

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 004:51-77:614.8
DOI 10.17513/snt.39791

АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ ПРИ ПОЖАРАХ В ЗДАНИЯХ: ОБЗОР ПОДХОДОВ И ИССЛЕДОВАНИЙ

Коткова Е.А., Матвеев А.В., Нefeldев С.А., Таранцев А.А.

*ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы
Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации
генерала армии Е.Н. Зиничева», Санкт-Петербург, e-mail: fcvega_10@mail.ru*

Агентному подходу при моделировании эвакуации людей при пожарах в зданиях с развитием информационных технологий уделяется в последнее время значительное внимание, поскольку он позволяет учитывать когнитивные способности человека в экстремальных ситуациях. При этом множество реализованных моделей в виде программных средств для моделирования процесса эвакуации не в полной мере учитывают как индивидуальное психоэмоциональное поведение каждого человека в отдельности, так и групповое поведение людей в экстремальной ситуации. Это, безусловно, оказывает значительное влияние на адекватность результатов моделирования. Использование агентно-ориентированного подхода позволяет решить данную проблему. В данной статье представлен обзор исследований, посвященных различным агентно-ориентированным моделям эвакуации. В исследовании выделены три класса поведенческих моделей принятия решений для отдельных агентов (на основе функциональных связей, на основе правил и комбинированные модели), а также два подхода к моделированию толпы (на основе ньютоновской механики и моделей движения жидкостей и газов). Представлен обзор исследований по каждому классу моделей, выделены достоинства и недостатки каждого из подходов. Обоснованы перспективные направления развития агентного подхода к моделированию процессов эвакуации.

Ключевые слова: эвакуация, пожар, экстремальная ситуация, поведение людей, агентная модель, агентно-ориентированный подход

AGENT MODELING OF THE PROCESS OF PEOPLE EVACUATION DURING FIRE IN BUILDINGS: A REVIEW OF APPROACHES AND RESEARCH

Kotkova E.A., Matveev A.V., Nefedev S.A., Tarantsev A.A.

*Saint Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations
of Russia named after the Hero of the Russian Federation, General of the Army E.N. Zinichev,
Saint Petersburg, e-mail: fcvega_10@mail.ru*

The agent-based approach in modeling the evacuation of people in case of fires in buildings with the development of information technology has recently received considerable attention, since it allows taking into account the cognitive abilities of a person in extreme situations. At the same time, many implemented models in the form of software tools for modeling the evacuation process do not fully take into account both the individual psycho-emotional behavior of each person individually and the group behavior of people in an extreme situation. This, of course, has a significant impact on the adequacy of the simulation results. The use of an agent-oriented approach allows us to solve this problem. This article provides an overview of research on various agent-based evacuation models. The study identifies three classes of behavioral decision-making models for individual agents (based on functional relationships, based on rules and combined models), as well as two approaches to crowd modeling (based on Newtonian mechanics and models of the movement of liquids and gases). A review of studies on each class of models is presented, the advantages and disadvantages of each of the approaches are highlighted. Prospective directions for the development of the agent-based approach to modeling evacuation processes are substantiated.

Keywords: evacuation, fire, emergency situation, human behavior, agent-based model, agent-based approach

Моделирование и изучение процесса эвакуации при чрезвычайных ситуациях, в том числе пожарах в зданиях, включая исследование поведения людей в экстремальных ситуациях, является важным аспектом для принятия управленческих решений, направленных на снижение потенциального количества жертв и пострадавших [1]. Анализ крупных пожаров с большим социаль-

ным ущербом, произошедших в последние годы, позволяет сделать вывод о значительном влиянии психоэмоционального поведения человека в чрезвычайных ситуациях, всестороннее понимание которого очень важно для принятия адекватных управленческих решений [2–4]. В последние десятилетия многими отечественными [5, 6] и зарубежными учеными [7, 8] проводятся

исследования, направленные на изучение процесса эвакуации, фокус внимания которых сосредоточен именно на детальном анализе поведения людей.

Материалы и методы исследования

В целом все модели поведения людей при эвакуации можно условно разделить на три класса:

1. Физические модели, аналогичные моделям жидкости и газа или на базе ньютоновской механики. Примером служит модель Хелбинга. С помощью уравнения Павери-Фонтана и метода, аналогичного решению уравнений Эйлера для обычных жидкостей, Хелбинг предложил уравнение движение толпы на макроскопическом уровне [9]. При данном подходе выявлена зависимость равновесной скорости движения эвакуирующихся от плотности людей и средней скорости в точке взаимодействия индивидуумов. Данные модели относятся к классу непрерывных.

2. Матричные модели. Примерами являются решетчатая модель газа, предложенная в исследовании [10], модель эвакуации с использованием принципов клеточных автоматов [11] и модели на основе теории игр [12]. Все представленные модели относятся к классу дискретных.

3. Аварийные модели. Примером является множество моделей эвакуации толпы в чрезвычайных ситуациях [13, 14]. Однако поведенческое представление эвакуирующихся в этих моделях, как правило, чрезмерно упрощено.

Основным критерием эффективности управления эвакуацией является общее время эвакуации, на оценку которого и направлено большинство исследований и разработанных моделей эвакуации. Основываясь на существующих исследованиях в области психологического поведения индивидуумов при условии скопления людей, в работе [15] предложена простейшая ORSET-модель (Occupant Response Shelter Escape Timeline) в терминах критериев риска, которая объединила в общей структуре психологические, архитектурные и управленческие аспекты при расчете времени эвакуации.

Так как реальные эксперименты эвакуации при пожарах и других чрезвычайных ситуациях в зданиях фактически невозможны ввиду опасности и дороговизны реализации исследуемого процесса, а также с учетом сложности реального воспроизведения влияния экстремальных факторов на когнитивные способности человека, все более значительное внимание уделяется компьютерному моделированию эвакуации, которое в целом может быть как агентно-

ориентированным, так и нет. Существует достаточно большое количество реализованных моделей в виде программных средств для моделирования процесса эвакуации, например SIMULEX [16], EXODUS [17], PATHFINDER [18], FDS+Evac [19], СИТИС [20] и др. Однако реализованные в данных продуктах модели недостаточно учитывают как индивидуальное психоэмоциональное поведение каждого человека в отдельности, так и групповое поведение людей в экстремальной ситуации, что, безусловно, оказывает значительное влияние на адекватность моделирования и является существенным недостатком данных инструментов.

В последние годы важными шагами в данном направлении являются исследования ряда ученых в сфере интеграции индивидуального когнитивного поведения индивидуумов и их социального коллективного поведения в модели эвакуации. И практически все исследователи отмечают, что именно агентно-ориентированный подход является наиболее рациональным для исследования процессов поведения человека или группы людей и применимым в имитационных моделях эвакуации при пожарах и других чрезвычайных ситуациях в зданиях [21].

Не нарушая общности рассуждений, авторы более подробно рассмотрели существующие исследования в области агентных моделей процесса эвакуации, которые будут классифицированы на несколько классов, реализующих принципиально разные подходы к моделированию. Однако общей во всех этих исследованиях является важность влияния индивидуального и социального человеческого поведения, которое определенным образом должно быть включено в вычислительную модель.

Результаты исследования и их обсуждение

Агентно-ориентированный подход тесно связан с кибернетическим подходом, теорией автоматов, искусственного интеллекта как общенаучных дисциплин, моделирующих поведение искусственных и биологических существ в условиях некоторой внешней среды. Агент считается своего рода компьютерной системой, которая обладает гибким и независимым поведением, основанным на задаваемых сценариях. Его можно рассматривать как автономную личность, обладающую знаниями, обрабатывающую информацию, анализирующую проблему и предпринимающую определенное рода действия.

В последние годы агентный подход внедряется в моделирование эвакуации при пожарах в зданиях для имитации когнитив-

ных способностей человека и социального поведения. Реализация довольно сложна, но и перспективна, поэтому моделирование эвакуации с использованием агентно-ориентированного подхода является актуальной областью исследований.

Агентно-ориентированная модель обычно строится «снизу вверх» [22, 23]. Каждый агент, во-первых, наделяется физическими и когнитивными характеристиками человека, основанными на анализе когнитивных процессов. Затем моделируются внутренние отношения между агентами, отношения между группами людей и соответствующее социальное поведение. В основном подход к агентному моделированию заключается в моделировании агентов с определенными правилами поведения и принятия решений, на основании которых агент может действовать независимо и вступать во взаимоотношения с другими агентами. Механизм принятия решений является ключевым в этих моделях, поскольку он отражает интеллект каждого отдельного агента.

Различия в подходах к моделированию основываются на алгоритмах принятия решений агентами в процессе эвакуации. На основе существующих исследований предлагается классификация подходов к моделированию принятия поведенческих решений агентов на три класса: модели принятия решений агентами, основанные на функциональных связях, модели принятия решений агентами, основанные на правилах, и комбинированные модели, использующие оба из вышеупомянутых подходов.

1. Модели индивидуального принятия решения агентами при эвакуации

1.1. Модели принятия решений агентов на основе функциональных связей

В целом на поведение агентов в случае пожара в здании могут влиять как внутренние, так и внешние по отношению к каждому агенту факторы. Среди внутренних факторов можно выделить такие, как возраст агентов, скорость их реакции на проявления внешних воздействий, физическое состояние, мобильность и др. Внешние факторы включают в себя архитектуру зданий, наличие средств и систем обеспечения пожарной безопасности, опасные факторы пожара, плотность и численность людей в здании и др. Единого подхода к тому, как учитывать влияние всей совокупности этих факторов на скорость и направление движения агентов в здании, в целом не существует. Многие исследователи предлагают свои модели учета влияния этих факторов, причем, как правило, лишь некоторые из них. Чаще всего задается одно или не-

сколько функциональных отношений, которые определяют поведение отдельного агента в агентно-ориентированной модели. Наиболее часто учитываемым в данных моделях фактором влияния на скорость эвакуации является плотность людей. Одной из первых подобных моделей была модель Нельсона и Макленнана, в которой была предложена взаимосвязь между плотностью агентов и скоростью их перемещения в виде ступенчатой функции [24].

В используемых в России моделях движения людского потока данная взаимосвязь определяется аналогичным образом [25]. На основе получаемых функциональных соотношений строятся соответствующие модели принятия решений по безопасной эвакуации. В ряде исследований [13, 26, 27] в результате статистической обработки и теоретического обобщения экспериментальных данных установлены скорости свободного движения различных групп мобильности.

В статье [28] предложен подход к имитационному моделированию эвакуации, когда скорость движения агентов определялась на основе степени влияния распространяющихся опасных факторов пожара, что позволяет оценить влияние внешней среды на поведение агентов.

В исследовании [29] авторы интегрировали многоагентную структуру в геоинформационную систему, позволяющую моделировать поведение человека в здании с несколькими выходами, а также отображать процесс эвакуации толпы и определять ее время в условиях чрезвычайной ситуации. При описании поведения агентов при эвакуации учитывались их атрибуты: физические атрибуты, психологические атрибуты и данные об их координатах в пространстве, которые и определяли скорость движения агентов.

В 2014 г. группой китайских ученых была предложена модель эвакуации людей из помещения с учетом воздействия дыма и огня при пожаре [30]. На основе численного моделирования анализировалось влияние мест пожара, типа горящих материалов, скорости тепловыделения и ширины выходов на процесс эвакуации. Результаты показали, что данные факторы оказывают большое влияние на эвакуацию, что может быть полезно для комплексного анализа эвакуации людей при пожаре и выработке соответствующих управленческих решений.

Результаты эксперимента, представленного в статье [31], подтверждают существенное влияние скорости движения людей в здании от степени воздействия опасных факторов пожара.

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости использования функциональных связей для задания поведения каждого отдельного агента для повышения адекватности результатов моделирования эвакуации. Однако данный подход имеет существенный недостаток, заключающийся в сложности задания поведения совокупности агентов.

1.2. Модели принятия решений агентов на основе правил

В работе [14] решалась задача изучения проблемы безопасности толпы в чрезвычайных ситуациях за счет формирования множества правил, разработанных путем сочетания когнитивных характеристик людей с технологией агентного моделирования. Основой являлись исследования в области психологии человека, взаимодействия между агентами и отношений между группами людей. Далее строилась модель агентов, где каждому отдельному агенту присваивались физические и когнитивные характеристики человека. Система моделирования агентов, основанная на правилах, имитирует сложное социальное поведение человека в толпе, такое как конкурентное поведение, поведение в очередях и стадное поведение.

В исследовании [32] объединены возможности агентного моделирования и геоинформационных технологий, в котором в соответствии с результатами исследований поведения индивидуумов в чрезвычайных ситуациях строится ряд правил поведения агентов. Однако для упрощения исследования индивидуумы-агенты в одной группе действуют в соответствии с одними и теми же правилами, что не позволяет учитывать разнообразные формы поведения среди индивидуумов-агентов.

Существует ряд научных работ, в которых применяются методы нечеткой логики для построения моделей эмоций эвакуирующихся с помощью агентно-ориентированного подхода [33, 34], в частности оценок восприимчивости человека к паническим ситуациям. В данных исследованиях в основном делается акцент на ситуативном поведении агента в зависимости от его эмоционального состояния в соответствии со статическими правилами или заранее определенными знаниями предметной области. Однако лишь в незначительном количестве исследований применяются нечеткие правила для описания непосредственно процесса эвакуации. Так, в исследовании [35] автор, используя возможности нечеткой логики, выражающей факторы неопределенности, применил ее для выявления влияния состояния отдельных агентов на их

поведение в процессе эвакуации. В работе сформированы правила принятия решений о поведении отдельных агентов на основе нечеткой логики. Эта нечеткая агентная модель использовалась для моделирования поведения толпы, учитывая поведение отдельных агентов.

Подводя итог, можно сделать промежуточный вывод, что модели принятия решений агентов при эвакуации, основанные на правилах, в большей степени учитывают когнитивные способности человека, чем модели, основанные на функциональных связях.

1.3. Модели принятия решений агентов на основе функциональных связей и правил

С целью комплексного анализа процесса перемещения агентов в здании при пожаре и при этом одновременного учета в модели когнитивных способностей человека и его интеллекта некоторые исследователи предлагали подходы к принятию решений путем сочетания функциональных связей с правилами поведения людей при чрезвычайной ситуации.

В исследовании [36] модели распространения опасных факторов пожара используются одновременно с геометрией здания, численностью людей в здании, правилами формирования маршрутов выхода отдельных агентов. Это типичный случай объединения функциональных связей с агентной моделью, основанной на правилах.

Статья [37] посвящена анализу отношения между отдельными агентами, взаимодействию человека и среды, влиянию возникновения и развития пожара на поведение людей, на основе чего определяется ряд правил поведения агентов. Для определения направления и скорости движения используются некоторые эмпирические математические формулы.

В работе [38] предложен метод оценки эффективности организации эвакуации людей из общественного здания при пожаре с использованием агентно-ориентированного подхода, основанный на разработке имитационной модели эвакуации, учитывающей воздействия некоторых факторов на степень паники людей, таких как время пребывания людей в критической ситуации, плотность скопления людей, расстояние до выхода в безопасную зону. Воздействия данных факторов определяют правила поведения агентов. Данный метод далее был использован в методике интеллектуального прогнозирования эффективности управления эвакуацией, основанной на одновременном применении имитационных моделей эвакуации с методами машинного обучения [39].

Данные исследования демонстрируют возможности интеграции функциональных отношений в агентную модель, основанную на правилах. Несмотря на практические преимущества одновременного использования как функциональных связей, так и правил поведения людей при разработке агентно-ориентированных моделей эвакуации, в целом данный процесс достаточно сложен, но активно развивается в настоящее время, так как является перспективным в исследуемой предметной области, позволяя в значительной степени повышать адекватность результатов моделирования эвакуации.

2. Модели эвакуации толпы на основе агентного подхода

Проанализированные выше модели эвакуации, использующие агентно-ориентированный подход, построены на основе моделирования каждого агента в отдельности. Однако ряд исследований посвящен вопросам моделирования эвакуации толпы в целом.

Под толпой здесь понимается бесструктурное скопление людей, лишенных ясно осознаваемой общности целей, но связанных между собой сходством эмоционального состояния. Проведенные исследования показывают, что чем больше плотность толпы, тем сильнее ощущение опасности [40]. Для столпотворения характерны давка и паника, в связи с чем все больше внимания уделяется влиянию наличия толпы на процесс эвакуации [41]. Среди известных моделей эвакуации толпы можно выделить модель социальной силы и модели клеточного автомата.

2.1. Агентно-ориентированное моделирование толпы на основе ньютоновской механики

Наиболее известной в области моделирования толпы является модель социальной силы, которая базируется на ньютоновской механике при описании движения людей. Модель социальной силы, предложенная Хелбингом [9], объединяет исследования в области психологии и архитектурного строения зданий, что позволяет учитывать как социально-психологические характеристики людей в толпе и их влияние на поведение человека, так и физические законы.

Каждый i -й агент из множества N массы m_i движется с определенной скоростью v_i^0 в определенном направлении e_i^0 и, следовательно, стремится адаптировать свою фактическую скорость v_i к определенному характеру времени t_i , одновременно пытаясь сохранять дистанцию с другими агента-

ми j и различными препятствиями на пути (стенами и др.) W . Это представляется силами взаимодействия данного агента f_{ij} и f_{iW} соответственно, а уравнение модели социальной силы выглядит следующим образом:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t) e_i^0(t) - v_i(t)}{t_i} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_W f_{iW}.$$

В настоящее время большинство агентных моделей эвакуации опираются на модель социальной силы Хелбинга. Так, в частности, в исследовании [42] модель Хелбинга используется для задания поведения агентов в толпе при столкновениях, толчках, давке и т.д. В работе [43] каждому агенту задаются атрибуты эмоций и мотивации, поведение разных агентов задается функцией с индивидуальными параметрами, предлагается способ присоединения индивида к толпе, а также исследуется взаимодействие между несколькими толпами.

В исследовании ученых Института проблем точной механики и управления РАН [44] в процессе эвакуации людей объединены в единую систему формальное описание физических взаимодействий агентов с помощью адаптивной модели частично упругого удара и правила, управляющие поведением агентов. Коррекция скорости движения агентов на каждом шаге модельного времени позволяет уменьшить время их приближения к выходу из помещения. Модель позволяет исследовать состояние и поведение людей при возникновении чрезвычайной ситуации и определить время их эвакуации.

В работе [45] эффект толпы при эвакуации выражается главным образом в виде притяжения или отталкивания близко расположенных агентов с некоторой вероятностью, зависящей от психотипа каждого агента, что позволяет изучить эффекты, связанные с «турбулентностью» толпы.

С использованием молекулярной модели взаимодействия людей в толпе в исследовании [46] решается задача управления потоками людей в здании во время эвакуации. В предложенной модели управляющими параметрами являются коэффициенты расщепления в отдельных частях помещения.

2.2. Агентно-ориентированное моделирование толпы на основе моделей движения жидкостей и газов

Моделирование толпы на основе законов движения жидкостей и газов представляется в виде, где каждый отдельный элемент толпы образует собой частицу, состояние которой описывается уравнениями динамики жидкости или газа (уравнения

Бернулли или Навье – Стокса). В статье [47] поведение потока эвакуирующихся описывалось на физическом уровне методом граничных элементов моделирования потока жидкости и определения свойств потока на основе известных условий на краях области, что позволило оценивать направление и скорость движения в любой точке исследуемой области.

Японскими учеными была предложена модель решетчатого газа при исследовании процессов эвакуации [10], которая представляет собой дискретную модель и относится к классу моделей клеточного автомата. Подобные дискретные модели оказались достаточно удобными для изучения поведения толпы, принимая во внимание и отдельных агентов, что привело к созданию ряда агентно-ориентированных моделей эвакуации при наличии толпы с использованием данного подхода. В этих моделях за основу берутся сетки, в которых далее добавляется интеллектуальная составляющая агента. Отдельные агенты принимают различные решения, что отражает интеллектуальную деятельность человека.

В статье [48] показано, что модели коллективного движения людей в общественных местах во многом подобны закономерностям скоординированного движения, наблюдаемого в стаях птиц, косяках рыб и стадах животных, что позволяет предположить, что разнообразные системы подчиняются общим принципам самоорганизации. Так, в исследовании [49] движение толпы моделируется алгоритмом косяка рыб с применением агентной технологии на основе модели решетчатого газа. В [50] разработана многосеточная модель, основанная на модели решетчатого газа, повышающая точность вычислений.

Недостаток данного подхода на основе модели решетчатого газа состоит в том, что методы задания и размеры сеток оказывают существенное влияние на движение агентов, а значит, и на адекватность результатов моделирования. Исследования в данном направлении нуждаются в дальнейшем развитии и совершенствовании.

Заключение

Так как проведение реальных экспериментов по эвакуации при чрезвычайных ситуациях и пожарах в зданиях фактически невозможно по причине высокой социальной значимости и дороговизны, для исследования данных процессов в большей степени используются методы аналитического и имитационного моделирования.

Среди множества подходов к моделированию эвакуации в последнее время все

больше находит применение агентно-ориентированный, который позволяет исследователям учитывать поведение отдельных индивидуумов и его влияние на процесс эвакуации толпы в целом. В данной статье были рассмотрены исследования в области агентных моделей процесса эвакуации. Все рассматриваемые модели были классифицированы на три типа моделей принятия решений отдельных агентов, а также два класса моделей эвакуации толпы.

Агентно-ориентированный подход к моделированию процесса эвакуации является весьма перспективным и позволяет повысить адекватность моделей и результатов моделирования, поскольку он позволяет учитывать когнитивные способности человека в экстремальных ситуациях. Однако данные исследования еще далеки от своего завершения. Данный подход должен быть интегрирован с другими подходами. Во-первых, по причине сложности исследования поведения отдельных агентов, толпы и их взаимодействия. Также результаты агентного моделирования не могут лечь в основу статистических исследований. В этой связи перспективным видится интегрирование методов агентно-ориентированного моделирования с теорией планирования экспериментов и др.

Список литературы

1. Аптуков А.М., Брацун Д.А., Люшин А.В. Моделирование поведения паникующей толпы в многоуровневом разветвленном помещении // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5, № 3. С. 491–508.
2. Евдокимов А.М. От «Хромой лошади» до «Зимней вишни» // Защита и безопасность. 2018. № 2 (85). С. 17.
3. Задурова А.А., Матвеев А.В., Смирнов А.С. Анализ пожаров на объектах с массовым пребыванием людей на примере ночных клубов // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2020. № 1. С. 20–28.
4. Домаков В.В., Матвеев А.В., Матвеев В.В. Правовые предпосылки национальной трагедии в торгово-развлекательном центре «Зимняя вишня» г. Кемерово // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2018. № 1 (21). С. 48–63.
5. Калачин С.В. Прогнозирование распространения паники среди людей при эвакуации из здания во время пожара // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 10. С. 77–82. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-77-82.
6. Коткова Е.А. Модель нейронной сети для прогнозирования предэвакуационного поведения людей при пожаре // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2022. № 2 (38). С. 66–72. DOI: 10.37468/2307-1400-2022-2-66-72.
7. Ding N., Chen T., Zhu Y., Lu Y. State-of-the-art high-rise building emergency evacuation behavior // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2021. Vol. 561. P. 125168. DOI: 10.1016/j.physa.2020.125168.
8. Şahin C., Rokne J., Alhajj R. Human behavior modeling for simulating evacuation of buildings during emergencies // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2019. Vol. 528. P. 121432. DOI: 10.1016/j.physa.2019.121432.

9. Helbing D., Johansson A. Pedestrian, crowd, and evacuation dynamics // arXiv preprint arXiv:1309.1609. 2013. DOI: 10.48550/arXiv.1309.1609.
10. Muramatsu M., Irie T., Nagatani T. Jamming transition in pedestrian counter flow // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 1999. Vol. 267, Is. 3–4. P. 487–498. DOI: 10.1016/S0378-4371(99)00018-7.
11. Самарцев А.А., Иващенко В.А. Совместное моделирование распространения опасных факторов пожара и эвакуации людей из помещений // *Математические методы в технике и технологиях ММТТ*. 2018. Т. 1. С. 96–98.
12. Lo S.M., Huang H.C., Wang P., Yuen K.K. A game theory based exit selection model for evacuation // *Fire Safety Journal*. 2006. Vol. 41, Is. 5. P. 364–369. DOI: 10.1016/j.firesaf.2006.02.003.
13. Самошин Д.А. Состав людских потоков и параметры их движения при эвакуации. М.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2016. 210 с.
14. Cao R.F., Lee E.W.M., Yuen A.C.Y., Chan Q.N., Xie W., Shi M., Yeoh G.H. Development of an evacuation model considering the impact of stress variation on evacuees under fire emergency // *Safety science*. 2021. Vol. 138. P. 105232. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105232.
15. Sime J.D. An occupant response shelter escape time (ORSET) model // *Safety science*. 2001. Vol. 38, Is. 2. P. 109–125. DOI: 10.1016/S0925-7535(00)00062-X.
16. Thompson P.A., Marchant E.W. Testing and application of the computer model 'SIMULEX' // *Fire Safety Journal*. 1995. Vol. 24, Is. 2. P. 149–166. DOI: 10.1016/0379-7112(95)00020-T.
17. Gwynne S., Owen M., Galea E.R., Fillipidis L., Lawrence P.J. Adaptive decision-making in response to crowd formations in building EXODUS // *Evacuation from fires*. Routledge. 2019. P. 73–96.
18. Qin J., Liu C., Huang Q. Simulation on fire emergency evacuation in special subway station based on Pathfinder // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2020. Vol. 21. P. 100677. DOI: 10.1016/j.csite.2020.100677.
19. Колодкин В.М., Чирков Б.В., Ваштиев В.К. Модель движения людских потоков для управления эвакуацией при пожаре в здании // *Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки*. 2015. Т. 25, № 3. С. 430–438.
20. Дегтярев В.А., Скоробогатов Е.В., Ляшенко С.М. Обзор и анализ программных продуктов для расчета пожарных рисков в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности // *Приоритетные направления развития системы обеспечения пожарной безопасности объектов защиты и территорий: сборник трудов I Международной научно-практической конференции (Химки, 14 июня 2018 г.)*. Химки: Академия гражданской защиты МЧС России, 2018. С. 29–33.
21. Касьяник П.М. Современные зарубежные исследования поведения толпы в экстремальных ситуациях // *Прикладная юридическая психология*. 2014. № 3. С. 157–164.
22. Борщев А.В. Имитационное моделирование: состояние области на 2015 год, тенденции и прогноз // *Автоматизация в промышленности*. 2016. № 2. С. 51–55.
23. Фаттахов Р.В., Фаттахов М.Р. Агентно-ориентированный подход: новое средство получения знания // *Региональная экономика: теория и практика*. 2015. № 10 (385). С. 47–62.
24. Lei W., Li A., Gao R., Hao X., Deng B. Simulation of pedestrian crowds' evacuation in a huge transit terminal subway station // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2012. Vol. 391, Is. 22. P. 5355–5365. DOI: 10.1016/j.physa.2012.06.033.
25. Приказ МЧС России от 02.12.2015 № 382 «Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71196390/?ysclid=lmhzufjps058811468> (дата обращения: 01.09.2023).
26. Самошин Д.А. Методологические основы нормирования безопасной эвакуации людей из зданий при пожаре: дис. ... докт. техн. наук: 05.26.03. Москва, 2017. 357 с.
27. Истратов Р.Н. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в стационарах социальных учреждений по обслуживанию граждан пожилого возраста: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. Москва: Академия ГПС МЧС России, 2014. 160 с.
28. Yi S., Shi J. An agent-based simulation model for occupant evacuation under fire conditions // *2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems*. IEEE, 2009. Vol. 1. P. 27–31. DOI: 10.1109/GCIS.2009.442.
29. Bo Y., Yong-gang W., Cheng W. A GIS-based simulation for occupant evacuation in an amusement building // *2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR 2010)*. IEEE, 2010. Vol. 3. P. 274–277. DOI: 10.1109/CAR.2010.5456684.
30. Cao S., Song W., Liu X., Mu N. Simulation of pedestrian evacuation in a room under fire emergency // *Procedia engineering*. 2014. Vol. 71. P. 403–409. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.058.
31. Чистяков И.М., Кичайкин В.В., Краснов И.А., Пожогин Д.П. Влияние снижения видимости на пожаре на работу звеньев ГДЗС // *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*. 2016. Т. 1, № 1 (7). С. 346–347.
32. Peng S., Yang K., Xu Q., He Y. The Simulation Research on the Evacuation Model of Supermarket by Using GIS and Agent-based Modeling Technology // *2010 International Symposium on Intelligence Information Processing and Trusted Computing*. IEEE, 2010. P. 499–502. DOI: 10.1109/IPTC.2010.68.
33. Калачин С.В. Нечеткое моделирование восприимчивости человека к паническим ситуациям // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2021. Т. 13, № 1. С. 203–218. DOI: 10.20537/2076-7633-2021-13-1-203-218.
34. Родзин С.И., Боженюк А.В., Кравченко Ю.А., Родзина О.Н. Методы нечеткого многокритериального группового принятия решений для задач эвакуации при чрезвычайных ситуациях // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2023. № 2 (232). С. 186–200. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-2-186-200.
35. Sharma S. Simulation and modeling of group behavior during emergency evacuation // *2009 IEEE Symposium on Intelligent Agents*. IEEE. 2009. P. 122–127. DOI: 10.1109/IA.2009.4927509.
36. Tang F., Ren A. Agent-based evacuation model incorporating fire scene and building geometry // *Tsinghua Science and Technology*. 2008. Vol. 13, Is. 5. P. 708–714.
37. Shi J., Ren A., Chen C. Agent-based evacuation model of large public buildings under fire conditions // *Automation in Construction*. 2009. Vol. 18, Is. 3. P. 338–347. DOI: 10.1016/j.autcon.2008.09.009.
38. Коткова Е.А., Матвеев А.В. Метод оценки эффективности организации эвакуации людей из общественного здания при пожаре с использованием агентно-ориентированного подхода // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 8. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n8y2023/8628 (дата обращения: 01.09.2023).
39. Коткова Е.А., Матвеев А.В. Методика интеллектуального прогнозирования эффективности управления эвакуацией людей из общественных зданий // *Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России*. 2021. № 4. С. 107–120.
40. Lin J., Zhu R., Li N., Becerik-Gerber B. Do people follow the crowd in building emergency evacuation? A cross-cultural immersive virtual reality-based study // *Advanced Engineering Informatics*. 2020. Vol. 43. P. 101040. DOI: 10.1016/j.aei.2020.101040.

41. Коткова Е.А. Системно-динамическая модель распространения паники при эвакуации из общественных зданий // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2022. № 1. С. 182–194.
42. Liu B., Liu Z., Hong Y. A simulation based on emotions model for virtual human crowds // 2009 Fifth International Conference on Image and Graphics. IEEE. 2009. P. 836–840. DOI: 10.1109/ICIG.2009.24.
43. Rao Y., Chen L., Liu Q., Lin W., Li Y., Zhou J. Real-time control of individual agents for crowd simulation // Multimedia Tools and Applications. 2011. Vol. 54. P. 397–414. DOI: 10.1007/s11042-010-0542-y.
44. Самарцев А.А., Иващенко В.А., Резчиков А.Ф. Кушников В.А., Филимонок Л.Ю., Богомолов А.С. Мультиагентная модель процесса эвакуации людей из помещений при возникновении чрезвычайных ситуаций // Управление большими системами: сборник научных трудов. 2018. № 72. С. 217–244.
45. Акопов А.С., Бекларян Л.А. Агентная модель поведения толпы при чрезвычайных ситуациях // Автоматика и телемеханика. 2015. № 10. С. 131–143.
46. Зайцева М.В., Точилин П.А. Управление потоками людей в здании во время эвакуации // Вестник Московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. 2020. № 4. С. 3–18.
47. Болбин С.Н., Митягин С.А., Захаров Ю.Н. Моделирование эвакуации при ограничении в пространстве с учетом социальных связей между людьми // Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России. 2012. № 4 (56). С. 268–272.
48. Dachner G.C., Wirth T.D., Richmond E., Warren W.H. The visual coupling between neighbours explains local interactions underlying human ‘flocking’ // Proceedings of the Royal Society B. 2022. Vol. 289, Is. 1970. P. 2021–2089. DOI: 10.1098/rspb.2021.208.
49. Fitzgerald B.W., van Santen R.A., Padding J.T. Modeling of collective motion // Complexity Science: An Introduction, 2019. P. 305–328.
50. Cao S., Song W., Lv W., Fang Z. A multi-grid model for pedestrian evacuation in a room without visibility // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2015. Vol. 436. P. 45–61. DOI: 10.1016/j.physa.2015.05.019.