

Обзорная статья

УДК 614.8.084; DOI: 10.61260/2307-7476-2024-1-31-45

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРАХ: ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

✉ **Джафарова Анастасия Алексеевна.**

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

✉ nastyia300696@mail.ru

Аннотация. Представлен обзор литературы, в котором рассматриваются вопросы воздействия человеческого фактора на эвакуацию при пожарах. Представлена классификация факторов, оказывающих влияние на процесс эвакуации. Анализируются известные исследования влияния поведенческих факторов на процесс эвакуации при пожарах. Проведен обзор подходов к моделированию поведения человека в кризисных ситуациях. Исследовано влияние различных факторов на поведение эвакуирующихся на разных стадиях процесса эвакуации, роли лиц, принимающих решения при эвакуации.

Ключевые слова: эвакуация, моделирование, поведенческие факторы, уровни принятия решений

Для цитирования: Джафарова А.А. Исследование поведенческих факторов влияния на эффективность эвакуации при пожарах: обзор исследований // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2024. № 1 (49). С. 31–45. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-1-31-45.

Review article

INVESTIGATING OF BEHAVIORAL INFLUENCES ON FIRE EVACUATION EFFECTIVENESS: A REVIEW OF STUDIES

✉ **Dzhafarova Anastasiya A.**

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

✉ nastyia300696@mail.ru

Abstract. Presents a literature review that examines the impact of human factors on evacuation in fires. The classification of factors influencing the evacuation process is presented. The known studies on the influence of behavioral factors on the evacuation process in fires are analyzed. A review of approaches to modeling human behavior in crisis situations is carried out. The influence of various factors on the behavior of evacuees at different stages of the evacuation process, the role of decision makers in evacuation is studied.

Keywords: evacuation, modeling, behavioral factors, decision-making levels

For citation: Dzhafarova A.A. Investigating of behavioral influences on fire evacuation effectiveness: a review of studies // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2024. № 1 (49). P. 31–45. DOI: 10.61260/2307-7476-2024-1-31-45.

Введение

При эвакуации из зданий с массовым пребыванием людей во время пожаров характерна высокая степень неопределенности, в связи с чем требуется всестороннее изучение множества факторов, оказывающих влияние на данный процесс [1]. Естественно, что данные исследования проводятся с использованием методов моделирования [2]. С течением времени моделирование эвакуации развилось от простых моделей, не учитывающих поведенческие тенденции, к более сложным, которые потенциально могут представлять факторы, влияющие на поведение эвакуируемых и процесс принятия решений.

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2024

Тем не менее по-прежнему существует тенденция в применяемых на практике и рекомендованных к применению моделях к чрезмерному упрощению при моделировании эвакуации аспектов поведения людей. Это, как правило, делается для того, чтобы моделями эвакуации мог воспользоваться более широкий круг людей, но, в свою очередь, снижает точность результатов исследования. Таким образом, возникает следующая проблема: упрощенные модели не всегда точны, а точные модели сложны в использовании, поэтому применяются более узким кругом лиц.

Моделирование процесса эвакуации широко освещается в научной литературе, однако существующие методы не полностью учитывают влияние поведения людей на процессы эвакуации. В статье представлен обзор литературы, в котором рассматривается воздействие человеческого фактора на эвакуацию, анализируется влияние поведенческих факторов на процесс эвакуации при пожарах. Подробно обсуждается влияние различных факторов на поведение эвакуируемых на разных этапах процесса эвакуации, роль лиц, принимающих решения (ЛПР) при эвакуации в чрезвычайных ситуациях (ЧС).

Аналитическая часть

В различных исследованиях ранее рассматривались вопросы о том, влияют ли различные факторы на поведение эвакуирующихся в процессе эвакуации [3–5]. Эти исследования касаются различных ЧС и происшествий, а также поведенческих особенностей эвакуируемых. Стоит отметить, что общая классификация факторов, влияющих на поведение при эвакуации, отсутствует, поэтому представленная в данной статье классификация основана на обзоре различной информации из литературы, а также на трёх основных составляющих и объектах процесса эвакуации: опасности, ЛПР и эвакуирующихся. В табл. 1 представлена классификация факторов, связанных с поведением в процессе эвакуации, которые подразделяются на индивидуальные (относимые к эвакуирующимся), факторы окружающей среды и факторы воздействия (относимые к ЛПР).

Таблица 1

Классификация факторов, влияющих на процесс эвакуации

Категория основных факторов	Влияющие факторы	Индикаторы или описания
Индивидуальные	Социально-демографические	Пол, возраст, семейное положение, наличие детей, пожилых людей, лиц с ограниченными физическими возможностями
	Опыт	Опыт пребывания в стрессовой ситуации, опыт эвакуации, наличие паники
	Знания	Знание правил поведения при ЧС, при эвакуации, знание окружающей обстановки (помещений)
	Способности нарушения	Речь, зрение, слух, сила, мобильность, паника, опьянение и т.д.
Социальные	Социальные связи	Социальные связи между людьми (семьи, друзья и т.д.)
	Давка	Плотность людей в здании
Факторы окружающей среды	Наличие признаков ЧС или пожара	Дым, высокая температура, пламя и т.д.
	Особенности опасности	Временные (сроки, продолжительность, скорость наступления воздействия, длительность) и пространственные (место возникновения ЧС или пожара, путь, масштаб воздействия)

Категория основных факторов	Влияющие факторы	Индикаторы или описания
	Особенности объемно-планировочных решений здания	Факторы наличия препятствия (лестницы, дверные проемы, загроможденность или блокировка путей эвакуации, освещенность)
Факторы оперативного управления	Наличие ЛПП и их действия	Информирование, предупреждение, рекомендации, команды по эвакуации, оказание помощи при эвакуации (транспортировке), внедрение планов управления эвакуацией и т.д.
	Действия спасательных служб	Ликвидация опасности прибывшим пожарным расчетом, оказание помощи при эвакуации (транспортировка)
	Действия технических систем	Работоспособность систем дымоудаления и автоматизированных средств пожаротушения (АСП), системы оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ)

Среди индивидуальных факторов выделяются статические и социальные. Статические факторы неизменны в процессе эвакуации. Социальным характеристикам уделяется отдельное внимание, так как они играют значительную роль в формировании поведения эвакуируемых [6]. Проводимые ранее эмпирические исследования показали, что в ЧС люди с большей вероятностью объединяются друг с другом, а не действуют поодиночке [7].

Факторы окружающей среды подразделяются на: наличие признаков ЧС, особенности опасности, особенности здания и географического положения. Наличие признаков ЧС, таких как дым, высокая температура, пламя обычно побуждают эвакуирующихся к определенным действиям, часто начинающимся с поиска информации. Особенности опасности относятся как к временным (например, продолжительность, скорость наступления), так и к пространственным характеристикам (местоположение, путь, масштаб воздействия) соответствующей опасности. Особенности здания включают в себя факторы наличия препятствий (лестницы, дверные проемы, загроможденность или блокировка путей эвакуации, освещенность).

Также необходимо учитывать наличие факторов оперативного управления при эвакуации, учитывающих внешние воздействия ЛПП в процессе эвакуации. Здесь учитывается как оповещение эвакуируемых, так и непосредственно действия ЛПП (оказание помощи при эвакуации и т.д.), а также возможные действия прибывших спасательных служб и действия технических противопожарных систем (АСП, СОУЭ).

Как отмечено в работе [8], фундаментальные принципы, раскрывающие поведение людей на различных этапах процесса эвакуации, имеют решающее значение для планов эвакуации. Знание того, как факторы влияют на поведение эвакуирующихся и, следовательно, на действия при эвакуации, может помочь исследователям реалистично представлять поведенческие аспекты для последующего моделирования и принимать решения в процессе управления эвакуацией.

В табл. 2 представлены последние исследования о влиянии каждой категории факторов, сгруппированных по конкретным процессам принятия решений / поведению, на которые они влияют.

В этих исследованиях подробно описывается, как выявленные факторы влияют на поведение или действия при эвакуации в контексте каждого отдельного исследования.

Среди исследований на этапе «перед эвакуацией» значительную роль играет область поведенческих наук, связанная с психологической реакцией человека на неизбежные ЧС и принятием решений в условиях ограниченности времени. Эвакуирующиеся обычно

занимаются поиском информации на этапе «распознавания опасности». Поиск информации относится к процессу, посредством которого люди собираются вместе, чтобы оценить ситуацию, предложить и предпринять скоординированные действия для поиска решения [9]. Впоследствии, на этапе «оценки и подготовки» они выполняют действия, предшествующие эвакуации, и решают, эвакуироваться или нет в зависимости от достоверности полученной информации.

Таблица 2

Классификация исследований по видам воздействующих на эвакуацию факторов

Класс факторов	Этап подготовки к эвакуации			Этап эвакуации
	этап идентификации опасности	этап оценки ситуации и подготовки к эвакуации		этап эвакуации
	поиск и обработка информации	действия перед эвакуацией	принятие решений об эвакуации	поиск пути / маршрута, особенности движения
Социально-демографические	Спенс и др. [10]; Чжао и др. [11]	Зинке и др. [12]	Лим и др. [17]	
Основанные на опыте		Зинке и др. [12]		
Знания		Зинке и др. [12]; Бодде и Кодлинг [13]	Лим и др. [17]	Кинатедер и др. [18]
Способности / нарушения		Зинке и др. [12]		Самошин [19]; Холщевников и др. [20]; Коткова и Матвеев [21]
Социальные связи		Агирре и др. [14]		Хелбинг [22]; Болбин и Митягин [23]
Наличие признаков ЧС или пожара	Чжао и др. [11]	Бодде и Кодлинг [13]; Кулиговски и Милети [15]		Самарцев и Иващенко [24]
Особенности опасности		Коткова [16]	Лим и др. [17]	Коткова и Матвеев [21]
Особенности объемно-планировочных решений здания	Чжао и др. [11]	Кулиговски и Милети [15]		Ма и др. [25]
Наличие ЛПП и их действия			Агирре и др. [13]; Лим и др. [17]	Акопов и Бекларян [26]

Процесс эвакуации инициируется получившими информацию относительно существующей опасности. В табл. 1 показана значительная роль индивидуальных факторов, влияющих на поиск информации и процесс перемещения в безопасную зону, включая социально-демографические факторы [27], а также опыт и знания [28].

По сравнению с предыдущим процессом, то есть распознаванием информации, этап оценки и подготовки включает в себя больше переменных из области социально-психологических исследований. На действия перед эвакуацией (например, поиск друзей, родственников) влияют социальные отношения [29]. Зачастую это приводит к замедлению эвакуации.

В ходе большого количества эмпирических исследований изучалось, как люди принимают решения во время эвакуации, включая моделирование эвакуации толпы, моделирование выбора выхода (внутри здания) при эвакуации пешеходов.

Baker E.J. [30] пришел к выводу, что принятие решения об эвакуации определяют пять факторов: уровень риска в том или ином месте, уведомления и действия руководителей процессов эвакуации, тип здания, личное восприятие опасности и особенности ЧС. Используя заключения E.J. Baker в качестве основы для дальнейших гипотез, был проведен ряд исследований для оценки различных факторов, влияющих на решения, связанные с эвакуацией, и взаимосвязи между ними. Результаты в основном согласуются с E.J. Baker и предполагают, что оповещение, наличие признаков ЧС и опасности являются основополагающими факторами при принятии решений об эвакуации, тогда как влияние других факторов варьируется от исследования к исследованию.

Одним из наиболее изучаемых вопросов в литературе по принятию решений в процессе эвакуации является то, насколько эвакуирующиеся учитывают рекомендации и указания ЛПР. Соблюдение требований играет ключевую роль в успехе эвакуации. Руководящие действия ЛПР, как правило, являются одним из наиболее существенных факторов, определяющих поведение людей в процессе эвакуации, однако немаловажно и восприятие эвакуируемыми компетентности ЛПР [8].

Для эвакуирующихся этап подготовки к эвакуации заканчивается, когда они непосредственно начинают движение. Важно упомянуть, что процесс перемещения в безопасную зону может быть начат не сразу после принятия решения о необходимости эвакуации, а позже, ввиду различных обстоятельств [29, 30]. Стоит отметить, что социальные связи играют важную роль при осуществлении процесса эвакуации, выборе пути и определении маршрута. В работе [18] указано, что люди имеют тенденцию покидать здание через известный им выход, используя знакомые маршруты [31, 32].

Кроме того, для оценки времени эвакуации следует учитывать факторы окружающей среды, но существует относительно мало эмпирических данных о влиянии этих факторов на выбор маршрута перемещения. Характеристики движения эвакуирующихся также играют роль в процессе эвакуации (например, скорость). Отдельно стоит отметить возможность нахождения людей в состоянии алкогольного опьянения. В работе [33] определен возраст, количество людей в помещении и геометрические характеристики маршрута эвакуации как наиболее статистически значимые факторы, однако выводы относительно влияния возраста не являются окончательными и требуются дополнительные исследования.

Анализируя различные исследования в области изучения процесса эвакуации, можно отметить необходимость проведения дальнейшей работы по выявлению факторов, оказывающих влияние на процесс эвакуации, и учёту взаимодействия этих факторов [34]. При моделировании эвакуации для конкретного случая такие связи должны быть рассмотрены с точки зрения значимости именно в рассматриваемой ситуации.

Для исследования процесса моделирования эвакуации используется комплексная структура, состоящая из трех общих уровней принятия решений (стратегический, тактический, оперативный). Эвакуирующиеся сначала решают, что делать (и порядок или сроки этих действий) на стратегическом уровне принятия решений. Далее идет тактический уровень, он касается ряда последующих решений, включая выбор направления движения, выхода, маршрута и т.д. Наконец, оперативный уровень, который описывает поведение при движении, такое как избежание столкновений и опасностей на пути в безопасную зону. Такой подход к поведению эвакуирующихся, обобщенный в табл. 3, получил широкое освещение в литературе по моделированию эвакуации толпы.

Моделирование поведения человека с точки зрения уровней принятия решений

Уровень принятия решений	Стратегический	Тактический	Оперативный
Решения	«что делать», «выбор действия» (например, когда начинать действие, помогать другим или нет)	«куда идти» (например, выбор маршрута или выхода)	действия «как добраться до цели» (например, недопущение столкновений)
Область применения модели	выбор схемы действий, выбор времени отправления	выбор выхода, маршрута, пункта назначения	поведение при движении в безопасную зону

Традиционно моделирование процесса эвакуации осуществляется на оперативном уровне принятия решений. Стратегический и тактический уровни, как правило, выходят за рамки привычного моделирования, так как на этих уровнях речь больше идёт о принятии решений, нежели об эвакуации как физическом процессе.

Многие ученые, в том числе Сантос Г. и Агирре Б.Е [35]; Чжэн Х и др. [36]; Рончи Е. и Нильссон Д. [37]; Хелбинг Д. и др. [22]; Самошин Д.А. [19]; Холщевников В.В и др. [20] рассмотрели множество моделей движения толпы, заложенных в методическую основу для разработки инструментов моделирования эвакуации из зданий.

Далее рассмотрены подходы к моделированию эвакуации с акцентом на возможность учета процессов принятия решений.

Модели для принятия решений стратегического уровня

Решения, принимаемые на стратегическом уровне (табл. 4), особенно связаны с фазой подготовки к эвакуации, когда эвакуирующиеся занимаются поиском информации и выполняют различные предэвакуационные действия (сбор вещей, поиск друзей или родственников, общение с окружающими людьми на предмет случившегося).

Таблица 4

Моделирование на стратегическом уровне

	Эвакуация людей
Первичные решения	Действия перед эвакуацией (например, поиск информации, родственников и т.д.), необходимость эвакуации, время начала эвакуации
Прикладные модели	Модель оценки времени до эвакуации
Подходы к моделированию	Эмпирические данные. Множественный регрессионный анализ
Рассмотрены влияющие факторы	Индивидуальные факторы (статические). Факторы окружающей среды. Факторы воздействия ЛПР и технических средств

При моделировании эвакуации людей из зданий, несмотря на сложность детального прогнозирования поведения каждого человека в отдельности, время до начала движения в безопасную зону поддается прогнозированию и количественному описанию [38]. На сегодняшний день для оценки времени до эвакуации из зданий использовались по меньшей мере три подхода.

Первый подход выражает оценки в виде средних значений, полученных на основе эмпирических данных. Однако полученные значения демонстрируют большой разброс в зависимости от типа здания и его предназначения, поэтому такие оценки были

проанализированы с использованием временных и вероятностных распределений [39, 40]. Для этого подхода используется набор сценариев, связанных в основном с факторами окружающей среды, такими как тип здания, системы оповещения, состояние людей. Несмотря на отсутствие чёткого представления о поведении эвакуируемых, этот подход обеспечивает довольно простой метод оценки времени до эвакуации и широко используется. Также отмечается, что дополнительное усложнение подобных моделей может не дать существенно отличающихся результатов [41]. Тем не менее для всего спектра возможных сценариев требуется обширная база данных [42].

Второй подход использует более продвинутый регрессионный статистический анализ для повышения прогностических возможностей. Кулиговски Е.Д. и Милети Д.С. [15], а также Шерман М.Ф. и др. [43] использовали линейную регрессию (или метод анализа пути) для изучения индивидуальных факторов и факторов окружающей среды, которые могли повлиять на действия людей перед эвакуацией.

Помимо традиционных линейных и полиномиальных методов прогнозирования с несколькими переменными в работе [44] предложен альтернативный подход, основанный на искусственной нейронной сети для моделирования поведения человека при пожаре.

Третий подход использует модели на основе когнитивного подхода. Такие модели строятся в основном на поведенческих допущениях и теориях. Динамический процесс принятия решений, определяемый множеством поведенческих состояний (например, поиск информации, эвакуация), и переходы между ними основаны на заранее определённом пороге восприятия риска [45]. Такие модели обладают большим потенциалом для реализации в качестве подмодели для включения информационных процессов и возможных действий ЛПР в существующие модели эвакуации на основе агентов [46]. Однако текущие исследования в большей степени сосредоточены на разработке концептуальных моделей из-за трудности сбора данных о когнитивных характеристиках человека.

Модели для принятия решений на тактическом уровне

Моделирование эвакуации на тактическом уровне охватывает множество аспектов, представленных в табл. 5, включая моделирование выбора определённого выхода из здания и т.д.

Таблица 5

Моделирование на тактическом уровне

	Эвакуация людей
Первичные решения	Поиск пути (к выходу)
Прикладные модели	Модель выбора выхода
Подход к моделированию	Подход теории игр. Метод дискретного выбора
Рассмотрены влияющие факторы	Индивидуальные факторы. Факторы окружающей среды. Факторы воздействия ЛПР и технических средств

Наиболее часто используемым подходом к моделированию является метод дискретного выбора, который основан на определенных поведенческих совокупностях (например, теория ожидаемой полезности, теория перспектив, ограниченная рациональность). Тем не менее проблема по-прежнему заключается в неполной картине поведенческих аспектов принятия решений. Как отмечено в работе [47], знания о реальном поведении людей в различных сценариях эвакуации, основанные на эмпирических данных, все еще ограничены. Это препятствует разработке теоретически простых моделей принятия решений на тактическом уровне, которые могут быть встроены в оперативный уровень моделирования (то есть в модели эвакуации).

В качестве альтернативы в работах [48–50] использована теория игр для рационализации взаимодействия между эвакуирующимися при принятии ими решений. Учитывается влияние индивидуальных факторов (например, знаний), а также факторов окружающей среды (например, наличия опасных факторов пожара). Однако точность этой модели принятия решений варьируется в зависимости от количества моделируемых игроков (то есть эвакуирующихся), и ее вычислительные возможности ограничены.

Модели для принятия решений на тактическом уровне

Основные аспекты моделирования эвакуации на оперативном уровне представлены в табл. 6.

Таблица 6

Моделирование на оперативном уровне

	Эвакуация людей
Первичные решения	Изменение скорости. Предотвращение столкновений
Прикладные модели	Модель движения толпы / агента
Подходы к моделированию	Макромодель. Модель социальных сил (микро). Модель клеточных автоматов (микро)
Рассмотрены влияющие факторы	Индивидуальные факторы. Факторы окружающей среды. Факторы воздействия ЛППР и технических средств

Макроскопическая модель эвакуации, как правило, использует гидродинамические аналоги для оценки количественных соотношений скорости и плотности толпы [51]. Стратегические и тактические уровни принятия решений практически не могут быть учтены в данной модели. Такой подход не может учитывать поведение отдельных людей, но может воспроизводить коллективные явления толпы [52].

Напротив, модель клеточных автоматов и модель социальных сил являются микроскопическими, они способны отражать поведение толпы посредством учёта поведения отдельных людей. Модель социальной силы разработана Д. Хелбингом, в ней движение человека описывается с помощью различных сил. В последнее время ряд исследований позволил усовершенствовать механизм функционирования модели социальной силы толпы, принимая во внимание возможность наличия лидера [53], распространение информации [54].

В моделях клеточных автоматов решение человека о передвижении в безопасную зону зависит от ряда факторов окружающей среды. Кроме того, модели клеточных автоматов были интегрированы в моделирование стратегического и тактического уровня принятия решений, такое как выбор выхода [55] и определение пути [56], для более точного прогнозирования поведения при перемещении в безопасную зону.

Еще к отдельному классу можно отнести модели, учитывающие применение различных технических средств, например, средств самоспасания с высоты [57, 58].

Заключение

Таким образом, моделирование процесса эвакуации широко освещается в научной литературе, однако существующие методы не полностью учитывают влияние поведения людей на процессы эвакуации. В данной статье представлен обзор литературы, в котором рассматривается воздействие человеческого фактора на эвакуацию. Подробно обсуждается влияние различных факторов на поведение эвакуируемых на разных этапах процесса эвакуации.

Несмотря на множество исследований в рассматриваемой области, они беспрерывно продолжаются. Недостаток данных о поведении людей и ограниченная возможность их внедрения в процесс моделирования остаются серьезными препятствиями к получению достоверных результатов моделирования. Модели эвакуации могут иметь большую ценность для их практического применения, планирования стратегии эвакуации и выработки соответствующих решений только в том случае, если они в полной мере адекватны, обладают прогностической достоверностью, которая неразрывно связана с эмпирическими исследованиями эвакуации, учетом всех существенных факторов, оказывающих влияние на процесс эвакуации.

Список источников

1. Агентное моделирование процесса эвакуации людей при пожарах в зданиях: обзор подходов и исследований / Е.А. Коткова [и др.] // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 10. С. 55–62. DOI: 10.17513/snt.39791. EDN CZHEJY.
2. Матвеев А.В. Методы моделирования и прогнозирования. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2022. 230 с. ISBN 978-5-907116-73-3. EDN IMLKWS.
3. Задурова А.А. Выявление критериев безопасной эвакуации и влияние на них поражающих факторов, вызываемых различными источниками опасности // Теоретические и прикладные вопросы комплексной безопасности: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: Петровская акад. наук и искусств, 2019. С. 70–77. EDN QGWNNZ.
4. Задурова А.А., Джафаров Э.А. Модели и теории поведения человека / группы людей при пожарах в местах с массовым пребыванием людей на примере ночного клуба // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Современные методы и технологии предупреждения и профилактики возникновения чрезвычайных ситуаций: материалы XI Всерос. науч.-практ. конф. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2019. С. 271–273. EDN DNQEKG.
5. Задурова А.А. Моделирование эвакуации при пожаре в ночном клубе на основе байесовской сети // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петербург. ун-та ГПС МЧС России». 2022. № 2. С. 154–162. EDN MVPNKV.
6. Hofinger G., Zinke R., Künzer L. Human factors in evacuation simulation, planning, and guidance // Transportation Research Procedia. 2014. Vol. 2. P. 603–611.
7. Cornwell B. Bonded fatalities: Relational and ecological dimensions of a fire evacuation // The Sociological Quarterly. 2003. Vol. 44. № 4. P. 617–638.
8. Large-scale evacuation: The analysis, modeling, and management of emergency relocation from hazardous areas / M.K. Lindell [et al.]. CRC Press, 2018.
9. Kuligowski E. Predicting human behavior during fires // Fire technology. 2013. Vol. 49. P. 101–120.
10. Gender and age effects on information-seeking after 9/11 / P.R. Spence [et al.] // Communication Research Reports. 2006. Vol. 23. № 3. P. 217–223.
11. A post-fire survey on the pre-evacuation human behavior / C.M. Zhao [et al.] // Fire Technology. 2009. Vol. 45. P. 71–95.
12. Zinke R., Hofinger G., Künzer L. Psychological aspects of human dynamics in underground evacuation: Field experiments // Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012. Springer International Publishing, 2014. P. 1149–1162.
13. Bode N.W.F., Codling E.A. Exploring determinants of pre-movement delays in a virtual crowd evacuation experiment // Fire technology. 2019. Vol. 55. № 2. P. 595–615.
14. Normative collective behavior in the station building fire / B.E. Aguirre [et al.] // Social science quarterly. 2011. Vol. 92. № 1. P. 100–118.
15. Kuligowski E.D., Mileti D.S. Modeling pre-evacuation delay by occupants in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001 // Fire Safety Journal. 2009. Vol. 44. № 4. P. 487–496.

16. 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. EDN UBIKMZ.
17. A household-level flood evacuation decision model in Quezon City, Philippines / M.B.B. Lim [et al.] // Natural Hazards. 2016. Vol. 80. P. 1539–1561.
18. Kinateder M., Comunale B., Warren W.H. Exit choice in an emergency evacuation scenario is influenced by exit familiarity and neighbor behavior // Safety science. 2018. Vol. 106. P. 170–175.
19. Самошин Д.А. Состав людских потоков и параметры их движения при эвакуации. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2016. 210 с. ISBN 978-5-9229-0138-3. EDN CZPZHE.
20. Общая закономерность изменения параметров движения людских потоков различного функционального контингента в зданиях и сооружениях / В.В. Холщевников [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20. № 12. С. 32–41. EDN ONZEMB.
21. 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 (104). С. 231–243. EDN LGEVSX.
22. Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions / D. Helbing [et al.] // Transportation science. 2005. Vol. 39. № 1. P. 1–24. DOI: 10.1287/trsc.1040.0108.
23. 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. EDN PYAMWL.
24. 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. EDN XWERBJ.
25. Experimental study on an ultra high-rise building evacuation in China / J. Ma [et al.] // Safety science. 2012. Vol. 50. № 8. P. 1665–1674.
26. Акопов А.С., Бекларян Л.А. Агентная модель поведения толпы при чрезвычайных ситуациях // Автоматика и телемеханика. 2015. № 10. С. 131–143. EDN UXGNQB.
27. Spence P.R., Lachlan K.A., Griffin D.R. Crisis communication, race, and natural disasters // Journal of Black Studies. 2007. Vol. 37. № 4. P. 539–554.
28. Lindell M.K., Perry R.W. Communicating environmental risk in multiethnic communities. Sage publications, 2003.
29. Gu Q., Mendonca D., Wu D. An exploration of information-seeking behavior in emergency management // SMC'03 Conference Proceedings: 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme-System Security and Assurance. IEEE, 2003. Vol. 2. P. 1798–1803.
30. Baker E.J. Hurricane evacuation behavior // International Journal of Mass Emergencies & Disasters. 1991. Vol. 9. № 2. P. 287–310.
31. Wu H.C., Lindell M.K., Prater C.S. Logistics of hurricane evacuation in Hurricanes Katrina and Rita // Transportation research part F: traffic psychology and behaviour. 2012. Vol. 15. № 4. P. 445–461.
32. Deka D., Carnegie J. Analyzing evacuation behavior of transportation-disadvantaged populations in northern New Jersey // Proc. Annual Meeting of Transportation Research Board. 2010. № 10-1584.
33. Development of statistical models for improving efficiency of emergency evacuation in areas with vulnerable population / M.A. Dulebenets [et al.] // Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 182. P. 233–249.
34. The effects of past hurricane experiences on evacuation intentions through risk perception and efficacy beliefs: A mediation analysis / J.L. Demuth [et al.] // Weather, Climate, and Society. 2016. Vol. 8. № 4. P. 327–344.
35. Santos G., Aguirre B.E. A critical review of emergency evacuation simulation models. Preliminary Paper . University of Delaware Disaster Research Center, 2004.

36. Zheng X., Zhong T., Liu M. Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches // *Building and environment*. 2009. Vol. 44. № 3. P. 437–445.
37. Ronchi E., Nilsson D. Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research // *Fire science reviews*. 2013. Vol. 2. P. 1–21.
38. Purser D.A., Bensilum M. Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations // *Safety science*. 2001. Vol. 38. № 2. P. 157–182.
39. D’Orazio M., Bernardini G. An experimental study on the correlation between «attachment to belongings» «pre-movement» time // *Pedestrian and evacuation dynamics 2012*. Springer International Publishing, 2014. P. 167–178.
40. Guanquan C., Jinhua S. The effect of pre-movement time and occupant density on evacuation time // *Journal of fire sciences*. 2006. Vol. 24. № 3. P. 237–259.
41. Bensilum M., Purser D.A. Gridflow: an object-oriented building evacuation model combining pre-movement and movement behaviours for performance-based design // *Worcester: International Association for Fire Safety Science: 7th International Symposium on Fire Safety Science*. 2002. P. 941–952.
42. Developing a database for emergency evacuation model / L. Shi [et al.] // *Building and Environment*. 2009. Vol. 44. № 8. P. 1724–1729.
43. Modeling pre-evacuation delay by evacuees in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001: A revisit using regression analysis / M.F. Sherman [et al.] // *Fire Safety Journal*. 2011. Vol. 46. № 7. P. 414–424.
44. Liu M., Lo S.M. The quantitative investigation on people's pre-evacuation behavior under fire // *Automation in construction*. 2011. Vol. 20. № 5. P. 620–628.
45. Lovreglio R., Ronchi E., Nilsson D. A model of the decision-making process during pre-evacuation // *Fire Safety Journal*. 2015. Vol. 78. P. 168–179.
46. Viswanathan V., Lees M. An information processing based model of pre-evacuation behavior for agent based egress simulation // *Pedestrian and evacuation dynamics 2012*. Springer International Publishing, 2014. P. 125–133.
47. Haghani M., Sarvi M. Human exit choice in crowded built environments: Investigating underlying behavioural differences between normal egress and emergency evacuations // *Fire Safety Journal*. 2016. Vol. 85. P. 1–9.
48. A game theory based exit selection model for evacuation / S.M. Lo [et al.] // *Fire Safety Journal*. 2006. Vol. 41. № 5. P. 364–369.
49. Game theoretic best-response dynamics for evacuees' exit selection / H. Ehtamo [et al.] // *Advances in Complex Systems*. 2010. Vol. 13. № 1. P. 113–134.
50. Mesmer B.L., Bloebaum C.L. Incorporation of decision, game, and Bayesian game theory in an emergency evacuation exit decision model // *Fire Safety Journal*. 2014. Vol. 67. P. 121–134.
51. Hughes R.L. A continuum theory for the flow of pedestrians // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2002. Vol. 36. № 6. P. 507–535.
52. Colombo R.M., Rosini M.D. Pedestrian flows and non-classical shocks // *Mathematical methods in the applied sciences*. 2005. Vol. 28. № 13. P. 1553–1567.
53. A social force evacuation model with the leadership effect / L. Hou [et al.] // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2014. Vol. 400. P. 93–99.
54. Han Y., Liu H. Modified social force model based on information transmission toward crowd evacuation simulation // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2017. Vol. 469. P. 499–509.
55. Huang H.J., Guo R.Y. Static floor field and exit choice for pedestrian evacuation in rooms with internal obstacles and multiple exits // *Physical Review E*. 2008. Vol. 78. № 2. P. 021131.
56. Kneidl A., Hartmann D., Borrmann A. A hybrid multi-scale approach for simulation of pedestrian dynamics // *Transportation research part C: emerging technologies*. 2013. Vol. 37. P. 223–237.

57. Матвеев А.В., Ефремов С.В. Модель процесса аварийной эвакуации из здания в случае пожара при нестационарном потоке людей // *Безопасность жизнедеятельности*. 2013. № 2 (146). С. 46–50. EDN PVOZKT.

58. Иванов М.В., Матвеев А.В. Критерий эффективности управления пожарным риском при использовании средств аварийной эвакуации // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2011. № 6-2 (138). С. 165–170. EDN OZAHHL.

References

1. Agentnoe modelirovanie processa evakuacii lyudej pri pozharah v zdaniyah: obzor podhoda i issledovanij / E.A. Kotkova [i dr.] // *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2023. № 10. S. 55–62. DOI: 10.17513/snt.39791. EDN CZHEJY.

2. Matveev A.V. *Metody modelirovaniya i prognozirovaniya*. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2022. 230 s. ISBN 978-5-907116-73-3. EDN IMLKWS.

3. Zadurova A.A. Vyyavlenie kriteriev bezopasnoj evakuacii i vliyanie na nih porazhayushchih faktorov, vyzyvayemyh razlichnymi istochnikami opasnosti // *Teoreticheskie i prikladnye voprosy kompleksnoj bezopasnosti: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. SPb. Petrovskaya akademiya nauk i iskusstv*, 2019. S. 70–77. EDN QGWNNZ.

4. Zadurova A.A., Dzhafarov E.A. Modeli i teorii povedeniya cheloveka / gruppy lyudej pri pozharah v mestah s massovym prebyvaniiem lyudej na primere nochnogo kluba // *Servis bezopasnosti v Rossii: opyt, problemy, perspektivy. Sovremennye metody i tekhnologii preduprezhdeniya i profilaktiki vozniknoveniya chrezvychajnyh situacij: materialy XI Vseros. nauch.-prakt. konf. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii*, 2019. S. 271–273. EDN DNQKEG.

5. Zadurova A.A. Modelirovanie evakuacii pri pozhare v nochnom klube na osnove bajesovskoj seti // *Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii»*. 2022. № 2. S. 154–162. EDN MVPNKV.

6. Hofinger G., Zinke R., Künzer L. Human factors in evacuation simulation, planning and guidance // *Transportation Research Procedia*. 2014. Vol. 2. P. 603–611.

7. Cornwell B. Bonded fatalities: Relational and ecological dimensions of a fire evacuation // *The Sociological Quarterly*. 2003. Vol. 44. № 4. P. 617–638.

8. Large-scale evacuation: The analysis, modeling, and management of emergency relocation from hazardous areas / M.K. Lindell [et al.]. CRC Press, 2018.

9. Kuligowski E. Predicting human behavior during fires // *Fire technology*. 2013. Vol. 49. P. 101–120.

10. Gender and age effects on information-seeking after 9/11 / P.R. Spence [et al.] // *Communication Research Reports*. 2006. Vol. 23. № 3. P. 217–223.

11. A post-fire survey on the pre-evacuation human behavior / C.M. Zhao [et al.] // *Fire Technology*. 2009. Vol. 45. P. 71–95.

12. Zinke R., Hofinger G., Künzer L. Psychological aspects of human dynamics in underground evacuation: Field experiments // *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012*. Springer International Publishing, 2014. P. 1149–1162.

13. Bode N.W.F., Codling E.A. Exploring determinants of pre-movement delays in a virtual crowd evacuation experiment // *Fire technology*. 2019. Vol. 55. № 2. P. 595–615.

14. Normative collective behavior in the station building fire / B.E. Aguirre [et al.] // *Social science quarterly*. 2011. Vol. 92. № 1. P. 100–118.

15. Kuligowski E.D., Mileti D.S. Modeling pre-evacuation delay by occupants in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001 // *Fire Safety Journal*. 2009. Vol. 44. № 4. P. 487–496.

16. Kotkova E.A. Model' nejronnoj seti dlya prognozirovaniya predevakuacionnogo povedeniya lyudej pri pozhare // *Nacional'naya bezopasnost' i strategicheskoe planirovanie*. 2022. № 2 (38). S. 66–72. DOI: 10.37468/2307-1400-2022-2-66-72. EDN UBIKMZ.

17. A household-level flood evacuation decision model in Quezon City, Philippines / M.B.B. Lim [et al.] // *Natural Hazards*. 2016. Vol. 80. P. 1539–1561.
18. Kinateder M., Comunale B., Warren W.H. Exit choice in an emergency evacuation scenario is influenced by exit familiarity and neighbor behavior // *Safety science*. 2018. Vol. 106. P. 170–175.
19. Samoshin D.A. Sostav lyudskih potokov i parametry ih dvizheniya pri evakuacii. M.: Akad. GPS MCHS Rossii, 2016. 210 s. ISBN 978-5-9229-0138-3. EDN CZPZHE.
20. Obshchaya zakonomernost' izmeneniya parametrov dvizheniya lyudskih potokov razlichnogo funkcional'nogo kontingenta v zdaniyah i sooruzheniyah / V.V. Holshchevnikov [i dr.] // *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2011. T. 20. № 12. S. 32–41. EDN ONZEMB.
21. Kotkova E.A., Matveev A.V. Metod ocenki effektivnosti organizacii evakuacii lyudej iz obshchestvennogo zdaniya pri pozhare s ispol'zovaniem agentno-orientirovannogo podhoda // *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2023. № 8 (104). S. 231–243. EDN LGEVSX.
22. Self-organized pedestrian crowd dynamics: Experiments, simulations, and design solutions / D. Helbing [et al.] // *Transportation science*. 2005. Vol. 39. № 1. P. 1–24. DOI: 10.1287/trsc.1040.0108.
23. Bolbin S.N., Mityagin S.A., Zaharov Yu.N. Modelirovanie evakuacii pri ogranichenii v prostranstve s uchetom social'nyh svyazey mezhdru lyud'mi // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta MVD Rossii*. 2012. № 4 (56). S. 268–272. EDN PYAMWL.
24. Samarcev A.A., Ivashchenko V.A. Sovmestnoe modelirovanie rasprostraneniya opasnykh faktorov pozhara i evakuacii lyudej iz pomeshchenij // *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah MMTT*. 2018. T. 1. S. 96–98. EDN XWERBJ.
25. Experimental study on an ultra high-rise building evacuation in China / J. Ma [et al.] // *Safety science*. 2012. Vol. 50. № 8. P. 1665–1674.
26. Akopov A.S., Beklaryan L.A. Agentnaya model' povedeniya tolpy pri chrezvychajnykh situaciyah // *Avtomatika i telemekhanika*. 2015. № 10. S. 131–143. EDN UXGNQB.
27. Spence P.R., Lachlan K.A., Griffin D.R. Crisis communication, race, and natural disasters // *Journal of Black Studies*. 2007. Vol. 37. № 4. P. 539–554.
28. Lindell M.K., Perry R.W. Communicating environmental risk in multiethnic communities. Sage publications, 2003.
29. Gu Q., Mendonca D., Wu D. An exploration of information-seeking behavior in emergency management // *SMC'03 Conference Proceedings: 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme-System Security and Assurance*. IEEE, 2003. Vol. 2. P. 1798–1803.
30. Baker E.J. Hurricane evacuation behavior // *International Journal of Mass Emergencies & Disasters*. 1991. Vol. 9. № 2. P. 287–310.
31. Wu H.C., Lindell M.K., Prater C.S. Logistics of hurricane evacuation in Hurricanes Katrina and Rita // *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*. 2012. Vol. 15. № 4. P. 445–461.
32. Deka D., Carnegie J. Analyzing evacuation behavior of transportation-disadvantaged populations in northern New Jersey // *Proc. Annual Meeting of Transportation Research Board*. 2010. № 10-1584.
33. Development of statistical models for improving efficiency of emergency evacuation in areas with vulnerable population / M.A. Dulebenets [et al.] // *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. Vol. 182. P. 233–249.
34. The effects of past hurricane experiences on evacuation intentions through risk perception and efficacy beliefs: A mediation analysis / J.L. Demuth [et al.] // *Weather, Climate and Society*. 2016. Vol. 8. № 4. P. 327–344.
35. Santos G., Aguirre B.E. A critical review of emergency evacuation simulation models. Preliminary Paper . University of Delaware Disaster Research Center, 2004.
36. Zheng X., Zhong T., Liu M. Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches // *Building and environment*. 2009. Vol. 44. № 3. P. 437–445.
37. Ronchi E., Nilsson D. Fire evacuation in high-rise buildings: a review of human behaviour and modelling research // *Fire science reviews*. 2013. Vol. 2. P. 1–21.

38. Purser D.A., Bensilum M. Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations // *Safety science*. 2001. Vol. 38. № 2. P. 157–182.
39. D’Orazio M., Bernardini G. An experimental study on the correlation between «attachment to belongings» «pre-movement» time // *Pedestrian and evacuation dynamics 2012*. Springer International Publishing, 2014. P. 167–178.
40. Guanquan C., Jinhua S. The effect of pre-movement time and occupant density on evacuation time // *Journal of fire sciences*. 2006. Vol. 24. № 3. P. 237–259.
41. Bensilum M., Purser D.A. Gridflow: an object-oriented building evacuation model combining pre-movement and movement behaviours for performance-based design // *Worcester: International Association for Fire Safety Science: 7th International Symposium on Fire Safety Science*. 2002. P. 941–952.
42. Developing a database for emergency evacuation model / L. Shi [et al.] // *Building and Environment*. 2009. Vol. 44. № 8. P. 1724–1729.
43. Modeling pre-evacuation delay by evacuees in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001: A revisit using regression analysis / M.F. Sherman [et al.] // *Fire Safety Journal*. 2011. Vol. 46. № 7. P. 414–424.
44. Liu M., Lo S.M. The quantitative investigation on people's pre-evacuation behavior under fire // *Automation in construction*. 2011. Vol. 20. № 5. P. 620–628.
45. Lovreglio R., Ronchi E., Nilsson D.A model of the decision-making process during pre-evacuation // *Fire Safety Journal*. 2015. Vol. 78. P. 168–179.
46. Viswanathan V., Lees M. An information processing based model of pre-evacuation behavior for agent based egress simulation // *Pedestrian and evacuation dynamics 2012*. Springer International Publishing, 2014. P. 125–133.
47. Haghani M., Sarvi M. Human exit choice in crowded built environments: Investigating underlying behavioural differences between normal egress and emergency evacuations // *Fire Safety Journal*. 2016. Vol. 85. P. 1–9.
48. A game theory based exit selection model for evacuation / S.M. Lo [et al.] // *Fire Safety Journal*. 2006. Vol. 41. № 5. P. 364–369.
49. Game theoretic best-response dynamics for evacuees'exit selection / H. Ehtamo [et al.] // *Advances in Complex Systems*. 2010. Vol. 13. № 1. P. 113–134.
50. Mesmer B.L., Bloebaum C.L. Incorporation of decision, game, and Bayesian game theory in an emergency evacuation exit decision model // *Fire Safety Journal*. 2014. Vol. 67. P. 121–134.
51. Hughes R.L. A continuum theory for the flow of pedestrians // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2002. Vol. 36. № 6. P. 507–535.
52. Colombo R.M., Rosini M.D. Pedestrian flows and non-classical shocks // *Mathematical methods in the applied sciences*. 2005. Vol. 28. № 13. P. 1553–1567.
53. A social force evacuation model with the leadership effect / L. Hou [et al.] // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2014. Vol. 400. P. 93–99.
54. Han Y., Liu H. Modified social force model based on information transmission toward crowd evacuation simulation // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2017. Vol. 469. P. 499–509.
55. Huang H.J., Guo R.Y. Static floor field and exit choice for pedestrian evacuation in rooms with internal obstacles and multiple exits // *Physical Review E*. 2008. Vol. 78. № 2. P. 021131.
56. Kneidl A., Hartmann D., Borrmann A. A hybrid multi-scale approach for simulation of pedestrian dynamics // *Transportation research part C: emerging technologies*. 2013. Vol. 37. P. 223–237.
57. Matveev A.V., Efremov S.V. Model' processa avarijnoj evakuacii iz zdaniya v sluchae požara pri nestacionarnom potoke lyudej // *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2013. № 2 (146). S. 46–50. EDN PVOZKT.
58. Ivanov M.V., Matveev A.V. Kriterij effektivnosti upravleniya požarnym riskom pri ispol'zovanii sredstv avarijnoj evakuacii // *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie*. 2011. № 6-2 (138). S. 165–170. EDN OZAHHL.

Информация о статье:

Поступила в редакцию: 27.02.2024

Принята к публикации: 19.03.2024

The information about article:

Article was received by the editorial office: 27.02.2024

Accepted for publication: 19.03.2024

Информация об авторах:

Джафарова Анастасия Алексеевна, преподаватель кафедры прикладной математики и информационных технологий Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: nastya300696@mail.ru, SPIN-код: 5307-6354

Information about the authors:

Jafarova Anastasia A., lecturer at the department of applied mathematics and information technology of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: nastya300696@mail.ru, SPIN: 5307-6354