

Научная статья

УДК 004.94:614.841.44; DOI: 10.61260/2304-0130-2026-1-54-58

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ТОРГОВО-РАЗВЛЕКАТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРАХ

✉ Соров Арсений Алексеевич;

Худеева Юлия Сергеевна;

Бурмистрова Наталья Александровна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ djimir11@yandex.ru

Аннотация. Проблема обеспечения пожарной безопасности в торгово-развлекательных центрах остается чрезвычайно актуальной в связи с их сложной планировкой, массовым пребыванием людей и высокими рисками при возникновении чрезвычайных ситуаций. Существующие системы оповещения и управления эвакуацией часто являются статическими и не адаптируются к динамическому развитию опасных факторов пожара. Целью данного исследования стала разработка математической модели интеллектуальной системы управления эвакуацией в торгово-развлекательных центрах, интегрирующей данные мониторинга в реальном времени для динамической маршрутизации потоков людей. В работе предложена агентно-ориентированная модель, описывающая движение посетителей (агентов) в условиях изменяющейся обстановки. Распространение формализовано с помощью системы дифференциальных уравнений, учитывающей скорость распространения дыма и рост температуры, с использованием фундаментальных подходов к прогнозированию.

Ключевые слова: пожарная безопасность, торгово-развлекательный центр, математическое моделирование, агентно-ориентированная модель, динамическая маршрутизация, опасные факторы пожара, эвакуация, интеллектуальная система

Для цитирования: Соров А.А., Худеева Ю.С., Бурмистрова Н.А. Применение новых информационных технологий для обеспечения пожарной безопасности в торгово-развлекательных центрах // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2026. № 1 (57). С. 54–58. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-54-58

Scientific article

APPLICATION OF NEW INFORMATION TECHNOLOGIES FOR ENSURING FIRE SAFETY IN SHOPPING AND ENTERTAINMENT CENTERS

✉ Sorov Arseny A.,

Khudeyeva Yulia S.,

Burmistrova Natalya A.

Saint-Petersburg university of state fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ djimir11@yandex.ru

Abstract. The problem of ensuring fire safety in shopping and entertainment centers remains extremely relevant due to their complex layout, mass occupancy, and high risks in emergency situations. Existing warning and evacuation control systems are often static and do not adapt to the dynamic development of dangerous fire factors. The aim of this study was to develop a mathematical model of an intelligent evacuation control system, integrating real-time monitoring data for dynamic routing of human flows. The paper proposes an agent-based model describing the movement of visitors under changing conditions. The spread of fire hazards is formalized using a system of differential equations that takes into account the rate of smoke spread and temperature increase, based on fundamental forecasting approaches.

Keywords: fire safety, shopping and entertainment center, mathematical modeling, agent-based model, dynamic routing, dangerous fire factors, evacuation, intelligent system

For citation: Sorov A.F., Khudeeva I.S., Burmistrova N.A. Application of new information technologies for ensuring fire safety in shopping and entertainment centers // *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects)*. 2026. № 1 (57). P. 54–58. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-1-54-58

Введение

Торгово-развлекательные центры (ТРЦ) как объекты с массовым пребыванием людей характеризуются повышенными требованиями к пожарной безопасности [1]. Сложная архитектурно-планировочная структура, обширные атриумы, многоуровневые пространства и большое количество посетителей создают значительные трудности для организации безопасной и своевременной эвакуации в случае возникновения пожара [2]. Статистика показывает, что основной причиной гибели людей на пожарах в ТРЦ является не непосредственное воздействие пламени, а отравление продуктами горения и паника, приводящая к неэффективной эвакуации [3].

Традиционные системы противопожарной защиты, включая автоматическую пожарную сигнализацию (АПС) и систему оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ), в основном носят реактивный характер и не учитывают динамику развития опасных факторов пожара (ОФП) [1, 4]. Статические планы эвакуации и заранее запрограммированные сценарии могут оказаться неэффективными при непредсказуемом распространении огня и дыма.

Современное развитие информационных технологий, таких как Интернет вещей (IoT), большие данные (Big Data) и цифровые двойники, открывает новые возможности для создания проактивных и адаптивных систем безопасности [1, 3, 4]. Ключевой задачей при этом является разработка адекватных математических моделей, позволяющих не только описывать, но и прогнозировать развитие ситуации в реальном времени [2, 4, 5].

Целью данного исследования является разработка и верификация математической модели интеллектуальной системы управления эвакуацией в ТРЦ, основанной на интеграции агентно-ориентированного моделирования поведения людей и математической модели распространения ОФП с алгоритмом динамической оптимизации потоков эвакуации.

Материалы и методы исследования

1. Концептуальная модель системы. Объект моделирования – условный ТРЦ, представленный в виде ориентированного графа $G=(V, E)$, где V – множество вершин (помещения, зоны, узлы), E – множество ребер (коридоры, дверные проемы, лестницы). Каждой вершине $v_i \in V$ ставится в соответствие параметр задымленности $S_i(t)$ и температуры $T_i(t)$. Каждому ребру $e_j \in E$ присваивается пропускная способность C_j и текущая загруженность $L_j(t)$.

2. Математическая модель распространения ОФП. Динамика задымленности и температуры в помещениях описывается системой дифференциальных уравнений, учитывающих перенос между смежными зонами и источники генерации, на основе классических подходов к прогнозированию [6]:

$$\frac{dS_i}{dt} = \alpha \sum_{j \in N(i)} (S_j - S_i) + Q_s(t) \cdot I_{fire}(v_i),$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \beta \sum_{j \in N(i)} (T_j - T_i) + Q_t(t) \cdot I_{fire}(v_i),$$

где $N(i)$ – множество вершин, смежных с v_i ;

α, β – коэффициенты турбулентного переноса и теплопередачи;

$Q_s(t), Q_i(t)$, – функции, описывающие интенсивность выделения дыма и тепла от очага пожара;

$I_{fire}(v_i)$ индикаторная функция, равная 1, если в зоне v_i находится очаг пожара.

3. Агентно-ориентированная модель эвакуации. Каждый посетитель ТРЦ моделируется как автономный агент A_k с набором атрибутов: координаты (x_k, y_k) , скорость движения v_k , уровень «паники» P_k , порог восприятия опасности D_k . Движение агента определяет правило:

$$\vec{v}_k(t+1) = (1 - P_k) \cdot \vec{U}_{route} + P_k \cdot \vec{U}_{panic} + \vec{\xi},$$

где \vec{U}_{route} – вектор направления, рекомендуемый системой динамической маршрутизации;

\vec{U}_{panic} – вектор, моделирующий хаотичное движение в состоянии паники;

$\vec{\xi}$ – случайная компонента, учитывающая индивидуальные отклонения.

4. Алгоритм динамической маршрутизации. На каждом шаге моделирования t для каждой вершины графа вычисляется стоимость прохода $Cost(v_i)$, зависящая от $S_i(t)$, $T_i(t)$ и $L_j(t)$ на исходящих ребрах. На основе алгоритма Дейкстры находится безопасный маршрут до ближайшего выхода, который передается агентам, находящимся в зоне влияния данной вершины. Система имитирует работу сети IoT-датчиков, предоставляющих данные для расчета $Cost(v_i)$ в реальном времени, что отражает принципы построения современных централизованных систем мониторинга [3].

Представим результаты исследования.

Для оценки эффективности предложенной модели был проведен вычислительный эксперимент. Моделировались два сценария развития пожара в ТРЦ общей площадью 25 000 квадратных метров с расчетным количеством посетителей 1500 человек (табл.).

Сценарий 1 (Базовый): Использование статической СОУЭ. Эвакуация происходит по заранее заданным и неизменным кратчайшим путям.

Сценарий 2 (Интеллектуальный): Работа предложенной системы с динамической маршрутизацией на основе реальных данных о распространении ОФП.

Таблица

Сравнительные результаты вычислительного эксперимента

Параметр	Сценарий 1 (Статический)	Сценарий 2 (Интеллектуальный)	Эффективность, %
Общее время эвакуации, сек.	720	504	-30.0 %
Доля людей, попавших в зоны с $S > S_{crit}$	22 %	7 %	-68.2 %
Доля людей, попавших в зоны с $T > T_{crit}$	18 %	5 %	-72.2 %
Коэффициент использования основного выхода	0.95	0.65	–

Анализ результатов (табл.) показал, что интеллектуальная система позволила существенно сократить время эвакуации за счет равномерного распределения потоков по всем доступным выходам и исключения маршрутов, ведущих через задымленные зоны.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности применения агентно-ориентированного моделирования в сочетании с динамической логикой принятия решений для задач управления эвакуацией. Сокращение времени эвакуации на 30 % является критически важным фактором, поскольку время является лимитирующим параметром при воздействии ОФП на человека.

Ключевым преимуществом предложенного подхода является его проактивность. Система не просто реагирует на срабатывание датчиков, а прогнозирует развитие ситуации и заблаговременно перенастраивает управляющие воздействия, что соответствует перспективному направлению создания активных систем поддержки принятия решений. Это позволяет избежать попадания людей в уже опасные зоны, а не выводить их оттуда.

Важным аспектом является учет психологического фактора («паники») в модели агентов. Это позволило получить более реалистичную картину поведения толпы и оценить, как интеллектуальная система может компенсировать деструктивные поведенческие паттерны за счет четких и своевременных инструкций, передаваемых через современные каналы связи [3].

Предложенная модель может служить ядром для создания цифрового двойника ТРЦ, используемого как для оперативного управления в чрезвычайной ситуации, так и для анализа рисков и планирования мероприятий по пожарной безопасности на этапе проектирования объекта, что является одним из ключевых применений информационных технологий в данной области [2, 7].

Заключение

Подведем итог результатам исследования.

1. Разработана математическая модель интеллектуальной системы обеспечения пожарной безопасности для ТРЦ, интегрирующая агентно-ориентированное моделирование эвакуации, дифференциальные уравнения распространения ОФП и алгоритм динамической маршрутизации.

2. Проведен вычислительный эксперимент, доказавший высокую эффективность предложенного подхода. Установлено, что внедрение интеллектуальной системы позволяет сократить расчетное время полной эвакуации на 25–30 % и снизить долю людей, подвергшихся воздействию критических ОФП, на 15–20 % по сравнению с традиционными статическими системами.

3. Показано, что применение новых информационных технологий, в частности, концепции цифрового двойника и алгоритмов динамической оптимизации, позволяет перейти от реактивного к проактивному управлению пожарной безопасностью на объектах с массовым пребыванием людей, что развивает идеи, заложенные в работах [1–3].

Результаты работы имеют практическую значимость для проектирования современных интегрированных систем безопасности ТРЦ и могут быть использованы для обоснования мероприятий по повышению их защищенности.

Список литературы

1. Белобородова О.И., Валиев Р.Р. Применение сквозных цифровых технологий для обеспечения пожарной безопасности // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов. 2023. С. 61–66.

2. Акимов В.А., Егоров В.М. Информационные технологии прогнозирования опасных факторов пожара // Проблемы и перспективы развития IT- и VR-технологий в области комплексной безопасности: сб. материалов III Всерос. науч.-практ. конф. 2024.

3. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие. М.: Академия ГПС МЧС России. 2000. 118 с.

4. Прогноз основных показателей пожарной опасности органических соединений с использованием дескрипторов и искусственных нейронных сетей / Королев Д.С. [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24. № 9. С. 32–38.

5. СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы (утв. приказом МЧС России от 19 марта 2020 г. № 194). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс»ю

6. Применение информационных технологий в сфере обеспечения пожаробезопасности / Захаров Г.В. [и др.] // Моделирование информационных систем. 2023. С. 167–171.

7. Ronchi E., Nilsson D. Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research // Fire Science Reviews. 2013. Vol. 2. No. 1. P. 7.

References

1. Beloborodova O.I., Valiev R.R. Primenenie skvoznyh cifrovyyh tekhnologiy dlya obespecheniya pozharnoj bezopasnosti // Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya inzhenernyh sistem obespecheniya pozharnoj bezopasnosti ob'ektov. 2023. S. 61–66.

2. Akimov V.A., Egorov V.M. Informacionnye tekhnologii prognozirovaniya opasnyh faktorov pozhara // Problemy i perspektivy razvitiya IT- i VR-tekhnologiy v oblasti kompleksnoj bezopasnosti: sb. materialov III Vseros. nauch.-prakt. konf. 2024.

3. Koshmarov YU.A. Prognozirovaniye opasnyh faktorov pozhara v pomeshchenii: ucheb. posobie. M.: Akademiya GPS MCHS Rossii. 2000. 118 s.

4. Prognoz osnovnyh pokazatelej pozharnoj opasnosti organicheskikh soedinenij s ispol'zovaniem deskriptorov i iskusstvennyh nejronnyh setej / Korolev D.S. [i dr.] // Pozharovzryvobezopasnost'. 2015. T. 24. № 9. S. 32–38.

5. СП 1.13130.2020. Sistemy protivopozharnoj zashchity. Evakuacionnye puti i vyhody (utv. prikazom MCHS Rossii ot 19 marta 2020 g. № 194). Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «KonsultantPlyus»yu

6. Primenenie informacionnyh tekhnologiy v sfere obespecheniya pozharobezopasnosti / Zaharov G.V. [i dr.] // Modelirovaniye informacionnyh sistem. 2023. S. 167–171.

7. Ronchi E., Nilsson D. Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research // Fire Science Reviews. 2013. Vol. 2. No. 1. P. 7.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 28.11.2025; одобрена после рецензирования: 12.02.2026; принята к публикации: 19.02.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 28.11.2025; approved after review: 12.02.2026; accepted for publication: 19.02.2026

Сведения об авторе или авторах

Соров Арсений Алексеевич, обучающийся факультета подготовки кадров высшей квалификации, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: djimil1@yandex.ru

Худеева Юлия Сергеевна, обучающийся факультета подготовки кадров высшей квалификации, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: yhs92@mail.ru

Бурмистрова Наталия Александровна, доцент кафедры высшей математики и системного моделирования сложных процессов, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат педагогических наук, доцент, e-mail: bur_na_a@mail.ru, SPIN-код: 7441-0553

Sorov Arseniy A., student of the faculty of advanced training of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovskiy ave., 149), e-mail: djimil1@yandex.ru

Khudeyeva Yulia S., student of the faculty of advanced training of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovskiy ave., 149), e-mail: yhs92@mail.ru

Burmistrova Natalia A., associate professor of the department of higher mathematics and system modeling of complex processes of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovskiy ave., 149), candidate of pedagogical sciences, associate professor, e-mail: bur_na_a@mail.ru, SPIN: 7441-0553