заключается в:

- разработке открытого комплекса программ (лицензия МПТ) компьютерного моделирования управляемого движения людских потоков в ограниченном пространстве с динамическим состоянием с учетом результатов измерительного мониторинга в режиме реального времени с целью защиты людей при возникновении и развитии нештатных ситуаций;
- разработке программных средств для поиска эксплуатационных ограничений (ограничения, обусловленные превышением приемлемой величины риска).

**Поддержка диссертационной работы**

Исследования по теме диссертации выполнялись в рамках реализации:

1) ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса РФ на 2014 – 2020 годы». Грант Минобрнауки №RFMEFI57414X0038 «Разработка и создание промышленного образца беспроводной системы динамического управления эвакуацией людей из зданий»;

2) НИР конкурса У.М.Н.И.К. при поддержке «Фонда содействия малых форм предприятия в научно-технической сфере» (Договоры № 1412ГУ1/2014 от 24.02.2014 и № 6438ГУ2/2015 от 30.06.2015);

3) НИР конкурса молодых ученых, преподавателей и обучающихся в УдГУ, финансируемых из собственных средств Университета, «Научный потенциал».

**Достоверность научных результатов и выводов** определяется корректной постановкой задачи, применением современных математических методов, выверенными в многочисленных исследованиях моделью распространения продуктов горения и моделью движения людских потоков в ограниченном пространстве, тестированием моделей, алгоритмов и программ по результатам математического моделирования, практикой проектирования эксплуатационных ограничений в общественных зданиях.

**Основные результаты, выносимые на защиту**

1) Метод управления движением людских потоков, обеспечивающий формирование безопасных и кратчайших по времени маршрутов движения в динамической среде и отличающийся поддержкой режима реального времени.

2) Новый метод оценки сложности здания, позволяющий учесть влияние имманентных свойств здания на длительность его освобождения.

3) Новая процедура проверки адекватности модели управления движением людских потоков, отличающаяся использованием новой характеристики – сложности здания и позволяющая настроить модель для однотипных зданий или зданий определенного функционального назначения.

4) Новый программный комплекс, реализующий алгоритм управления движением людских потоков в ограниченном пространстве с динамической средой и отличающийся поддержкой моделирования в режиме реального времени.

#### **Личный вклад автора**

Программная реализация в части компьютерных моделей, создание прототипа системы автоматического управления движением людских потоков в здании в режиме реального времени и внедрение полученных результатов принадлежат соискателю лично. Теоретические положения, изложенные в диссертации, математическая модель движения людских потоков в ограниченном пространстве с динамической средой выполнена совместно с научным руководителем. Все результаты, выносимые на защиту, являются новыми и актуальными, а развитые практические подходы – оригинальными.

#### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях: международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2012», г. Москва, 2012 г.; IV-й международной научно-технической конференции студентов и молодых ученых «Современные информационные технологии в образовании и научных исследованиях», г. Донецк, 2013 г.; международной научно-практической конференции «Инновационное развитие современной науки», г. Уфа, 2014 г.; всероссийской научно-практической конференции «Инновации в науке технике и технологиях», г. Ижевск, 2014 г.; международной конференции «Чрезвычайные ситуации: теория и практика», г. Гомель, 2015 г.; международной конференции «Проблемы техносферной безопасности 2015», г. Москва, 2015; IX всероссийской конференции «Безопасность в техносфере», г. Ижевск, 2015 г.; X международной конференции «Безопасность в техносфере», г. Ижевск, 2016 г.; II международной конференции «Проблемы безопасности критических инфраструктур», г. Екатеринбург, 2016 г.; XI международной конференции «Безопасность в техносфере», г. Ижевск, 2017 г.; «Безопасность жизнедеятельности: проблемы и решения», г. Курган, 2017 г.; «Наука будущего – наука молодых», г. Нижний Новгород, 2017 г.; XII международной конференции «Безопасность в техносфере», г. Ижевск, 2018 г.; XIII международной конференции «Безопасность в техносфере», г. Ижевск, 2019 г.

#### **Внедрение результатов работы**

Результаты диссертационной работы нашли свое применение в:

1) декларациях пожарной безопасности для корпусов ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», объекта «Казенный дом, нач. XIX в. 1820-е, арх. Дудин С.Е.» (г. Ижевск) и др.;

2) ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет» при подготовке студентов по направлению «Техносферная безопасность»;

3) расчетах путей эвакуации для учебных корпусов университета и промышленных предприятий.

### **Публикации**

По тематике диссертации опубликовано 31 работа, в том числе 6 статей в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК, в том числе одна публикация в журнале, входящем в базу данных Scopus (Q2). Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

### **Структура диссертации**

Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы и 3 приложения, изложенные на 138 страницах машинописного текста. В работу включены 40 рисунков, 8 таблиц. Список литературы включает 127 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлена общая характеристика диссертационной работы: показана ее актуальность, сформулирована цель работы, отражена научная новизна и практическая ценность.

**В первой главе** произведен анализ предметной области. Выделен класс задач и класс моделей для решения этих задач. Рассмотрены основные подходы к моделированию движения людских потоков в здании. Рассмотрены методы управления движением людских потоков. Выполнена постановка задачи исследования.

Класс задач управления движением людских потоков в здании характеризуется тремя составляющими. Во-первых, движение людских потоков происходит в ограниченном пространстве. Во-вторых, у каждой задачи своя целевая функция управления. В-третьих, управление движением людских потоков осуществляется в динамической среде. К таким задачам относятся: эвакуация людей при пожаре в здании, направленное движение людских потоков в здании в случаях террористической активности или чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера.

Модели, на базе которых решается класс задач управления движением людей обычно разделяются на два основных типа: агентные и потоковые.

Область движения людей в ограниченном пространстве представляется по-разному. В одних случаях на область накладывается сетка, где нет различия между помещениями и проемами. В других – вся область представляется в виде графа, где узлами служат отдельные участки путей движения и переходы между ними.



Совпадение пространственно-временных масштабов движения людских потоков и изменения параметров окружающей среды в здании, в частном случае, если масштаб соответствует масштабу «метр-секунда», приводит к необходимости разработки (или адаптации существующих) моделей, новых методов, алгоритмов и программ управления движением людских потоков.

На современном этапе развития техники возможность автоматически управлять движением людских потоков в режиме реального времени обеспечивают потоковые модели, обычно, при представлении ограниченного пространства в виде графа.

**Во второй главе** диссертации представлены цифровая модель ограниченного пространства и его топологическая сложность, математическая формализация задачи управления движением людских потоков в динамической среде в пространственно-временном масштабе «метр-секунда», алгоритм управления движением людских потоков в динамической среде, методика и результаты проверки адекватности математической модели движения людских потоков, программный комплекс имитационного моделирования управляемого движения людских потоков в динамической среде.

Требование автоматического управления движением людских потоков в режиме реального времени предполагает особенности построения математической модели. В частности, модель ограниченного пространства (например, здания) представляется в виде двудольного графа  $G$ :

$$G = (W \cup B, \Gamma), W \cup B = U, W \cap B = \emptyset, \Gamma: U \rightarrow U, \\ \Gamma(x) = \begin{cases} \{w_1, w_2 \mid w_1, w_2 \in W\}, & \text{если } x \in B \\ \{b_1, b_2, \dots, b_n \mid b_n \in B\}, & \text{если } x \in W, \end{cases}$$

где  $W$  – подмножество вершин, представляющих собой горизонтальные и наклонные участки, составляющих пути движения – помещения (комнаты, лестницы, коридоры);  $B$  – подмножество вершин, посредством которых вершины подмножества  $W$  соединены между собой – проемы;  $\Gamma(x)$  – правило, по которому любой вершине из подмножества  $W$  сопоставляются связанные с ней элементы из множества  $B$  и любому элементу из подмножества  $B$  сопоставляются связанные с ним участки из подмножества  $W$ ,  $\Gamma^2(x) = \Gamma[\Gamma(x)]$ .

Вычислительные эксперименты по моделированию управляемого движения людских потоков выявили, что при прочих равных условиях, временной интервал до выхода последнего человека из здания по безопасным путям существенно определяется имманентными свойствами здания: связностью, размерами элементов здания и т. д.

В настоящее время в научной литературе нет понятия количественной характеристики имманентных свойств здания. Но без него не представляется возможным валидация модели управления движением людских потоков, а, следовательно, и создание эффективного программно-аппаратного комплекса управления движением людских потоков. Для количественной характеристики имманентных свойств здания введем понятие топологической сложности  $\Omega$ . Количественная характеристика топологической

сложности характеризует здание с точки зрения и связности его элементов, и влияния имманентных свойств здания на временной интервал освобождения здания  $T_e$ .

Учитывая, что цифровая модель здания представляется двудольным графом  $G$ , людские потоки – подграфом  $G' \subset G$ , модель здания можно характеризовать следующими базовыми показателями:  $N_w$  – количество вершин подмножества помещений  $W$  в модели здания (исключая вершину уровня 0);  $N_b$  – количество вершин подмножества проемов  $B$  в модели здания;  $M_w$  – максимальное количество вершин подмножества  $W$  одного уровня (максимальная ширина графа по подмножеству помещений);  $L_w$  – количество уровней в графе (минимальное количество вершин подмножества помещений  $W$  при обходе графа в глубину).

Введенные характеристики имеют определенную смысловую нагрузку. Каждый показатель связан с динамикой процесса движения людских потоков и математической моделью поиска путей. Так количество вершин подмножества помещений  $N_w$  определяет число мест возможного разветвления путей. Количество вершин подмножества проемов  $N_b$  может влиять на динамику движения людских потоков. В частности, увеличение количества проемов может привести к увеличению времени освобождения здания (чем больше «узких мест» для потока людей, тем больше оснований для задержки потока). Ширина графа по подмножеству помещений  $M_w$  характеризует возможность изменения траекторий людских потоков в здании и свидетельствует о существовании множества возможных путей. Количество уровней в графе  $L_w$  определяет минимальное количество помещений, которые нужно преодолеть по пути от дальнего помещения до безопасной зоны.

Если  $P_{ij}$  – численное значение  $i$ -го показателя ( $i = 1 (N_w), 2 (N_b), 3 (M_w), 4 (L_w)$ )  $j$ -ой модели здания, то нормированное значение показателя  $H_{ij}$  определим в виде:  $H_{ij} = \frac{P_{ij}}{\langle P_i \rangle}$ , где  $\langle P_i \rangle$  – значение  $i$ -го показателя, усредненное по всей совокупности моделей рассматриваемых зданий.

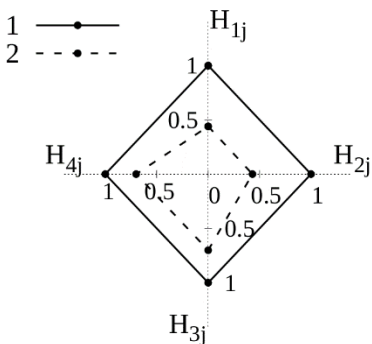


Рисунок 1 – Фигуры в пространстве показателей  $H_{ij}$

В качестве количественной характеристики топологической сложности для  $j$ -го здания принята величина, равная относительной площади фигуры, ограниченной точками  $H_{ij}$  на диаграмме пространства показателей  $H_{ij}$  при  $i = 1, 2, 3, 4$ . Если разместить точки на соответствующие оси координат, то каждая пара соседних точек вместе с точкой начала координат образует треугольник (рисунок 1). Такое расположение точек позволяет вычислить площадь образовавшейся фигуры  $S_j$  для  $j$ -ой модели здания как сумму площадей треугольников.

Площади  $S_j$  нормируются на площадь фигуры  $S_0$ , построенной при средних значениях  $\langle P_i \rangle$ . Если численное значение  $i$ -го показателя равно усредненному по всей совокупности цифровых моделей зданий, то  $H_{ij} = 1$ , а  $S_0 = 2$ . На рисунке 1 представлены диаграммы пространства показателей  $H_{ij}$  при  $i = 1, 2, 3, 4$ .

Для оценки топологической сложности  $j$ -го здания имеем:

$$\Omega_j = \frac{S_j}{S_0} = 0.5 \cdot S_j. \quad (1)$$

Количественная характеристика топологической сложности цифровой модели здания  $\Omega$  (1) позволяет сравнить здания между собой. Топологическая сложность выступает в качестве параметра, влияющего на временной интервал освобождения здания, при анализе результатов натуральных экспериментов по эвакуации людей из здания.

В работе управление движением людских потоков базируется на потоковой модели. Она не предназначена для оценки поведения людей и их выбора путей во время движения, но позволяет выделить из множества всех возможных путей такие, которые обеспечат выполнение целевой функции в пространственно-временном масштабе «метр-секунда» в режиме реального времени.

В модели движение людей рассматриваются как сплошной однородный поток. Для определения скорости движения людского потока используется зависимость скорости ( $V$ ) от эмоционального состояния людей в потоке и их количества в ближайшем окружении ( $D$ ) (2), установленная В.В. Холщевниковым на основании многочисленных натуральных наблюдений движения людей в различных условиях:

$$V_D = V_0 * \left( 1 - a * \ln \frac{D}{D_0} \right), \quad (2)$$

где  $V_0$  – случайная величина скорости свободного движения (при отсутствии влияния окружающих людей), м/мин;  $a$  – коэффициент, определяющий степень влияния плотности людского потока на скорость его движения;  $D$  – текущее значение плотности людского потока, чел./м<sup>2</sup>;  $D_0$  – пороговое значение плотности людского потока, по достижении которого, плотность становится воздействием, влияющим на скорость движения, чел./м<sup>2</sup>.

Время достижения выхода из помещения является характеристикой помещения, по которой проводится минимизация. Ниже представлен алгоритм движения людских потоков с целевой функцией – движения по безопасным маршрутам до безопасной зоны с минимизацией времени выхода из каждого помещения.

Выделено два типа областей: принимающие и отдающие. Принимающая область, та, в которую направляются люди, отдающая – та, которую они покидают. Численный метод поиска путей на графе  $G$ , с учетом изменения плотности людского потока и динамики среды, осуществляется по алгоритму обхода графа в ширину. Пусть:

$l(x)$  – время достижения выхода из элемента  $x$  по безопасному пути, с,

$c(x)$  – метка элемента  $x$ ;

$m(x)$  – пометка элемента  $x$ , бывшего в обработке;

$s(x)$  – площадь элемента  $x$ , м<sup>2</sup>;

$h(x)$  – количество людей в элементе  $x$ , чел/м<sup>2</sup>;

$b(x)$  – ширина элемента  $x$ , м;

$V_D(x_1, y)$  – скорость движения людского потока из элемента  $x_1$  через проем  $y$ , м/с;

$I$  – подмножество заблокированных элементов,  $I \subset W$ ;

$T_e$  – время выхода последнего человека из здания, с;

$\Delta t$  – шаг моделирования по времени, с;

$N$  – количество людей в здании, чел.;

$\Delta N(x)$  – количество людей, которое может быть перемещено из помещения  $x$ , чел;

$N_B$  – количество людей в заблокированных элементах подмножества  $W$ , чел.;

$C_W$  – количество обработанных элементов подмножества  $W$ ;

$C_B$  – количество обработанных элементов подмножества  $B$ ;

$z$  – безопасная зона,  $z \in W$ ,  $(\exists b \in B) \Gamma(b) = \{z, w\}$ ,  $w \in W$ ,  $l(z) = 0$ ;

$p$  – текущий (принимающий) элемент.

Тогда алгоритм имеет следующий вид:

Шаг 0.  $h(z) = 0$ ,  $T_e = 0$ .

Шаг 1.  $l(w) = \infty$ ,  $c(w) = 0$  и  $m(w) = 0$  для  $\forall w \in \{w \in W \mid w \neq z\}$ ,  $c(b) = 0$  для  $\forall b \in B$ .

Шаг 2.  $p = z$ ,  $m(p) = 1$ ,  $C_B = |B|$ ,  $C_W = |W|$ ,  $N_B = 0$ .

Шаг 3. Для первого элемента подмножества  $\{b \in \Gamma(p) \mid c(b) = 0\}$ :

3.1) получить элемент  $w$  из подмножества  $\{w \in \Gamma(b) \mid w \neq p\}$ ,

3.1.1) изменить потенциал достижения безопасной зоны  $z$  по правилу  $l(w) = l(p) + \frac{\sqrt{s(w)}}{V_D(w,b)}$ ,

3.1.2) изменить количество людей в отдающем элементе  $w$  по правилу  $h(w) = h(w) - \Delta N(w)$ ,

3.1.3) изменить количество людей в принимающем элементе  $p$  по правилу  $h(p) = h(p) + \Delta N(w)$ ,

3.1.4) изменить метку  $c(w) = 1$ ,

3.2) изменить метку  $c(b) = 1$ , изменить количество обработанных проемов  $C_B = C_B - 1$ ,

Шаг 4. Если  $\{b \in \Gamma(p) \mid c(b) = 0\} \neq \emptyset$ , то перейти к шагу 3.

Шаг 5. Среди элементов, обработанных на шаге 3, найти такой элемент  $w$ , для которого  $l(w) = \min\{l(w) \mid w \in W \text{ и } w \notin I, m(w) = 0, |\Gamma(w)| \geq 2\}$ .

Шаг 6. Установить метку  $m(p) = 1$ . Изменить принимающий элемент  $p = \dot{w}$ .

Шаг 7. Если  $C_W \neq 0$ , то  $C_W = C_W - 1$  и перейти к шагу 3.

Шаг 8. Если  $C_B \neq 0$ , то  $N_B = \sum_{\substack{w \in W, \\ c(w)=0}} h(w)$ .

Шаг 9. Изменить длительность эвакуации  $T_e = T_e + \Delta t$ .

Шаг 10. Если  $|N - (h(z) + N_B)| \geq 0,99$ , то останов, иначе перейти к шагу 1.

$$V_D(w, b) = \min(V_D(b), V_D(w)),$$

$$\Delta N(w) = \begin{cases} \Delta n(w), & \text{если } \Delta n(w) < C_p \\ C_p, & \text{если } \Delta n(w) \geq C_p \end{cases}$$

где  $\Delta n(w)$  – количество людей, которое может быть перемещено из  $w$ :

$$\Delta n(w) = \begin{cases} \frac{h(w)}{S(w)} \cdot V_D(w, p, b) \cdot b(b) \cdot \Delta t, & \text{если } h(w) > 1 \\ h(w), & \text{если } h(w) \leq 1 \end{cases},$$

$C_p$  – количество людей, которое может поместиться в  $p$ :

$$C_p = h_{max}(p) - h(p),$$

где  $h_{max}(p)$  – максимальное количество человек, которое вмещается в элемент  $p$ , чел.,  $h_{max}(p) = d_{max} \cdot S(p)$ ,  $d_{max}$  – пороговое значение плотности людского потока,  $d_{max} = 5 \frac{\text{чел.}}{\text{м}^2}$ .

Ввиду того, что на каждом такте моделирования происходит минимизация по времени достижения безопасной зоны и обход заблокированных помещений, путь является кратчайшим по времени и безопасным.

Если обозначить относительную долю людей, остающихся в здании к моменту времени  $T$  (с начала процесса движения) –  $\delta(T)$ , то временной интервал освобождения здания  $T_e$  будет определяться условием  $\delta(T_e) = 0$ . Теоретически возможно, что  $\delta(T) \neq 0$  для любого значения  $T$ . В этом случае временной интервал времени выхода последнего человека из здания  $T_e$  будет определяться условием  $\frac{\partial \delta(T_e)}{\partial T} = 0$ . Условие  $\delta(T) \neq 0$  при  $T \rightarrow \infty$  фактически означает, что в сложившихся условиях не существует безопасных путей движения, которые обеспечивали бы выход всех людей из здания.

Таким образом, формализованы модель и алгоритм управления движением людских потоков в динамической среде. Рассмотрен важный случай моделирования, при котором пространственно-временные масштабы движения людского потока (масштаб «метр-секунда») и изменения параметров окружающей среды в здании совпадают.

Проверка адекватности модели управления движением людских потоков в динамической среде основана на сопоставлении результатов моделирования с результатами натурных наблюдений. По понятным причинам весьма затруднительно провести измерения характеристик управляемого движения людских потоков, например, при пожаре. Поэтому воспользуемся результатами, полученными при проведении учебных

пожарных тревог в учебных корпусах ВУЗа. Анализу подлежали результаты по семи учебным корпусам, фиксируемые в течении нескольких лет.

По результатам анализа было получено регрессионное уравнение (3):

$$Y = 115.45 + 725.76D + 103.38\Omega \quad (3)$$

где  $D$  – плотность начального распределения людей в здании, чел/м<sup>2</sup>;  $\Omega$  – сложность здания.

Рисунок 2 наряду с количественными значениями оценок регрессионной модели иллюстрирует, что, в целом, линейная регрессионная модель (3) удовлетворительно описывает результаты экспериментов по управляемому движению людских потоков.



Рисунок 2 – Зависимость длительности освобождения здания от начальной плотности людского потока  $D$ : 1 – график, отвечающий экспериментальным данным, 2 – график отвечающий регрессионному уравнению (3)

Этот результат важен для социотехнической системы, которой свойственна стохастичность процесса. Тем самым, показана возможность использования регрессионной зависимости (3) для валидации модели управляемого движения людских потоков применительно к учебным корпусам ВУЗов.

Инструмент для создания цифровой модели здания реализован на языке программирования Python3. Алгоритм управления движением людских потоков реализован на языке C++. Исходные коды программ являются открытыми (лицензия MIT) и доступны по адресу <https://github.com/bvchirkov/OpenMovingHumanFlow>.

**В третьей главе** представлен критерий эффективности нового метода управления движением людских потоков. Представлены результаты исследований влияния параметров среды на эффективность нового метода управления.

В рамках данной работы положим, что размещение людей в любой области отвечает функции равномерного распределения. Распределение характеризуется плотностью людей, то есть количеством людей на единицу площади.

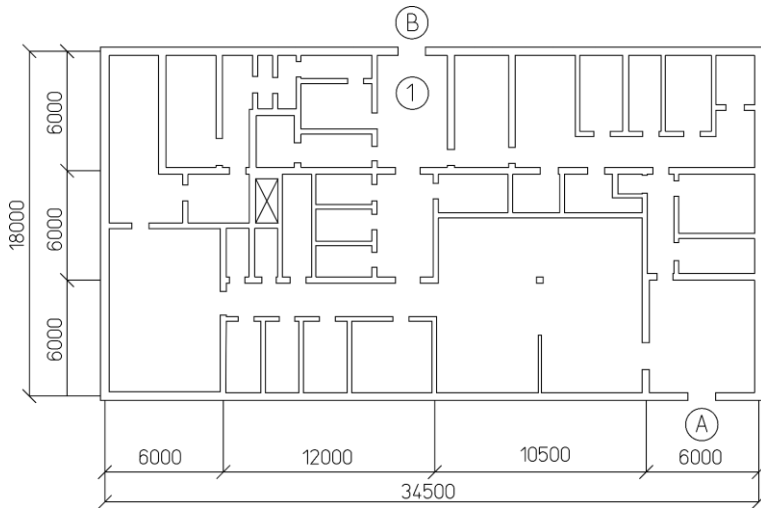


Рисунок 3 – Схема здания: А, В – выходы из здания; 1 – блокируемое помещение

жизней, которое может быть достигнуто при применении предложенных методов и алгоритмов.

Для оценки эффективности воспользуемся результатами математического моделирования процесса управляемого движения людских потоков из здания (рисунок 3) при пожаре. Здание, общей площадью для размещения людей  $S_{зд} = 520 \text{ м}^2$ , имеет два эвакуационных выхода, которые отмечены символами «А» и «В». Представленная конфигурация позволяет в наиболее простой форме продемонстрировать эффективность работы системы в конкретном здании.

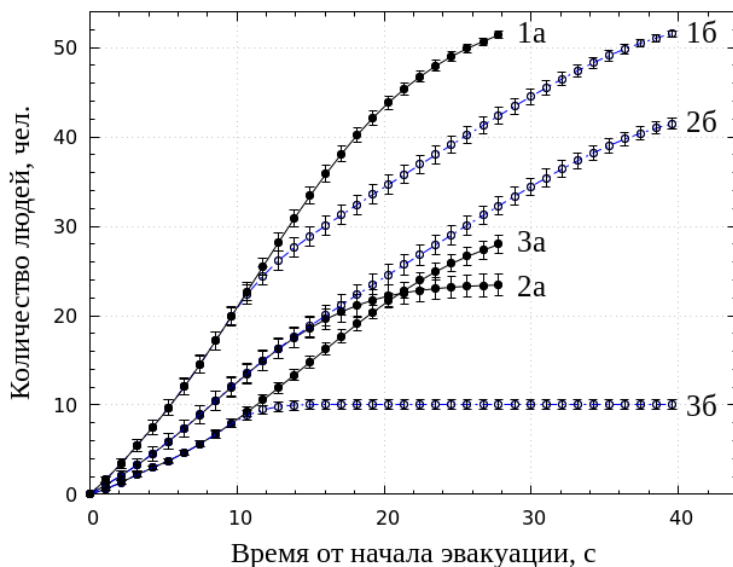


Рисунок 4 – Зависимости количества людей, вышедших из здания, от интервала времени с момента начала движения: «а» – без блокирования путей движения; «б» – при блокировании выхода «В» (рисунок 3) через 10 с. после начала движения

Для исследования зависимости длительности освобождения здания  $T_e$  от степени неоднородности распределения людей по помещениям в здании на момент начала движения, разработан алгоритм распределения людей с заданной плотностью по помещениям.

Введем понятие эффективности управления движением людских потоков, под которой будем понимать величину предотвращенного ущерба, т. е. количество спасенных

жизней.

Динамика выхода людей из здания при  $d_0 = 0.1 \text{ чел./м}^2$  представлена на рисунке 4. Кривые, помеченные символом «а» соответствуют случаю, когда людям доступны все пути для движения. Кривые «2а» и «3а» иллюстрируют зависимость количества людей, выходящих через выходы «А» и «В», соответственно. Зависимость, помеченная «1а», иллюстрирует динамику освобождения людьми здания через оба выхода (фактически, кривая «1а» соответствует количеству людей в безопасной зоне).

Учитывая случайный характер начального распределения людей по

помещениям здания, для каждого набора входных данных анализировались результаты 1000 экспериментов.

Для определенности положим, что в результате пожара выход «В» заблокирован на десятой секунде с момента начала процесса движения. Вследствие блокирования выхода «В» количество людей, выходящих через него сократилось, что показано на рисунке 4 кривой «3б». Модель управляемого движения, с учетом информации о блокировании выхода «В», в автоматическом режиме направляет людские потоки к выходу из здания «А» (кривая «2б»). Кривая «1б» иллюстрирует динамику достижения людьми безопасной зоны при блокировании части маршрута. Длительность освобождения здания при этом увеличивается на 12 секунд за счет удлинения путей движения, но все люди выходят из здания по безопасным путям.

Прогнозируемая эффективность работы системы в конкретном здании (рисунок 3) составляет 9 человек предотвращенного ущерба. То есть система управления движением людских потоков адаптировалась к изменившимся условиям в горящем здании (момент блокирования выхода «В») и направила людские потоки к выходу «А». Данное динамическое перенаправление предотвратило потенциально возможную гибель людей.

На рисунке 5 представлен график зависимости предотвращенного ущерба от плотности начального распределения людей по помещениям (зонам) в здании (рисунок 3). В частности, из графика следует, что при плотности  $0.4 \text{ чел./м}^2$  величина предотвращенного ущерба составляет 44 человека. Это означает, что эффективность применения метода автоматического управления движением зависит от количества людей в здании.

На рисунке 6 представлены графики зависимости предотвращенного ущерба от времени начала блокирования эвакуационного выхода «А» здания (рисунок 3). График № 1 получен при  $d_0 = 0.2 \text{ чел./м}^2$ , 2 –  $d_0 = 0.5 \text{ чел./м}^2$ , 3 –  $d_0 = 0.8 \text{ чел./м}^2$ , 4 –  $d_0 = 1.0 \text{ чел./м}^2$ . Количество экспериментов – 61 тыс.

На графиках рисунка 6 можно заметить, что предотвращенный ущерб достигает максимальных значений при блокировании выхода «А» в момент начала движения. Предотвращенный ущерб снижается до момента, когда время начала блокирования пути превысит длительность движения и опасное воздействие среды на людей прекратится. Так, при плотности начального распределения  $0.2 \text{ чел./м}^2$  (кривая № 1, в здании размещено 104 человека) предотвращенный ущерб меняется с 28 человек (при блокировании пути в момент начала движения) до 0 человек (при блокировании через 40 секунд). То есть через 40 секунд с момента начала движения блокируемый участок пути не используется для движения людских потоков.

Исследование эффективности по результатам вычислительных экспериментов применения метода управления движением показало, что предотвращенный ущерб зависит и от сложности здания, и от характеристик процесса движения.



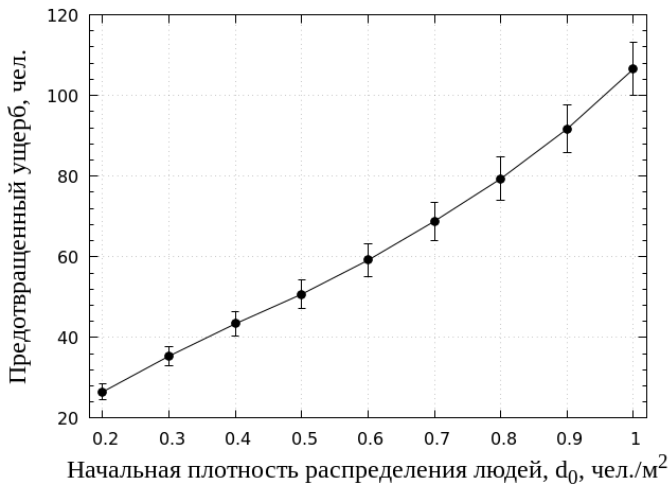


Рисунок 5 – Зависимость предотвращенного ущерба от начальной плотности распределения людей по помещениям здания (рисунок 3) при блокировании помещения № 1 продуктами горения через 10 секунд после начала движения

В рамках допущений потоковой модели управляемого движения людских потоков в динамической среде установлены следующие закономерности: к увеличению длительности освобождения здания ведет увеличение количества и степени неоднородности начального распределения людей; к снижению длительности и повышению безопасности движения ведет увеличение интервала времени с момента начала движения до начала блокирования участков маршрутов.

**В четвертой главе** представлен один из возможных вариантов реализации применения модели и алгоритмов управления движением людских потоков в виде программно-аппаратного комплекса.

В целях проверки эффективности разработанных алгоритмов создан прототип системы в виде программно-аппаратного комплекса (ПАК). Основным преимуществом ПАК и его новизной является возможность автоматического определения путей движения в режиме опережения реального времени и оповещения людей об изменении путей в режиме реального времени. Проектирование путей движения в ПАК основано на результатах мониторинга состояния окружающей среды в помещениях здания и их обработке. Полученные результаты в режиме реального времени передаются в качестве параметров в программу моделирования управляемого движения людских потоков.

На рисунке 7 представлена структурная схема макета программно-аппаратного комплекса системы автоматического управления движением людских в динамической среде.

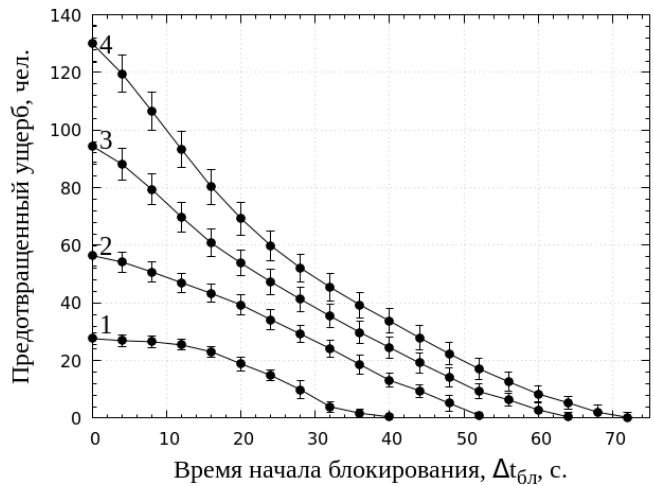


Рисунок 6 – Зависимость предотвращенного ущерба от времени начала блокирования помещения № 1 (рисунок 3) продуктами горения после начала движения

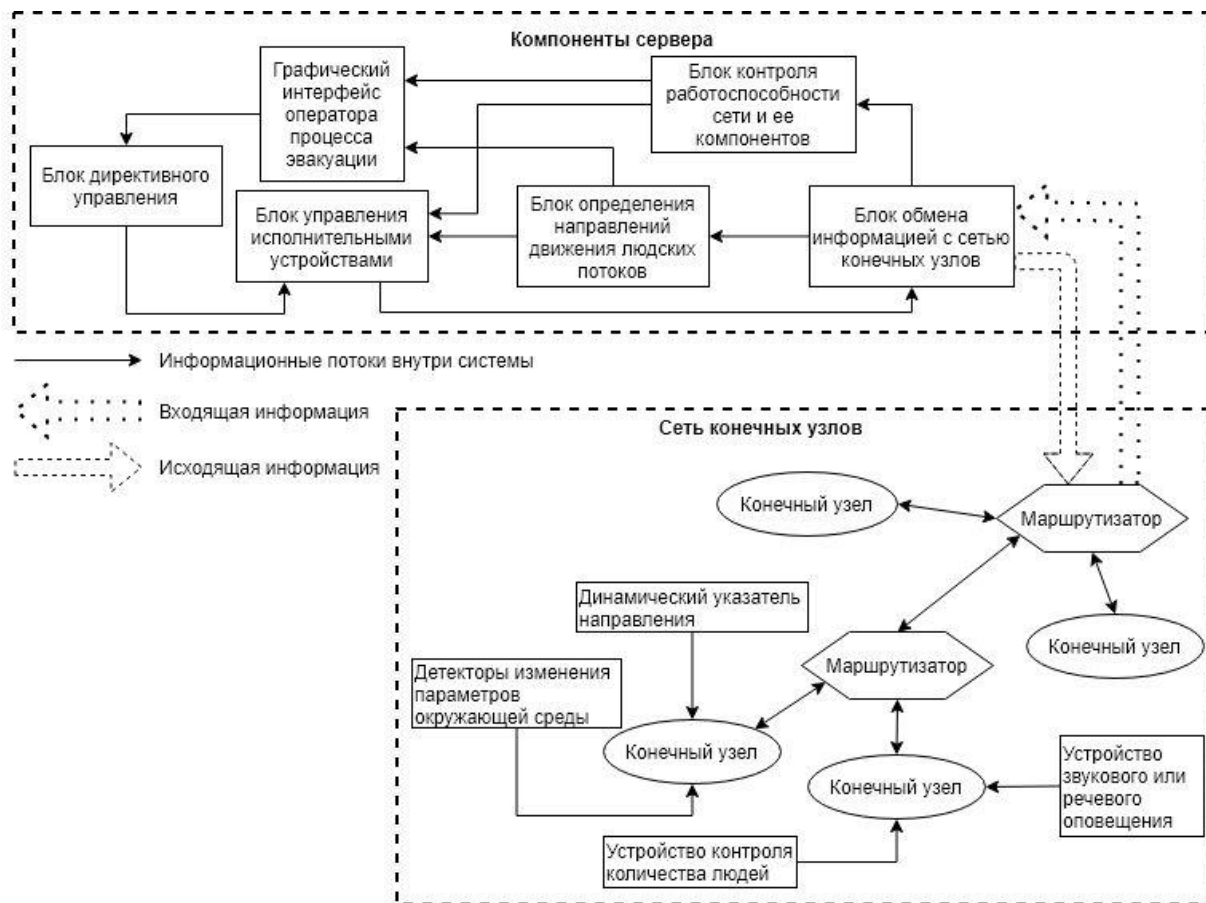


Рисунок 7 – Структурная схема прототипа ПАК

В прототипе связь между узлами организована по проводному интерфейсу RS485. Основной аппаратной частью конечных узлов и маршрутизаторов являются микроконтроллеры ATmega128RFA1. Часть конечных узлов оборудована ручными пожарными извещателями, остальные – динамическими световыми указателями и световыми сигнализаторами режима функционирования проема.

Исходя из разработанных методов и выработанных требований к управлению движением людских потоков в динамической среде, обозначим необходимые режимы функционирования ПАК:

1) мониторинг – осуществляется сбор информации о контролируемых параметрах окружающей среды в помещениях здания (температура, задымление, наличие/отсутствие газов, количество и распределение людей) с узлов сети, которые оборудованы соответствующими датчиками;

2) идентификация события, инициирующего начало движения – осуществляется обработка результатов мониторинга, оценка ситуации и принятие решения о переходе в следующий режим;

3) управление движением – осуществляется моделирование управляемого движения людских потоков и определение безопасных и кратчайших по времени путей и информирование о них людей, находящихся в здании;

4) директивное управление – ручное управление движением людских потоков лицом, уполномоченным принимать решения.

В ПАК выделено три подсистемы: мониторинг параметров окружающей среды, количества и размещения людей в помещениях (зонах) здания; управление; световое и звуковое оповещение (информирование) людей.

Подсистема мониторинга предназначена для наблюдения за параметрами состояния окружающей среды в помещениях и локализации помещений, в которых достигнуты критические для людей уровни параметров.

Подсистема управления предназначена для приема и обработки информации от подсистемы мониторинга. Результатом работы подсистемы управления являются кратчайшие по времени и безопасные пути движения, и набор команд для подсистемы информирования.

Подсистема информирования предназначена для светового и звукового оповещения людей о спроектированных путях. Она включает в себя звуковые и световые оповещатели. Световые оповещатели являются динамическими, т. е. могут менять указываемое направление.

Основной режим работы системы – режим мониторинга. В этом режиме узлы системы проводят замеры параметров окружающей среды в помещениях с заданным интервалом и проводят первичную оценку ситуации в здании. При обнаружении превышения фоновых значений наблюдаемых параметров подсистема управления переводит ПАК в режим идентификации пожара, т. е. сбор полной информации путем непрерывного мониторинга параметров окружающей среды. При подтверждении обнаружения пожара система переходит в режим управления движением для определения кратчайших по времени и безопасных путей передвижения и передачи данных о них в подсистему информирования. В ином случае – возвращает ПАК в режим мониторинга. Переход в режим директивного управления допускается в любой момент работы ПАК.

В рамках диссертационного исследования для проверки работоспособности усовершенствованного метода и разработанных алгоритмов автоматического управления движением людских потоков создан макет системы в виде программно-аппаратного комплекса, который основан на структуре, предлагаемой на рисунке 7. Основным преимуществом ПАК и его новизной является возможность перестроения путей движения людских потоков в динамической среде в масштабе «метр-секунда» и возможность оповещения людей об изменении путей движения до выходов из здания.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации решены поставленные задачи, достигнута цель исследования, сформулированы основные выводы и результаты работы.

1) Разработан метод управления движением людских потоков в динамической среде, позволяющий формировать безопасные и кратчайшие по времени маршруты

движения в динамической среде в режиме реального времени. Определены направления повышения эффективности системы автоматического управления движением людских потоков в динамической среде: автоматическое определение путей движения до безопасной зоны в режиме опережения реального времени, адаптированных к условиям динамической среды, и информирование людей о путях в режиме реального времени.

2) Разработан метод оценки сложности здания, позволяющий учесть влияние имманентных свойств здания на длительность его освобождения. При анализе результатов натуральных экспериментов по эвакуации людей из здания топологическая сложность выступает в качестве параметра, влияющего на временной интервал освобождения здания.

3) Разработана новая процедура проверки адекватности модели управляемого движения людских потоков, отличающаяся использованием новой характеристики – сложности здания и позволяющая настроить модель для однотипных зданий или зданий определенного функционального назначения. Построена регрессионная зависимость продолжительности освобождения здания от его сложности и плотности начального распределения людей, которая статистически значимо отвечает данным натуральных экспериментов. Регрессионная зависимость лежит в основе процедуры валидации математической модели управляемого движения людских потоков в динамической среде в пространственно-временном масштабе «метр-секунда».

4) Разработан новый программный комплекс, реализующий модель управления движением людских потоков в ограниченном пространстве с динамической средой и отличающийся поддержкой моделирования в режиме реального времени. Все исходные коды программ являются открытыми и распространяются по лицензии MIT.

5) Введен критерий эффективности применения метода автоматического управления движением людских потоков. В качестве критерия принята величина предотвращенного ущерба (предотвращенное потенциальное количество жертв) при чрезвычайной ситуации в здании. Исследование эффективности показало, что она зависит от многих параметров: количества и распределения людей в здании, времени начала движения, объемно-планировочных решений здания и т. д.

6) Подтверждена возможность использования метода автоматического управления. Создан прототип программно-аппаратного комплекса автоматического управления движением людских потоков в динамической среде в пространственно-временном масштабе «метр-секунда». В прототипе реализовано автоматическое определение кратчайших по времени и безопасных путей движения людских потоков до безопасной зоны с опережением реального времени и доведение информации о них посредством динамических указателей в режиме реального времени.

**СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ****а) Научные публикации в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК:**

1) Колодкин В.М., Чирков Б.В., Ваштиев В.К. Модель движения людских потоков для управления при пожаре в здании // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2015. Т. 25. Вып. 3.

2) Колодкин В.М., Чирков Б.В. Снижение пожарного риска в зданиях с массовым пребыванием людей // Проблемы анализа риска. 2016. Т. 13. С. 52-59.

3) Колодкин В.М., Чирков Б.В. Компьютерное исследование процесса эвакуации людей из здания при пожаре // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 12-3. С. 496-500. DOI:10.17513/snt.36516.

4) Колодкин В.М., Чирков Б.В. Система адаптивного управления экстренной эвакуацией при пожаре в здании // Безопасность в техносфере. 2017. Т. 6. №. 4. С. 58-65. DOI: 10.12737/article\_5a2907cc4f32d7.65348137.

5) Чирков Б. В. Анализ структуры системы обеспечения пожарной безопасности людей в здании // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2018. Т. 21, № 4. С. 217-221.

**б) Научные публикации в изданиях, входящих в базу данных Scopus (Q2):**

6) Колодкин В.М., Чирков Б.В. Валидация модели адаптивного управления движением людских потоков в динамической среде ограниченного пространства // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2020. Т. 30. Вып. 3. с. 480-496. DOI: 10.35634/vm200309

**в) Научные публикации за рубежом:**

7) Колодкин В.М., Чирков Б.В. Современные методы информирования и подготовки населения к действиям в условиях чрезвычайной ситуации // Современные информационные технологии в образовании и научных исследованиях. Материалы IV-й международной научно-технической конференции студентов и молодых ученых. / Сборник научных трудов студентов, магистрантов, аспирантов и преподавателей. Донецк: ДонНТУ, 2013. С. 104 – 109.

8) Чирков Б.В. Графическое представление результатов моделирования движения людских потоков в здании при пожаре // Чрезвычайные ситуации: теория и практика: матер. междунар. конф. Гомель, 2015.

9) Чирков Б.В., Степанов А.О., Морозов О.А. Программное обеспечение для составления плана расстановки элементов системы пожарной безопасности // Чрезвычайные ситуации: теория и практика: матер. междунар. конф. Гомель, 2015.

**г) Научные публикации, опубликованные в других научных изданиях:**

10) Чирков Б.В. Программный продукт для построения пространственно-информационной модели здания для управления эвакуацией людей из здания при пожаре // Инновационное развитие современной науки: сборник статей междунар. научно-практической конференции. в 9 ч. ч. 4. БашГУ, г. Уфа, 2014.

11) Чирков Б.В. Пространственно-информационная модель здания // Всероссийская научно-практическая конференция «Инновации в науке технике и технологиях», сборник статей, Удмуртский университет, г. Ижевск, 2014.

12) Чирков Б.В., Варламов Д.В. Определение количества людей в здании // Материалы 4 международной конференции «Проблемы техносферной безопасности 2015»: М., 2015.

13) Колодкин В.М., Морозов О.А., Варламов Д.В. Чирков Б.В. и др Система управления эвакуацией людей из здания при пожаре // Безопасность в техносфере, вып. 9, сборник статей. Удмуртский Университет, г. Ижевск, 2015.

14) Колодкин В.М., Чирков Б.В. Методика определения расчетных величин пожарного риска // Безопасность в техносфере, вып. 9, сборник статей. Удмуртский Университет, г. Ижевск, 2015.

15) Колодкин В.М., Ваштиев В.К., Варламов Д.В., Чирков Б.В. и др. Модель эвакуации, обеспечивающая минимальное время эвакуации // Безопасность в техносфере, вып. 9, сборник статей. Удмуртский Университет, г. Ижевск, 2015.

16) Колодкин В.М., Галиуллин М.Э., Морозов О.А., Варламов Д.В., Ваштиев В.К., Чирков Б.В. Система управления эвакуацией людей из здания при пожаре // Безопасность в техносфере, вып. 10, мат. междунар. конф. Ижевск, 2016, С. 6-16.

17) Колодкин В.М., Варламов Д.В., Чирков Б.В., Романенко А.В., Чигвинцев Г.М. Пространственно-распределенный мониторинг опасных факторов пожара на основе микропроцессорных сенсорных узлов системы управления эвакуацией // Безопасность в техносфере, вып. 10, мат. междунар. конф. Ижевск, 2016, С. 17-27.

18) Колодкин В.М., Чирков Б.В. Алгоритмы и модели системы управления эвакуацией людей при пожаре в здании // Безопасность в техносфере, вып. 10, мат. междунар. Конф. Ижевск, 2016, С. 28-43.

19) Чирков Б.В., Ваштиев В.К. Испытательный стенд базовых компонентов системы динамического управления эвакуацией // Безопасность в техносфере, вып. 10, мат. междунар. конф. Ижевск, 2016, С. 48-52.

20) Чирков Б.В., Варламов Д.В. Программно-аппаратный комплекс управления экстренной эвакуацией в общественных зданиях при пожаре // Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур, мат. междунар. конф. Екатеринбург, 2016.

21) Чирков Б.В. Исследование системы адаптивного управления экстренной эвакуацией из здания при пожаре // Безопасность в техносфере, вып. 11, мат. междунар. Конф. Ижевск, 2017, С. 37-44.

22) Колодкин В.М., Варламов Д.В., Чирков Б.В., Романенко А.В., Чигвинцев Г.М. Измерительный мониторинг опасных факторов пожара и информационные параметры системы динамического управления эвакуацией // Безопасность в техносфере, вып. 11, мат. междунар. конф. Ижевск, 2017, С. 6-20.

23) Чирков Б.В. Проблемы управления экстренной эвакуацией людей из здания при пожаре и пути их решения // Безопасность в техносфере, вып. 11, мат. междунар. конф. Ижевск, 2017, С. 26-36.

24) Чирков Б.В. Постановка задачи по проектированию и указанию путей эвакуации из горящего здания в режиме реального времени // Безопасность жизнедеятельности: проблемы и решения – 2017. Материалы международной научно-практической конференции. г. Курган: КГСХА, 2017, С. 318 - 323.

25) Чирков Б.В. Система адаптивного управления экстренной эвакуацией // Сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодых» – Нижний Новгород, 2017, С. 614-615.

26) Колодкин В.М., Чирков Б.В., Ушаков Д.Е. Повышение эффективности системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре в здании // Безопасность в техносфере, вып. 12, мат. междунар. конф. Ижевск, 2018, С. 6-19.

27) Чирков Б.В. Методы совершенствования и алгоритмы управления эвакуацией из здания // Безопасность в техносфере, вып. 12, мат. междунар. конф. Ижевск, 2018, С. 20-45.

28) Ушаков Д.Е., Чирков Б.В. Исследование ограничений расстановки беспроводных узлов на базе микроконтроллера ATmega128RFA1 // Безопасность в техносфере, вып. 12, мат. междунар. конф. Ижевск, 2018, С. 49-53.

29) Чирков Б.В., Евстафьева П.С., Буторина К.С. Математическая модель формирования управляющих команд для системы управления эвакуацией // Безопасность в техносфере, вып. 13, мат. междунар. конф. Ижевск, 2019, С. 42-51.

30) Колодкин В.М., Чирков Б.В. Оценки топологической сложности зданий в модели эвакуации // Безопасность в техносфере, вып. 13, мат. междунар. конф. Ижевск, 2019, С. 6-11.

31) Чирков Б.В., Евстафьева П.С., Буторина К.С. Оценка сложности зданий по методу анализа иерархий // Безопасность в техносфере, вып. 13, мат. междунар. конф. Ижевск, 2019, С. 52-55.

**д) Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

32) Чирков Б.В., Колодкин В.М., Морозов О.А., Варламов Д.В., Ваштиев В.К. «Программа проектирования путей эвакуации людей из здания в условиях чрезвычайной ситуации». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 10 сентября 2015 года № 2015619708.

33) Чирков Б.В., Степанов А.О., Ваштиев В.К., Федотова И.В., Галиуллин М.Э. «NodeMaker». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ от 11 сентября 2015 года № 2015619740.