

Научная статья

УДК 614.84; DOI: 10.61260/2218-13X-2024-4-70-88

ЭВАКУАЦИЯ ПРИ ПОЖАРЕ В МУЗЕЕ: ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ТРЕНИРОВОЧНЫХ ЭВАКУАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

✉ Кирик Екатерина Сергеевна;

Витова Татьяна Брониславовна.

Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Красноярск, Россия.

Богданов Алексей Валентинович.

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

Государственный Эрмитаж, Санкт-Петербург, Россия.

Сушкова Ольга Владимировна.

Государственный Эрмитаж, Санкт-Петербург, Россия

✉ kirik@icm.krasn.ru

Аннотация. Статья посвящена вопросам подготовки и проведения тренировочной эвакуации из Зимнего дворца. В основе разрабатываемого плана лежат расчеты развития пожара и эвакуации. На их основе даются оценки временных параметров – времени блокирования и времени эвакуации участков здания, оценивается разница между этими показателями и дается оценка возможным задержкам начала эвакуации. Также на основе расчетов дается оценка возможных маршрутов эвакуации. Эта предварительно полученная информация важна, поскольку музеи имеют особенность, выраженную в том, что посетители не знакомы с планировкой, плохо ориентируются в здании, находятся в особом эмоциональном статусе, не предполагающем быструю отмену намерений по осмотру экспозиций. Поэтому требуется понимание о доступном запасе времени, подготовка персонала для управления эвакуацией. Тезис, что персонал играет ключевую роль, подтвердился при проведении тренировочной эвакуации, сделаны и другие организационные выводы.

Ключевые слова: музей, компьютерное моделирование, пожарная безопасность, проектирование, опасные факторы пожара, эвакуация, управление

Для цитирования: Кирик Е.С., Витова Т.Б., Богданов А.В., Сушкова О.В. Эвакуация при пожаре в музее: подготовка и проведение тренировочных эвакуаций с использованием численного моделирования // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2024. № 4. С. 70–88. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-4-70-88.

Scientific article

FIRE EVACUATION IN MUSEUMS: DEVELOPMENT AND PERFORMANCE OF EVACUATION DRILLS BASED ON NUMERICAL SIMULATION

✉ Kirik Ekaterina S.;

Vitova Tatiana B.

Institute of computational modelling of the Siberian branch of the Russian academy of sciences, Krasnoyarsk, Russia.

Bogdanov Alexey V.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia;
The State hermitage museum, Saint-Petersburg, Russia.

Sushkova Olga V.

The State hermitage museum, Saint-Petersburg, Russia

✉ kirik@icm.krasn.ru

Abstract. The article is devoted to the preparation and conduct of a training evacuation from the Winter Palace. The plan being developed is based on calculations of fire development and evacuation. Based on them, estimates of time parameters are given – the time of blocking and the time of evacuation of building sections, the difference between these indicators is estimated and possible delays in the start of evacuation are estimated. Also, based on calculations, an assessment of possible evacuation routes is given. This previously obtained information is important because museums have a feature expressed in the fact that visitors are not familiar with the layout, are poorly oriented in the building, and are in a special emotional status that does not imply a quick cancellation of intentions to inspect the exhibits. Therefore, an understanding of the available time is required, and personnel training is required to manage the evacuation. The thesis that the staff plays a key role was confirmed during the training evacuation, and other organizational conclusions were made.

Keywords: museum, computer simulation, fire safety, design, fire hazards, evacuation, management

For citation: Kirik E.S., Vitova T.B., Bogdanov A.V., Sushkova O.V. Fire evacuation in museums: development and performance of evacuation drills based on numerical simulation // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2024. № 4. P. 70–88. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-4-70-88.

Введение

Музеи относятся к объектам повышенной опасности, поскольку являются объектами массового пребывания. В случае пожара для всех без исключения людей должны быть обеспечены безопасные условия эвакуации из здания. В Российской Федерации критерием обеспечения безопасной эвакуации является выполнение условия (1) на протяжении всех путей эвакуации^{1,2}, и требуется обеспечение беспрепятственной эвакуации, то есть продолжительность скопления людей с плотностью, достигшей критического значения, равного 3,5 чел./м², не должна превышать 360 сек.:

$$t_{evac} < 0,8 \cdot t_{block}, \quad (1)$$

¹ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон Рос. Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ. Доступ из справ.-правового портала «Гарант».

² Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности: приказ МЧС России от 14 нояб. 2022 г. № 1140. Доступ из справ.-правового портала «Гарант»

где t_{evac} – время окончания эвакуации с участка здания; t_{block} – время достижения любым из опасных факторов пожара (ОФП) критического значения на участке.

Полностью предотвратить пожары невозможно, но меры предварительного планирования действий во время пожара могут значительно смягчить и эффективно уменьшить их последствия. Одним из элементов превентивных действий является проведение тренировочных эвакуаций. Часть посетителей в музеях имеют ограниченные возможности передвижения, и им требуется помощь персонала в случае экстренной эвакуации. Для музейных комплексов характерна постоянная ротация и обновление посетителей. Чаще всего посетители не знакомы с планировкой здания, расположением эвакуационных выходов, и только сотрудники могут направить посетителей безопасным маршрутом. Поэтому проведение тренировочных эвакуаций в музеях очень важно: тренируется персонал, отрабатывается механизм согласованной работы всех задействованных служб музея и внешних служб безопасности, изучается реакция посетителей на ситуацию для выработки подходов наиболее эффективного воздействия и побуждения посетителей к действиям [1].

Особенностью музеев (особенно крупных) является тот факт, что происходит регулярная ротация зрителей между залами, при этом на должностях зрителей часто работают сотрудники преклонного возраста. Это накладывает специфические требования к инструкциям по организации действий: они должны быть логичны и предусматривать не более двух вариантов действий (основной и запасной). Какой план выбрать в конкретной ситуации зрителю должно быть понятно из информации, которая доводится до его сведения в случае потребности в эвакуации.

При разработке схем эвакуации необходимо учитывать их реализуемость – имеет ли персонал объекта фактическую возможность обеспечить маршрутизацию (управление потоками людей) согласно разработанным схемам. Требуется учитывать и тот факт, что очаг пожара (или другой блокирующий фактор) может произойти в любой части здания, соответственно, разработанный запасной вариант должен обладать определенной универсальностью, быть применимым для ситуации и непротиворечивым в контексте всего здания. Эти факты, с учетом планировочных особенностей объекта, расположения экспозиций по популярности, налагают дополнительные ограничения на разработку схем эвакуации.

Планирование безопасных маршрутов эвакуации при пожаре сопряжено с решением следующих задач:

- определение допустимой продолжительности эвакуации, при которой обеспечиваются безопасные условия на маршрутах эвакуации;
- установление предельной численности людей, единовременное пребывание которых в музее будет безопасным в случае пожара или другой чрезвычайной ситуации, требующей эвакуации;
- установление максимальной единовременной численности посетителей, испытывающих затруднения при самостоятельном передвижении (маломобильные группы населения (МГН), разработка стратегии их сопровождения из различных помещений музея, учитывая ограниченную скорость передвижения и возможность самостоятельного покидания здания);
- определение помещений здания на этажах для использования их в качестве зон безопасности для посетителей категории МГН (в случае если отсутствуют специально оборудованные зоны безопасности);
- разработка маршрутов эвакуации на случай действительного или предположительного блокирования эвакуационных путей и/или выходов из-за распространения ОФП с учетом применяемых критериев безопасности;
- выявление наиболее проблемных для эвакуации участков здания, в которых образуются скопления людей с критической плотностью, и их длительность (скопления с максимальной плотностью (3,5 чел./м²) не должны длиться более 360 сек.).

Решение таких задач возможно с применением компьютерного моделирования развития пожара и эвакуации [2, 3]. Например, в работе [4] оценивают пропускную способность дворца-музея Урсино (г. Катания, Италия) и проверяют эффективность существующего плана эвакуации для различных конфигураций доступных выходов и для нескольких скоростей входящего потока посетителей; в работе [5] рассматривают различные сценарии эвакуации и предлагают рекомендации для более быстрой и безопасной эвакуации посетителей музея (расстановка экспозиций, увеличение или перенос проходов). В работах [6, 7] исследуют траектории движения посетителей галереи Боргезе (Рим, Италия), чтобы затем средствами математического моделирования движения людей выработать стратегии заполняемости и посещения музея в течение дня [8]. В работе [9] рассматривают несколько сценариев развития пожара и безопасность эвакуации людей во дворце-музее Фрушоне (г. Салерно, Италия) с помощью моделирования пожара и подтверждают эффективность существующего плана эвакуации при ограничении количества одновременно пребывающих в здании людей. В работе [10] предложена интеллектуальная оптимизация путей экстренной эвакуации в условиях плотного скопления людей в зданиях, являющихся объектом культурного наследия. В работе [11] проведен анализ пожарной безопасности исторических зданий после землетрясений в г. Киото (Япония) с помощью моделирования по методу Монте-Карло с использованием физической модели распространения пожаров в городах. В работе [12] изучают опыт посещения исторических зданий людьми с инвалидностью. Отмечается, что действия персонала играют важную роль в обеспечении своевременной эвакуации из музеев [9, 12].

Для здания Зимнего дворца был разработан набор сценариев, выполнены расчеты, определено максимальное количество человек для единовременного пребывания в здании, дана оценка условиям, которые обеспечиваются при эвакуации [13]. Для решения задач моделирования использовалась российская разработка – программный комплекс «Сигма ПБ» [14, 15] – инструмент для компьютерного моделирования эвакуации людей при пожаре в зданиях. В программе реализована полевая модель развития пожара и индивидуально-поточная модель эвакуации. Программа применялась для проверки объемно-планировочных решений и организации пешеходных зон для объектов Чемпионата мира по футболу 2018 г. и Универсиады 2019 г. [16].

В настоящей статье сосредоточимся на вопросе подготовки к проведению тренировочной эвакуации в Зимнем дворце Государственного Эрмитажа, одном из крупнейших музейных комплексов в мире. В основе такой подготовки лежат предварительные оценки распространения ОФП на основе компьютерного моделирования для составления схемы эвакуации и оценка времени эвакуации.

Методы исследования.

Объект исследования и предварительный анализ

Описание специфики Зимнего дворца.

Зимний дворец возведён архитектором Франческо Бартоломео Растрелли в 1754–1762 гг. в стиле барокко. После пожара в 1837 г. перестроен в каменном исполнении и являлся императорской резиденцией, с ноября 1917 г. – музеем [17].

Зимний Дворец представляет собой прямоугольное трехэтажное здание с подвалом и антресолями; площадь составляет примерно 60 000 м² (рис. 1). В архитектурном облике имеется четыре ризалита – части здания, выступающие за основную линию фасада во всю его высоту, с внутренними дворами, а также центральный (Большой) двор. Главный фасад разделен аркой парадного подъезда на юго-западный и юго-восточный ризалиты. В здании имеется более 1 000 помещений. Геометрические характеристики здания – длина по главному фасаду, длина по боковому фасаду и средняя высота составляют 137 м, 106 м и 23,5 м соответственно. С востока к зданию примыкает Малый Эрмитаж.

Стены и перекрытия кирпичные, своды двухсветных залов выполнены дутыми эллиптическими балками из склепанных листов кровельного железа, соединенных болтами. Максимальная высота первого этажа примерно 8 м в Иорданской галерее; средняя высота выставочных залов примерно 6–6,5 м; средняя высота второго этажа около 7 м, в больших залах – 13–14 м; средняя высота выставочных залов и коридоров третьего этажа – 6,5 м.



а)



б)

Рис. 1. Зимний дворец Государственного Эрмитажа:
а) со стороны Дворцовой площади; б) вид сверху

В здании анфиладное расположение залов, часть проемов не имеет дверей, что является особенностью в организации музейного пространства (рис. 2).



Рис. 2. Анфиладное расположение залов в Зимнем дворце Государственного Эрмитажа:
в торцах анфилады находятся двери, между помещениями внутри анфилады дверей нет

Основную часть исторического здания составляют просторные помещения общего пользования (фойе, галереи, выставочные залы и коридоры). Для Зимнего дворца характерно включение в экспозиционное пространство коридоров, где экспонируются шпалеры, скульптуры, мебель и картины. В здании расположено большое количество служебных помещений, часть из которых имеют свои обособленные лестницы и выходы наружу.

Для эвакуации посетителям доступны шесть лестниц [17] (рис. 3):

- Иорданская и Октябрьская, соединяющие первый и второй этажи.
- Большая Церковная, Комендантская, Салтыковская, соединяющие первый и третий этажи.
- Деревянная, соединяющая второй и третий этажи.



**Рис. 3. Лестницы, предусмотренные для эвакуации посетителей Зимнего дворца:
а) Иорданская; б) Октябрьская; в) Большая церковная; г) Комендантская; д) Деревянная;
е) Салтыковская**

Расположение лестниц по зданию представлено на рис. 4. Для эвакуации посетителей Зимнего дворца могут быть задействованы следующие эвакуационные выходы: Посольский подъезд, подъезд Растрелли, Комендантский подъезд, Октябрьский подъезд, Салтыковский подъезд (рис. 4а) и четыре перехода в Малый Эрмитаж, расположенные со стороны восточного фасада здания: один по первому этажу и три по второму этажу (рис. 4б).

С позиции сохранности музейных ценностей, преимущество при эвакуации имеют выходы, направленные в Большой центральный двор Зимнего Дворца, поскольку в этом случае наиболее просто организовать досмотровые процедуры без привлечения специальных мер по оцеплению периметра.

Наибольшую площадь экспозиции и популярность среди посетителей имеет второй этаж, где выставлены живопись, предметы декоративно-прикладного искусства, мебель, гобелены, представлены интерьеры комнат царской семьи.

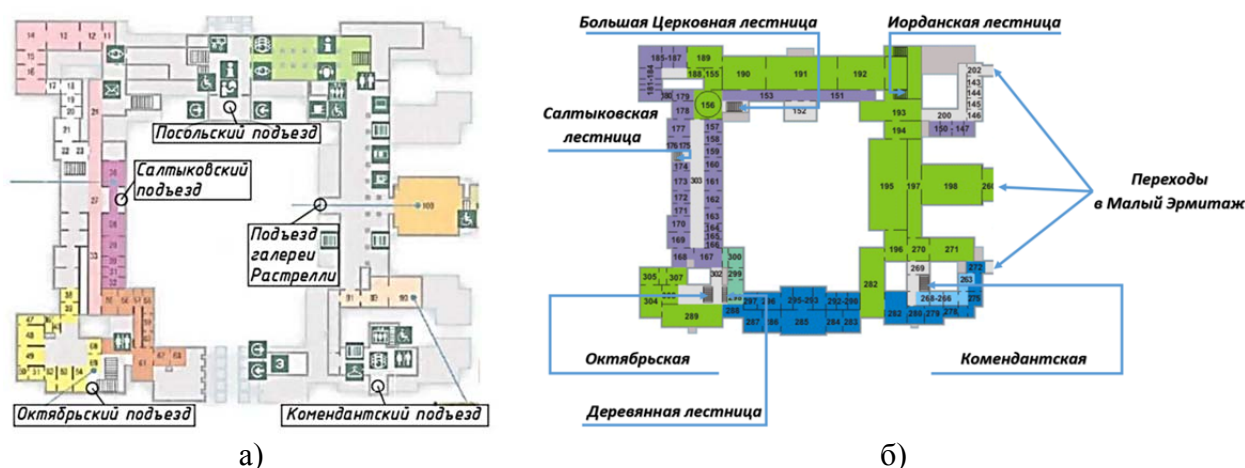


Рис. 4. Эвакуационные лестницы и выходы в Зимнем дворце: а) эвакуационные выходы наружу на плане первого этажа; б) распределение лестниц по зданию на плане второго этажа

Организационно-технические аспекты эвакуации.

Для организации эвакуации важно иметь максимально точную оценку количества людей, одновременно находящихся внутри здания. В сезон туристической активности (май – сентябрь) количество одновременно находящихся в Зимнем дворце посетителей может достигать 3 000 чел., примерно 20 % из них – это иностранные граждане. Определить численность в музее посетителей категории МГН невозможно.

В музее организовано экскурсионное обслуживание. Гиды экскурсионных групп знакомы с планировкой Зимнего дворца, и в случае экстренной эвакуации проводят посетителей к эвакуационному выходу. Однако большинство людей осматривают экспозицию самостоятельно и им понадобится больше времени, чтобы сориентироваться в сложном пространстве.

Зимний дворец оборудован адресно-аналоговой пожарной сигнализацией и системой оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ) 4-го типа, речевое оповещение осуществляется на трех языках: русском, французском и английском. На путях эвакуации расположены телефоны для прямой связи с пожарным постом, смонтирована система видеонаблюдения.

Моделирование эвакуации и развития пожара.

Для моделирования развития пожара и эвакуации людей была построена цифровая модель здания (рис. 5). В связи с наличием сложных архитектурных интерьеров, в модели принят ряд упрощений, не оказывающих значимого влияния в расчетной области на процесс эвакуации и распространение ОФП.

Рассмотрены пять мест вероятного расположения очагов пожара, при которых ожидаются наихудшие последствия для находящихся в здании людей. Очаги выбраны с условием исключения или минимизации использования одной эвакуационной лестницы и одного выхода наружу:

- очаг в Буфете (Галерея Растрелли): минимизируется использование Иорданской лестницы;
- очаг в Комендантском гардеробе: исключается Комендантская лестница со второго на первый этаж;
- очаг в фойе Деревянной лестницы: исключаются Деревянная и Октябрьская лестницы;
- очаг в фойе Салтыковского подъезда: исключается Большая церковная лестница со второго на первый этаж;
- очаг в Школьном гардеробе: исключается Большая церковная лестница со второго на первый этаж.



Рис. 5. Цифровая модель Зимнего дворца

Расчеты выполнялись с целью дать количественные оценки: временным характеристикам (времени блокирования путей эвакуации, времени эвакуации с учетом наличия людей со сниженной мобильностью (скоростью передвижения); допустимому количеству одновременно находящихся людей, при условии обеспечения безопасных (своевременных и беспрепятственных) условий эвакуации.

Результаты предварительных расчетов.

Проведенные расчеты позволили оценить пропускные возможности здания при перераспределении нагрузки на альтернативные эвакуационные пути в случае блокирования ОФП части путей. Количественный анализ полученных схем эвакуации представлен в распределении людей по лестницам (рис. 6) и выходам из здания (рис. 7), оценке времени эвакуации по лестницам (рис. 8) и выходам (рис. 9) для каждого сценария. Также на рис. 8 и 9 приведено время блокирования ОФП соответствующего участка (отсутствие данных означает, что участок не блокирован на протяжении 20 мин развития пожара), откуда видно, какой имеется запас по времени на проведение эвакуации.

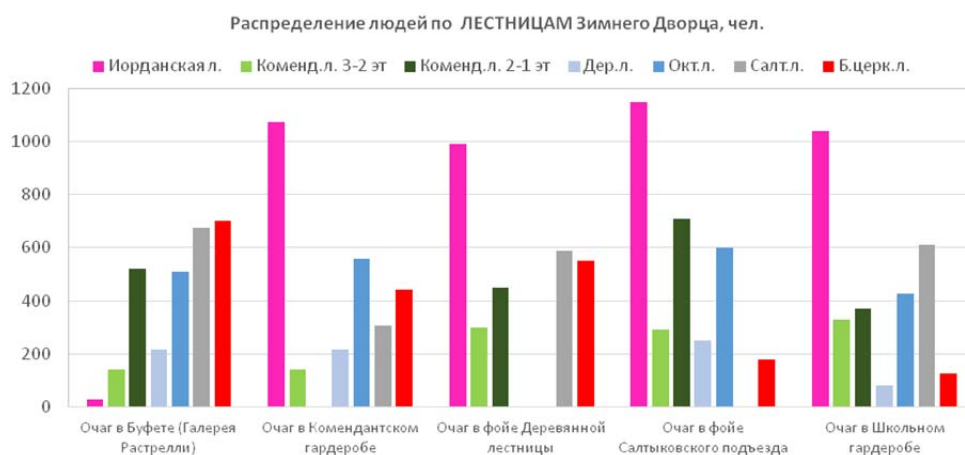


Рис. 6. Распределение людей на лестницах, чел.

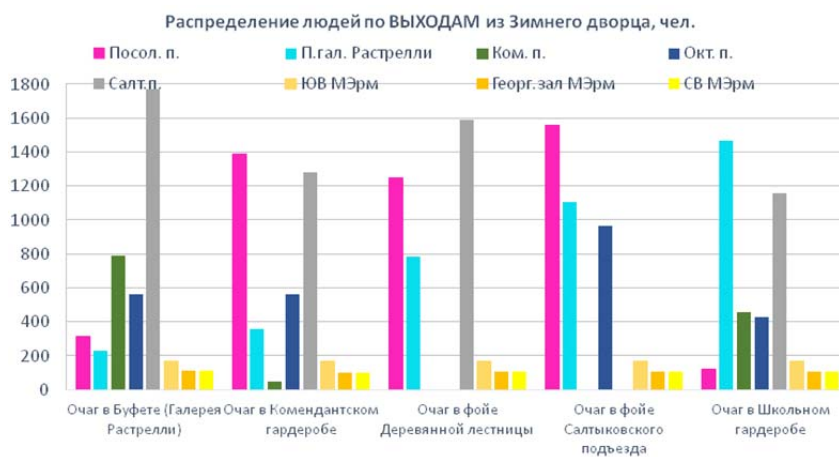


Рис. 7. Распределение людей по выходам из здания, чел.

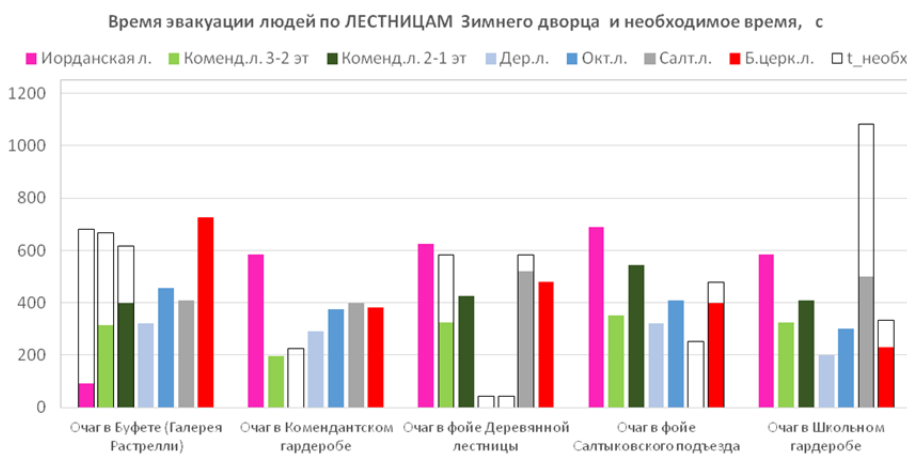


Рис. 8. Время эвакуации по лестницам и необходимое время, сек.

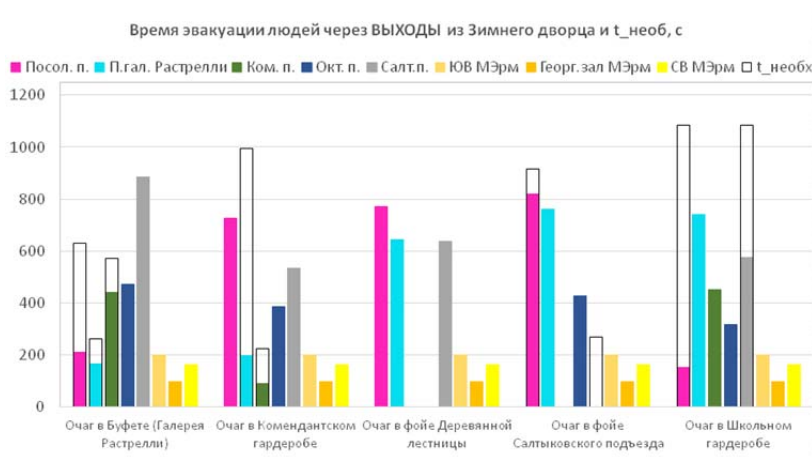


Рис. 9. Время эвакуации по выходам из здания и необходимое время, сек.

Из рис. 6 видно, что при почти полном исключении из схемы эвакуации Иорданской лестницы (имеет наибольшую пропускную способность) в сценарии «Очаг в Буфете», имеется возможность примерно пропорционально распределить нагрузку на другие лестницы. Диаграмма этого сценария на рис. 8 демонстрирует, что при примерно равном количестве людей, приходящихся на Большую церковную и Салтыковскую лестницы, время

эвакуации по Большой церковной больше. Это объясняется наличием посетителей с малой скоростью перемещения (МГН), их эвакуационный путь с восточной части здания из-за исключения Иорданской лестницы значительно удлиняется, но проходит в безопасных условиях. Сценарии, в которых используется Иорданская лестница, позволяют дать оценку увеличению общего времени эвакуации из-за такого перераспределения посетителей примерно на две минуты, но при этом безопасные условия эвакуации обеспечиваются.

Допустимым является и минимизация использования Посольского подъезда (главного входа), как это видно на рис. 7 в сценариях с очагами в Буфете и Школьном гардеробе. Исключение из схемы эвакуации подъездов Октябрьского и Комендантского, выходящих за периметр здания, возможно в сценарии «Очаг на Деревянной лестнице». Причем, стоит отметить, что общее время эвакуации в этом случае не превосходит другие варианты использования выходов из здания (рис. 8).

В результате предварительных расчетов определено:

- допустимое количество человек (4 000) в Зимнем дворце одновременно;
- допустимость использования выходов только во внутренний двор;
- допустимость исключения одной или двух лестниц при условии использования Малого Эрмитажа в качестве зоны безопасности;
- если нет очага пожара на первом этаже, то первый этаж – это зона безопасности;
- принцип ближайшего выхода не всегда следует использовать, поскольку можно оказаться в задымленной зоне;
- требуется управление посетителями: силами музейных смотрителей и службы безопасности (СБ);
- для локализации ОФП и управления эвакуацией необходимо применять порядок закрытия дверей.

Результаты исследования и их обсуждение.

Подготовка и проведение тренировочной эвакуации в здании Зимнего дворца

Цели тренировочной эвакуации.

Основной вывод, сделанный по результатам анализа выполненных расчетов: при существующем техническом оснащении здания обязательно потребуется участие персонала в управлении эвакуацией, так как движение людей к ближайшему эвакуационному выходу может быть опасным. Для этого персонал музея должен уметь направлять людей от очага пожара и быть способен перераспределять потоки для снижения вероятности продолжительных скоплений.

Главная роль в обеспечении безопасной и своевременной эвакуации посетителей отводится музейным смотрителям – сотрудникам, рабочие места которых расположены непосредственно в выставочных залах.

Принимая решение о проведении тренировочной эвакуации, необходимо было предусмотреть возможность проявления нежелательных отрицательных эмоций и сопротивления со стороны посетителей при отсутствии явных (видимых, ощущаемых обонянием) признаков угрозы. По этой причине были сформулированы важные вопросы, требовавшие проработки от негативных последствий:

- какой будет реакция посетителей на речевое оповещение и на действия персонала;
- обоснованность покидания здания (выход на улицу) посетителями без верхней одежды с учетом проведения тренировочной эвакуации в осенне-зимний период.

Исходя из прогнозирования действий людей, не видящих непосредственных признаков пожара, были сформулированы цели проведения тренировочной эвакуации:

- 1) проверить возможность управления эвакуацией силами персонала объекта (смотрителей и СБ);

- 2) проверить гипотезу об использовании дверей как инструмента направления людей нужным маршрутом;
- 3) проверить реакцию людей на указания/требования персонала;
- 4) проверить реакцию людей на включение речевого информирования системы оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ);
- 5) определить время эвакуации из отдельных залов и здания в целом;
- 6) дать оценку скорости людского потока и отдельных посетителей в процессе эвакуации;
- 7) определить возможность сбора посетителей в безопасных частях здания (зонах безопасности).

Подготовка и проведение тренировочной эвакуации.

Проведению учебной тренировки предшествовала тщательная подготовка, в ходе которой:

- выбрано условное место возгорания таким образом, чтобы исключить из маршрутов эвакуации одну эвакуационную лестницу и один эвакуационный выход из здания;
- выполнено компьютерное моделирование развития пожара и эвакуации людей с учётом выбранного места условного возгорания;
- определены на путях эвакуации двери, при закрытии которых возможно замедление распространения ОФП;
- разработаны наиболее рациональные маршруты для эвакуации исходя из моделирования динамики ОФП и существующей обстановки в музее;
- проведены занятия с музейными зрителями по изучению последовательности действий в случае возникновения пожара, порядку закрытия дверей, процедуре управления людскими потоками на основе разработанных схем.

Местом условного возгорания было выбрано служебное помещение рядом с Белой столовой (зал № 188, 2 этаж). Из маршрутов эвакуации исключалась Большая церковная лестница, как ближайшая к очагу пожара. Октябрьский подъезд исключался как выход, ведущий за пределы здания и требующий организации досмотровых процедур с привлечением специальных мер по оцеплению периметра.

С учетом выбранного места условного возгорания было выполнено моделирование развития пожара от предполагаемого очага (рис. 10) при условии максимальной допустимой загрузки здания (4 000 чел.).

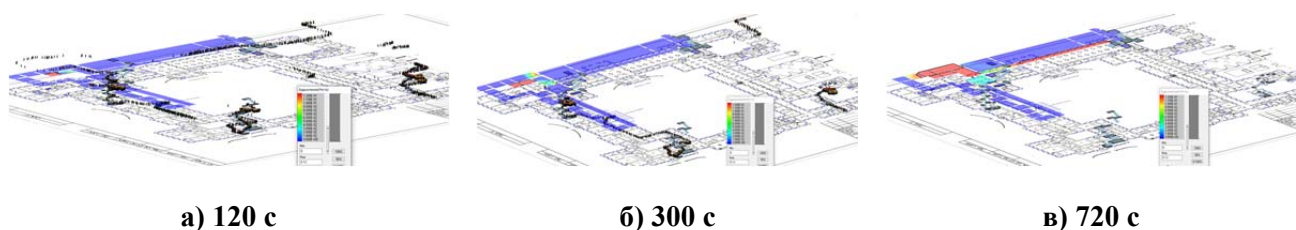


Рис. 10. Горизонтальные срезы оптической плотности дыма (Нп/м) на высоте 1,7 м от пола в сценариях «Очаг в зале № 188» (цвет меняется от безопасного (синего) к красному (опасному))

Определена динамика распространения ОФП и подтверждено, что первый этаж не задымляется в течение 20 мин (даже при открытых дверях вблизи очага). Принято решение эвакуацию заканчивать в галереях/коридорах у выходов Посольского, Салтыковского, Растрелли, Комендантского, без вывода посетителей наружу.

На основе расчетов определено, что для сдерживания распространения ОФП необходимо управлять состоянием дверей в районе очага (залы № 188, 155), а именно: закрыть после покидания людьми соответствующего участка здания.

Реализация основных функций музея предусматривает вариативность использования выставочного пространства, поэтому проходы через залы периодически перекрываются для оформления новых экспозиций. Во время подготовки и проведения тренировочной эвакуации три выставочных зала (Пикетный (№ 196), Николаевский (№ 191) и Аванзал (№ 192), расположенных по маршрутам эвакуации, были закрыты для создания новых выставок. С учетом предполагаемого очага пожара, его динамики, текущей особенности эксплуатации Зимнего дворца были разработаны схемы эвакуации с этажей с исключением Большой церковной лестницы (как ближайшей к очагу пожара), выхода с Октябрьского подъезда и закрытых выставочных залов (рис. 11, 12).

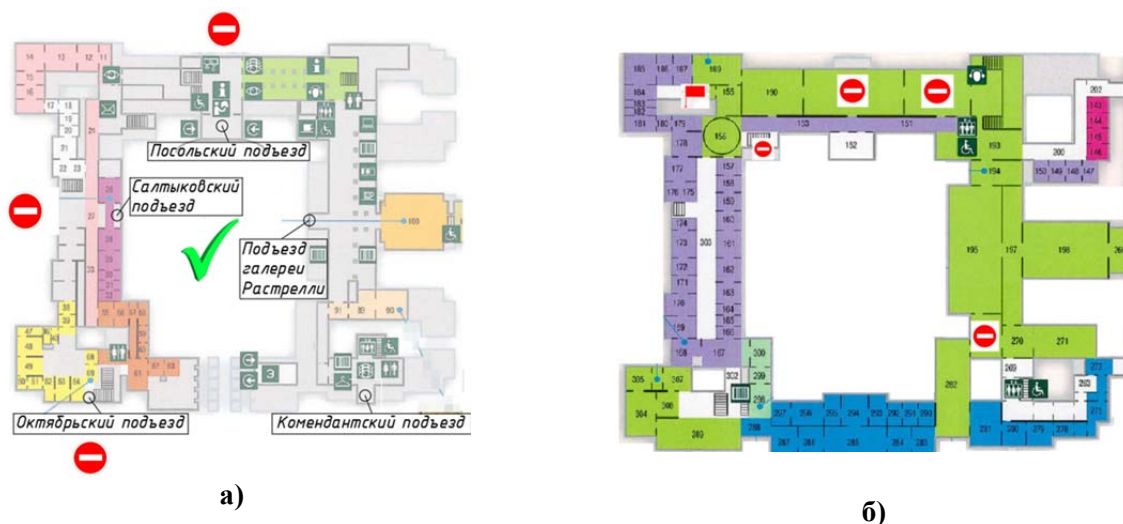


Рис. 11. а) подъезды, исключенные из схемы эвакуации и включенные в нее; б) расположение очага пожара и закрытые залы для подготовки выставочных экспозиций

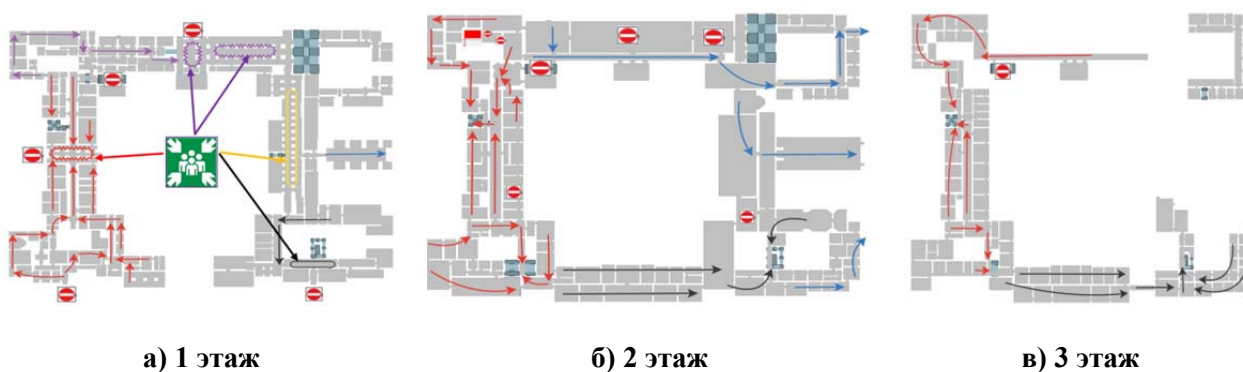


Рис. 12. Схема эвакуации с этажей в сценарии, подготовленном для тренировочной эвакуации: а) на первом этаже обозначены места сбора посетителей в фойе подъездов Салтыковского, Посольского, Растрелли, Комедантского; цвет стрелок на этажах соответствует месту сбора; б, в) схемы эвакуации второго и третьего этажей

Подготовка к тренировочной эвакуации выявила необходимость в создании дополнительных принципов формирования схем эвакуации применительно к данному зданию:

- деление маршрутов эвакуации на крупные блоки, соответствующие частям задания – ризалиты и анфилады. Каждый блок имеет свой эвакуационный путь и выход;
- наличие двух планов действий: план «А» – основной, план «Б» – резервный, учитывающий наличие закрытых залов.

Применительно к тренировочному сценарию зрителям были выданы конкретные инструкции для каждого рабочего места (зала). Проводились инструктирования общего характера и на местах по управлению людскими потоками на основе разработанных схем, использованию дверей (как закрытие, так и открытие) для направления посетителей по путям эвакуации (разработанным маршрутам) (рис. 13).

Тренировочная эвакуация началась в 11 ч 30 мин. К моменту срабатывания системы оповещения в Зимнем дворце находилось 820 посетителей, прошедших билетный контроль. К проведению учебной тренировки привлекались статисты, которые были расставлены у эвакуационных выходов для фиксации количества эвакуированных людей и времени эвакуации. Необходимо отметить, что эвакуация посетителей проводилась в хорошо освещенных помещениях, в условиях отсутствия ОФП и других обстоятельств, которые могут неблагоприятно повлиять на человека. К началу тренировки часть посетителей перешла в другие здания музея.



Рис. 13. Инструктирование музейных зрителей на рабочих местах

Результаты тренировочной эвакуации.

Анализ тренировочной эвакуации сотрудников и посетителей музея (26 октября 2022 г.) при модельном очаге пожара в служебном помещении на втором этаже позволил сформулировать следующие выводы:

1) при четком предварительном инструктировании зрители выполняют свои действия по управлению эвакуацией путем указания направления движения и с помощью закрытия дверей в зоне распределения потоков людей в соответствии с разработанными маршрутами эвакуации (рис. 14);



Рис. 14. Работа зрителей по управлению эвакуацией

2) закрытие дверей подтверждает гипотезу о возможности использования дверей как инструмента для направления людей нужным маршрутом – закрывание дверей являлось сигналом к тому, что путь перекрыт;

3) наблюдалась адекватная реакция посетителей в экспозиционных залах на указания зрителей;

4) паники и повышенного волнения на речевое информирование СОУЭ не наблюдалось. При этом зафиксировано, что в местах, где отсутствовали музейные зрители – на первом этаже в Иорданской галерее и на втором этаже на Иорданской лестнице, посетители преимущественно игнорировали речевое оповещение, несмотря на отчетливость и хорошую слышимость произносимого текста (рис. 15). В тоже время, при непосредственном обращении персонала пройти к эвакуационному выходу, реагировали спокойно и просьбу выполняли. Можно предположить, что такая реакция вызвана ощущением защищенности, поскольку этим посетителям известен выход, а признаков пожара, переполоха и суеты вокруг не наблюдалось;



Рис. 15. Отсутствие реакции посетителей на речевое оповещение о пожаре на Иорданской лестнице

5) было отмечено, что некоторые посетители в процессе эвакуации проявляли неторопливость, останавливаясь для осмотра экспозиции (рис. 16);

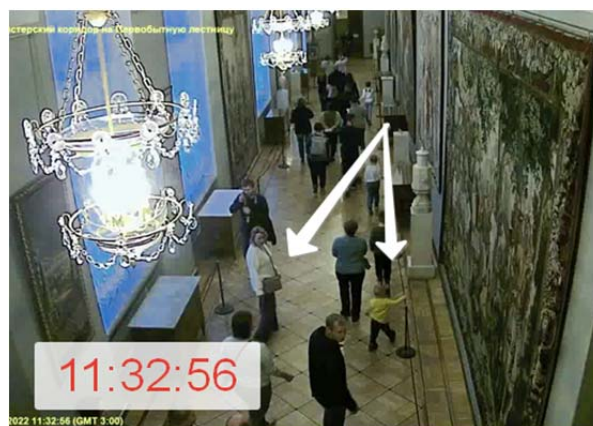
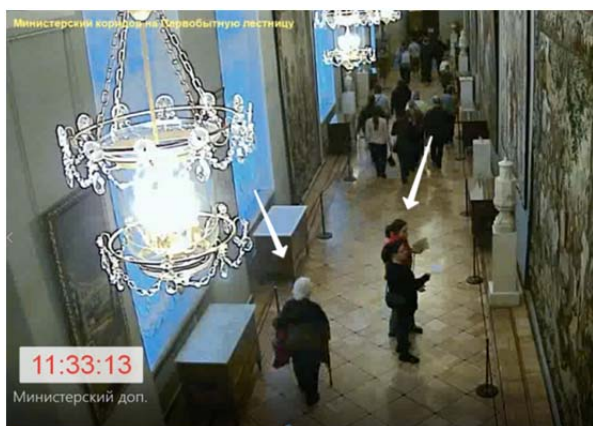


Рис. 16. Поведение посетителей во время тренировочной эвакуации

6) зафиксированное время эвакуации из залов было меньше рассчитанного необходимого времени эвакуации людей при пожаре;

7) средняя скорость свободного движения посетителей составила примерно от 1 до 1,3 м/с.

По записям с камер видеонаблюдения удалось отследить перемещение конкретных людей по зданию. Зная пройденное расстояние и затраченное время, была дана оценка скорости перемещения. В общей сложности сделано около 80 наблюдений. Данные представлены на рис. 17 с разбивкой по залам, где происходило наблюдение, так же на рис. 17 указана длина участка, на котором замерялась скорость.

С учетом наблюдаемой низкой плотности, люди выбирали удобную для них скорость движения, поэтому представленные данные следует интерпретировать как скорость свободного движения. Сплошная линия – скорость свободного движения^{1,2}, именно эта скорость была принята в качестве скорости свободного движения основной группы мобильности – М1 в проведенных расчетах по действующей методике – М0-3).

Для проведения параллелей (сравнений) с результатами расчетов следует учитывать, что время проведения тренировочной эвакуации было выбрано в начале рабочего дня музея (11 ч 30 мин), к этому моменту через турникеты прошло 820 человек, поэтому плотных потоков эвакуирующиеся не формировали (что видно на рис. 14–16). Время окончания эвакуации в проведенных расчетах определяли лица с ограниченной мобильностью, они составляли до 30 %, их скорость свободного движения была принята 0,5–1,16 м/сек. При моделировании, в силу медленной скорости, завершающую часть эвакуации эта категория посетителей выполняла в свободном движении. Поэтому полученные данные скоростей тренировочной эвакуации можно расценивать как реализацию завершающей стадии эвакуации, что была получена в расчетах. Но тут же следует отметить, что представленная интерпретация годится именно для этой конкретной ситуации. В целом необходимо больше данных, чтобы сформировать достоверное представление о скорости свободного движения посетителей музея во время эвакуации при пожаре.

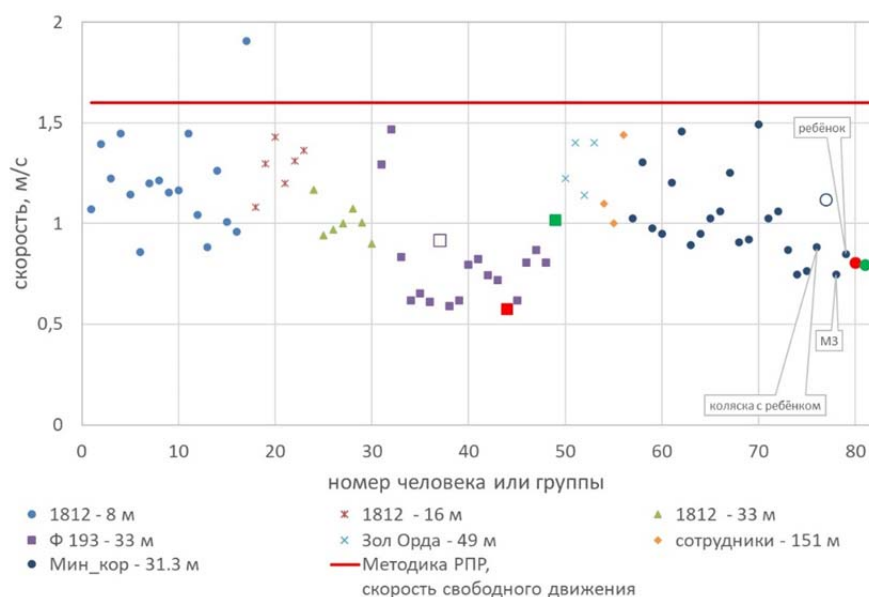


Рис. 17. Средняя скорость свободного движения отдельных людей

Заключение

Проведенное исследование показало, что задача разработки маршрута эвакуации в случае пожара в музейных зданиях является многокритериальной (выполнение условий безопасной и своевременной эвакуации сотрудников и посетителей; обеспечение сохранности музейных предметов). Показано, что использование моделирования эвакуации при пожаре позволяет учитывать различные критерии и предоставляет принципиальную возможность для решения задачи разработки оптимальных схем эвакуации. Также необходимо учитывать тот факт, что очаг пожара (или другой блокирующий фактор) может возникнуть в любой части здания, в связи с чем у сотрудников должно быть несколько схем

эвакуации. Чтобы свободно ориентироваться в этих схемах и за ограниченное время выбрать нужную, схемы должны быть как можно более единообразными. Эти особенности вместе с планировочными особенностями объекта также накладывают определенные ограничения на разработку схем эвакуации.

В ходе проведенного изучения объемно-планировочных решений Зимнего дворца и сравнительного анализа результатов моделирования распространения ОФП и эвакуации были сформулированы следующие принципы создания схем эвакуации:

- схемы эвакуации для различных сценариев должны отличаться только в той степени, в какой это необходимо и оправдано местоположением очага пожара (или другим препятствующим фактором);

- из одного зала (комнаты) все люди направляются по одинаковому маршруту;

- посетители анфилад направляются в одну сторону;

- исключение встречных и пересекающихся потоков;

- основным механизмом маршрутизации (управления направлением движения) для однозначного формирования маршрута является закрытие дверей;

- ближайший эвакуационный выход не всегда является безопасным, поэтому выбор маршрута эвакуации должен основываться на анализе динамики развития пожара и числовых характеристиках процесса эвакуации;

- обеспечение безопасности людей является первоочередной задачей, но необходимо предусматривать обеспечение сохранности музейных ценностей.

Важным аспектом является факт реализуемости разработанного маршрута – то есть объект может обеспечивать маршрутизацию (управление людскими потоками) по разработанной схеме.

Проведение тренировочной эвакуации в Зимнем дворце на основе разработанных маршрутов (схем) эвакуации продемонстрировало:

- зрители могут управлять эвакуацией при должном инструктировании;

- посетители реагируют на указания персонала, и взаимодействие с персоналом способствует спокойным управляемым действиям посетителей;

- закрытие дверей на путях движения посетителей – способ направлять потоки;

- возможно реализовать безопасную эвакуацию за счет спокойных, уверенных действий подготовленного персонала;

- необходимо наличие двух планов действий: план «А», план «Б» с учетом наличия залов, которые могут быть закрыты (большее количество планов действий, с учетом ротации зрителей не реализуемо);

- можно использовать в качестве зон безопасности коридоры и галереи первого этажа (Иорданская, Растрелли, Комендантский коридор, Кутузовский коридор) в случае, если нет очага возгорания на первом этаже в соответствующих зонах;

- сообщение СОУЭ должно привлекать внимание (звуки, голос) и призывать следовать указаниям персонала;

- для повышения культуры безопасности необходимо ввести практику регулярных сообщений: «Уважаемые посетители, информируем, что в случае чрезвычайной ситуации необходимо следовать указаниям персонала музея».

Список источников

1. Исследование особенностей процесса эвакуации для объектов культурного наследия / Т.Ю. Еремина [и др.] // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. 2019. № 28 (1). С. 54–66. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.54-66.

2. Kuligowski E.D. Computer Evacuation Models for Buildings. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Springer New York. New York, NY, 2016. P. 2152–2180. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_60.

3. Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications / A. Schadschneider [et al.] // *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Springer New York. New York, NY, 2009. P. 3142–3176. DOI: 10.1007/978-0-387-30440-3-187.
4. Agent-Based Simulation of Pedestrian Behaviour in Closed Spaces: A Museum Case Study / A. Pluchino [et al.] // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2014. № 17 (1). P. 16. DOI: 10.18564/jasss.2336.
5. Simulation and Optimization of Emergency Evacuation in Gold Museum Based on AnyLogic / X. Feng [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. № 1650 (3). P. 32080. DOI: 10.1088/1742-6596/1650/3/032080.
6. Managing crowded museums: Visitors flow measurement, analysis, modeling, and optimization / P. Centorrino [et al.] // *Journal of Computational Science*. 2021. № 53. P. 101357. DOI: 10.1016/j.jocs.2021.101357.
7. Measurement and analysis of visitors' trajectories in crowded museums / P. Centorrino [et al.]. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1912.02744.
8. Forecasting Visitors' behaviour in Crowded Museums / C. Balzotti [et al.] // *Collective Dynamics*. 2020. 5(0 SE-Proceedings of Pedestrian and Evacuation Dynamics 2018). P. 499–501. DOI: 10.17815/CD.2020.82.
9. Modelling and numerical simulation of pedestrian flow evacuation from a multi-storey historical building in the event of fire applying safety engineering tools / C. Caliendo [et al.] // *Journal of Cultural Heritage*. 2020. № 41. P. 188–199. DOI: 10.1016/j.culher.2019.06.010.
10. Path intelligent optimization for dense crowd emergency evacuation in heritage buildings / C. Yuxin [et al.] // *Journal of Cultural Heritage*. 2021. № 47. P. 180–187. DOI: 10.1016/j.culher.2020.06.007.
11. Himoto K., Nakamura T. An Analysis of the Post-earthquake Fire Safety of Historic Buildings in Kyoto, Japan // *Fire Technology*. 2014. № 50. P. 1107–1125. DOI: 10.1007/s10694-013-0330-0.
12. How Do People with Disabilities Consider Fire Safety and Evacuation Possibilities in Historical Buildings? – A Swedish Case Study / K. Lena [et al.] // *Fire Technology*. 2012. № 48 (1). P. 27–41. DOI: 10.1007/s10694-010-0199-0.
13. Fire Safety in Museums: Simulation of Fire Scenarios for Development of Control Evacuation Schemes from the Winter Palace of the Hermitage / E. Kirik [et al.] // *Buildings*. 2022. № 12. P. 1546. DOI: 10.3390/buildings12101546.
14. Кирик Е.С., Малышев А.В. Тестирование компьютерных программ по расчету времени эвакуации на примере модуля SigmaEva // *Пожарная безопасность*. 2014. № 1. С. 78–85.
15. Расчетно-аналитический программный комплекс «Сигма ПБ» по моделированию развития пожара и эвакуации / К.Ю. Литвинцев [и др.] // *Пожарная безопасность*. 2016. № 4. С. 51–59.
16. Pedestrian Movement Simulation for Stadiums Design / E. Kirik [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. № 456. P. 012074. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012074.
17. Государственный Эрмитаж. URL: <https://www.hermitagemuseum.org/wps/portal/hermitage/> (дата обращения: 16.06.2022).

References

1. Issledovanie osobennostej processa evakuacii dlya ob"ektov kul'turnogo naslediya / T.Yu. Eremina [i dr.] // *Pozharovzryvobezopasnost' / Fire and Explosion Safety*. 2019. № 28 (1). S. 54–66. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.01.54-66.
2. Kuligowski E.D. Computer Evacuation Models for Buildings. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer New York. New York, NY, 2016. P. 2152–2180. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_60.

3. Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications / A. Schadschneider [et al.] // *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Springer New York. New York, NY, 2009. P. 3142–3176. DOI: 10.1007/978-0-387-30440-3-187.
4. Agent-Based Simulation of Pedestrian Behaviour in Closed Spaces: A Museum Case Study / A. Pluchino [et al.] // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2014. № 17 (1). P. 16. DOI: 10.18564/jasss.2336.
5. Simulation and Optimization of Emergency Evacuation in Gold Museum Based on AnyLogic / X. Feng [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. № 1650 (3). P. 32080. DOI: 10.1088/1742-6596/1650/3/032080.
6. Managing crowded museums: Visitors flow measurement, analysis, modeling, and optimization / P. Centorrino [et al.] // *Journal of Computational Science*. 2021. № 53. P. 101357. DOI: 10.1016/j.jocs.2021.101357.
7. Measurement and analysis of visitors' trajectories in crowded museums / P. Centorrino [et al.]. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1912.02744.
8. Forecasting Visitors' behaviour in Crowded Museums / C. Balzotti [et al.] // *Collective Dynamics*. 2020. 5(0 SE-Proceedings of Pedestrian and Evacuation Dynamics 2018). P. 499–501. DOI: 10.17815/CD.2020.82.
9. Modelling and numerical simulation of pedestrian flow evacuation from a multi-storey historical building in the event of fire applying safety engineering tools / C. Caliendo [et al.] // *Journal of Cultural Heritage*. 2020. № 41. P. 188–199. DOI: 10.1016/j.culher.2019.06.010.
10. Path intelligent optimization for dense crowd emergency evacuation in heritage buildings / C. Yuxin [et al.] // *Journal of Cultural Heritage*. 2021. № 47. P. 180–187. DOI: 10.1016/j.culher.2020.06.007.
11. Himoto K., Nakamura T. An Analysis of the Post-earthquake Fire Safety of Historic Buildings in Kyoto, Japan // *Fire Technology*. 2014. № 50. P. 1107–1125. DOI: 10.1007/s10694-013-0330-0.
12. How Do People with Disabilities Consider Fire Safety and Evacuation Possibilities in Historical Buildings? – A Swedish Case Study / K. Lena [et al.] // *Fire Technology*. 2012. № 48 (1). P. 27–41. DOI: 10.1007/s10694-010-0199-0.
13. Fire Safety in Museums: Simulation of Fire Scenarios for Development of Control Evacuation Schemes from the Winter Palace of the Hermitage / E. Kirik [et al.] // *Buildings*. 2022. № 12. P. 1546. DOI: 10.3390/buildings12101546.
14. Kirik E.S., Malyshev A.V. Testirovanie komp'yuternyh programm po raschetu vremeni evakuacii na primere modulya SigmaEva // *Pozharnaya bezopasnost'*. 2014. № 1. S. 78–85.
15. Raschetno-analiticheskij programmnyj kompleks «Sigma PB» po modelirovaniyu razvitiya pozhara i evakuacii / K.Yu. Litvincev [i dr.] // *Pozharnaya bezopasnost'*. 2016. № 4. S. 51–59.
16. Pedestrian Movement Simulation for Stadiums Design / E. Kirik [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. № 456. P. 012074. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012074.
17. Gosudarstvennyj Ermitazh. URL: <https://www.hermitagemuseum.org/wps/portal/hermitage/> (data obrashcheniya: 16.06.2022).

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 07.11.2024; одобрена после рецензирования: 26.11.2024;
принята к публикации: 28.11.2024

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 07.11.2024; approved after review: 26.11.2024;
accepted for publication: 28.11.2024

Информация об авторах:

Кирик Екатерина Сергеевна, старший научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения РАН (660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44), кандидат физико-математических наук, e-mail: kirik@icm.krasn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4394-0791>, SPIN-код: 8934-5681

Витова Татьяна Брониславовна, научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения РАН (660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44), кандидат технических наук, e-mail: vitova@icm.krasn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2149-3783>, SPIN-код: 7105-3456

Богданов Алексей Валентинович, заместитель генерального директора Государственного Эрмитажа (190000, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 34); доцент Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, e-mail: bogdanov@hermitage.ru, SPIN-код: 7725-6462

Сушкова Ольга Владимировна, начальник сектора пожарной безопасности Государственного Эрмитажа (190000, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., д. 34), кандидат технических наук, e-mail: sushkova.ov@hermitage.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6549-1638>, SPIN-код: 7485-4004

Information about authors:

Kirik Ekaterina S., senior researcher of Institute of computational modelling of the Siberian branch of the Russian academy of sciences (660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/44), candidate of physico-mathematical sciences, e-mail: kirik@icm.krasn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4394-0791>, SPIN: 8934-5681

Vitova Tatiana B., assistant researcher of Institute of computational modelling of the Siberian branch of the Russian academy of sciences (660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/44), candidate of technical sciences, e-mail: vitova@icm.krasn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2149-3783>, SPIN: 7105-3456

Bogdanov Alexey V., deputy general director of the State Hermitage museum (190000, Saint-Petersburg, Dvortsovaya naberezhnaya, 34); docent of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, e-mail: bogdanov@hermitage.ru, SPIN: 7725-6462

Sushkova Olga V., head of the sector fire safety of the State Hermitage museum (190000, Saint-Petersburg, Dvortsovaya naberezhnaya 34), candidate of technical sciences, e-mail: sushkova.ov@hermitage.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6549-1638>, SPIN: 7485-4004