



Research Article





Received: April 2, 2024

Accepted: April 16, 2024

Published: April 23, 2024

ISSN 2304-6295

Fire safety in shopping centers: Fire curtains for fire hazards localization and safe evacuation

Gravit, Marina Viktorovna¹ 
Kirik, Ekaterina Sergeevna² 
Kozupitsa, Ivan Sergeevich¹ 
Solntseva, Yaroslava Yurievna¹ 

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia; marina.gravit@mail.ru (G.M.V); kozupitsa.is@edu.spbstu.ru (K.I.S); solntseva.yayu@edu.spbstu.ru (S.Y.Y);

² Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; kirik@icm.krasn.ru (K.E.S)

Correspondence: * email kozupitsais@yandex.ru; contact phone [+79135930929](tel:+79135930929)

Keywords:

Multifunctional Building; Fire safety; Fire hazards; Evacuation time; Organizing evacuation; Fire curtains

Abstract:

The object of research is a typical three-story shopping center. The article evaluates the involvement of a fire curtain, in the form of a roller curtain, in ensuring fire safety during evacuation. **Method.** The "Sigma PB" software package was used to create a computer model of the shopping center and simulate the spread of fire and evacuation. Five scenarios were generated, and the spread of fire hazard factors and evacuation under fire conditions were simulated. **Results.** Based on the modeling, it was concluded that the absence of a fire curtain does not contribute to limiting the spread of fire hazard factors and does not worsen the condition of evacuation routes in the considered scenarios. The use of the fire curtain EI60 is inappropriate.

1 Introduction

По мере роста экономики в странах, увеличивается число крупных многофункциональных торговых центров. Особенностью торговых центров является сложные объемно-планировочные решения, большие торговые площади, протяженные атриумные пространства [1]. Кроме того, в типовых современных торговых центрах присутствуют помещения, функциональное назначение которых допускает применение горючих материалов и использование пожароопасного оборудования, что создает области с высоким риском возникновения и развития пожара [2], [3]. Примеры фасадов торговых центров представлены на рис. 1.

За последние годы произошло несколько пожаров в торговых центрах, которые привели к человеческим жертвами и материальному ущербу. Обострение проблемы связано с некомпетентностью персонала, слабыми профилактическими мерами и в целом низкой культурой безопасности населения [4], [5], а так же принятием в проектных решениях мер с недоказанной эффективностью. Кроме того, в торговых центрах зачастую присутствуют нарушения в части пожарной безопасности: отсутствие доступа к путям эвакуации; отсутствие надлежащих указателей эвакуационных выходов; ненадлежащее состояние технических средств систем обнаружения, оповещения и управления эвакуации людей при пожаре [6], [7].

В многофункциональных зданиях большой площади применяется такой подход как деление на пожарные отсеки [8]. Пожарный отсек — это часть здания, которая ограждена противопожарными преградами с нормируемыми пределами огнестойкости. На преграды возлагается задача локализации пожара в пределах пожарного отсека [9], [10].

Gravit, M.; Kirik, E.; Kozupitsa, I.; Solntseva, Y.

Fire safety in Shopping Centers: Fire curtains for fire hazards localization and safe evacuation; 2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **112** Article No 11203. doi: 10.4123/CUBS.112.3

Возникает задача оценки влияния противопожарных преград на организацию эвакуации в торговых центрах, в соответствии со следующими принципами – обеспечить своевременность и беспрепятственность эвакуации [11], которые выражены в выполнении условий

$$t_{i,эв} < t_{i,необ} = t_{i,бл} \cdot 0,8, \quad (1)$$

$$t_{i,ск} < 360 \text{ с} \quad (2)$$

соответственно для любого участка здания. $t_{i,эв}$, с, – время эвакуации последнего человека с i -го участка, $t_{i,необ}$, с – необходимое время эвакуации, определяемое через $t_{i,бл}$ – время блокирования участка, которое определяется по минимальному времени достижения рассматриваемыми опасными факторами пожара (ОФП) критических значений, где $t_{i,ск}$, с – время скопления людей с критической плотность $\approx 3,5$ чел./м². То есть критерий ограничивает продолжительность нахождения людей в состоянии плотного скопления, когда могут происходить эффекты асфиксии.

На условия эвакуации при пожаре влияют объемно-планировочные решения здания, расположения очага пожара, геометрические характеристики путей эвакуации, количество эвакуационных выходов доступных для эвакуации, время начала эвакуации [12]. На индивидуальный выбор эвакуационного выхода влияют множество факторов: привычный посетителю маршрут, прошлый опыт пребывания в торговом центре, доступность выхода и ассоциативные события [13]. Так же исход эвакуации при пожаре определяет количество людей при возникновении пожара и их характеристики [14], [15].



Рис. 1. – Фото торговых центров, сделанные авторами

Fig. 1. – The photographs of typical shopping centers were taken by authors

В представленном исследовании дается оценка участия противопожарной преграды, в виде рулонной шторы [16], [17], в обеспечении безопасных условий эвакуации при формировании пожарных преграды между пожарными отсеками на примере трехэтажного здания торгового центра.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- определены несколько сценариев эвакуации при пожаре (очаги выбраны так, чтобы проявить влияние противопожарной шторы динамику изменения состояния среды в формируемых отсеках, на формирование маршрутов эвакуации из отсеков);
- построена трехмерная модель здания для выполнения расчетов, выполнен ввод данных для моделирования разработанных сценариев;

- произведено моделирование развития пожара и эвакуации согласно разработанных сценариев;
- выполнен анализ результатов моделирования и дана оценка вносимого вклада противопожарной преграды в распространение ОФП и обеспечение безопасных условий на соответствующих маршрутах эвакуации;
- произведен анализ целесообразности принятого решения по установке противопожарной шторы EI60.

2 Materials and Methods

2.1 Materials

Рассматривается трехэтажное здание ТРЦ квадратной формы в плане. В ТРЦ предусмотрен фудкорт, объединённый с пешеходной галереей открытым проемом, атриумы, киноцентр с 7 залами разной вместимости (таблица 2), имеющий собственные эвакуационные выходы в лестничные клетки ЛК 5, ЛК6 (также могут быть задействованы ближайшие ЛК4 и ЛК7, но в контур пожарного отсека, относящегося к киноцентру, они не входят) и зону детских аттракционов, находящуюся в фойе. Также на первом этаже предусмотрена большая торговая площадь, используемая продуктовым магазином. Остальную торговую площадь занимают небольшие магазины по обе стороны от основных пешеходных галерей на втором и третьем этажах. По центру пешеходных галерей могут находиться небольшие торговые «островки».

Архитектурная высота принята 21 м, пожарно-техническая высота принята 18,0 м [18], размеры в плане 121м x 123м. По классу функциональной пожарной опасности здание относится к Ф3.1, так же имеются помещения, относящиеся к Ф2.1, Ф3.2, Ф3.5, Ф3.6, Ф.4.3, Ф5.1, Ф5.2 [19] (рис. 2 б). Для обеспечения эвакуации в здании предусмотрено десять незадымляемых лестничных клеток типа Н2 с выходами непосредственно на улицу (рис. 2 а), так же на первом этаже предусмотрено 11 рассредоточенных эвакуационных выходов из здания. Планы третьего этажа торгового центра представлены на рис. 2.

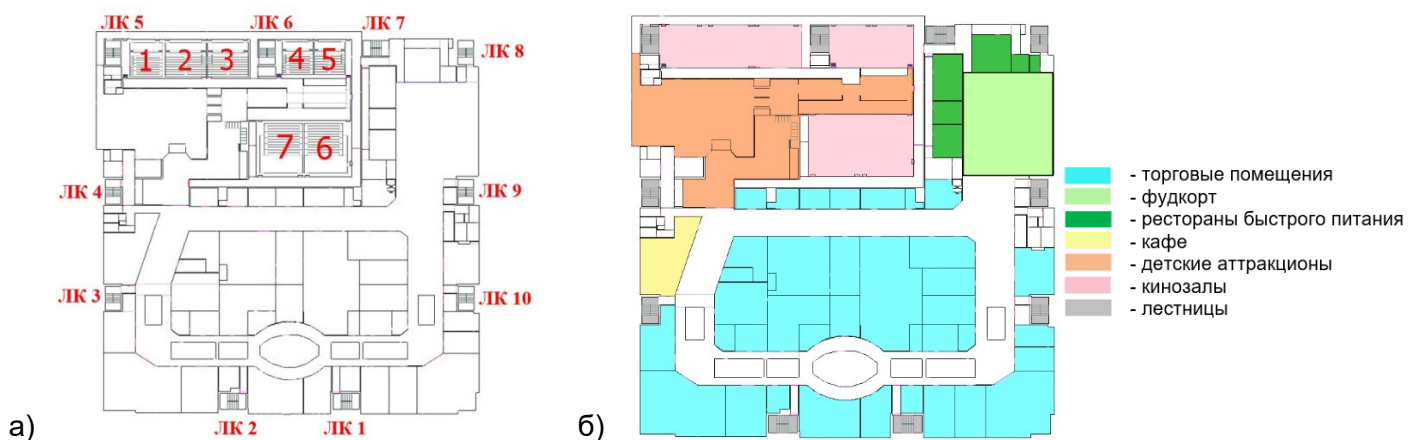


Рис. 2 – Расположение и нумерация лестничных клеток и залов кинотеатра (а), схема функционального зонирования 3-го этажа (б)

Fig. 2 – Location and numbering of stairwells and cinema halls(a), functional zoning scheme (б)

В ТРЦ предусматривается деление на пожарные отсеки. Так, в отдельный пожарный отсек выделен киноцентр. На границе соседних пожарных отсеков (то есть на границе между киноцентром (основной вход) и пешеходной галереей) установлена противопожарная преграда в виде противопожарной шторы (рис. 3, рис. 4б). Проемы - выходы к ЛК4 и ЛК7, оборудованы противопожарными дверями EI60.

В данной работе изучается влияние противопожарной шторы, перекрывающей основной вход в киноцентр, на процесс распространения опасных факторов пожара, формирование путей эвакуации и, как следствие, обеспечение условий на путях эвакуации.



Рис. 3 – Фото типовой противопожарной шторы, сделанные авторами
Fig. 3 – The photographs of typical fire curtains were taken by authors

Количество людей на каждом этаже принято в соответствии с таблицей 1. Рассматривались люди без ограничения мобильности (М0-3) и с ограничениями – М1-М43 (таблица 3). Минимальное расчетное количество людей, относящихся к различным группам мобильности составляет 401 человек, что в свою очередь является 4 % от общего количества людей. Согласно [25] расчетное число посетителей групп мобильности М1–М4 для зданий организации торговли составляет минимум 3 %. Данное условие соблюдается в каждом сценарии.

Таблица 1. Количество людей на этаже
Table 1. The number of people on the floor

Сценарии 1-4	Торговая площадь, м ²	Количество людей
1 этаж	8379	2793
2 этаж	9902	3301
3 этаж	5225	1742
Итого:		9799

Вместимость кинотеатров (таблица 2) и ресторанов быстрого питания принята исходя из полной посадки.

Таблица 2. Количество посадочных мест в залах кинотеатра
Table 2. The number of seats in the cinema halls

Номер зала	Количество посадочных мест
1	176
2	216
3	205
4	149
5	158
6	278
7	266
Итого:	1448

Таблица 3. Количество людей на этаже в соответствии с группами мобильности
Table 3. The number of people on the floor according to the mobility group

Сценарии 1-4	М1-М3	М4
1 этаж	146	15
2 этаж	153	0
3 этаж	87	0
Итого:	386	15

Люди группы мобильности М4, перемещающиеся на колясках, располагались только на первом этаже (это принятое ограничение не сказывалось на полученных выводах). Площадь проекции и скорости свободного движения принимались для представителей различных групп в соответствии с [24]. Общее количество людей, относящееся к группам мобильности,

расположенных в расчетной модели представлено в таблице 3. Минимальное расчетное количество людей, относящихся к различным группам мобильности составляет 401 человек, что в свою очередь является 4 % от общего количества людей. Согласно [25] расчетное число посетителей групп мобильности М2–М4 для зданий организации торговли составляет минимум 3 %. Данное условие соблюдается в каждом сценарии.

2.2 Methods

Для расчетов выбранных сценариев развития пожара использовалось российское программное обеспечение «Сигма ПБ» (<https://3ksigma.ru/>), реализующее полевую модель развития пожара [16], [20], [21] и индивидуально-поточную модель эвакуации [17].

Чтобы оценить влияние противопожарной преграды на обеспечение пожарной безопасности на путях эвакуации была построена компьютерная 3D-модель здания для выполнения моделирования развития пожара и эвакуации в отечественном программном обеспечении «Сигма ПБ» (Приказ Минкомсвязи России от 21.06.2017 № 382, Приложение 1, № пп.67, реестровый №3741), рис. 4(а).

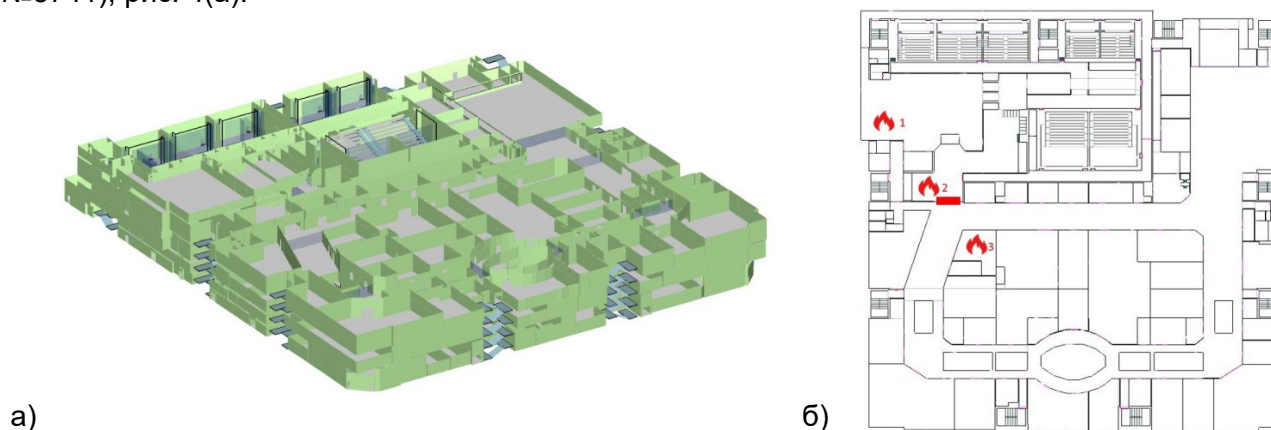


Рис. 4 – Модель здания в «Сигма ПБ» (а) и местоположение очагов пожара и противопожарной завесы (красная линия) на третьем этаже (б)

Fig. 4 – The model of the building in «Sigma FS» (a) and the location of the seats of fire and the fire curtain (red line) on the third floor (b)

Выполнено моделирование развития пожара и эвакуации для пяти сценариев. Очаги представлены на рис. 4б. Номер каждого сценария состоит из двух цифр. Первая цифра отражает наличие противопожарной завесы: 1 – завеса учитывается в расчете (это означает, что ОФП распространяются только в пределах пожарного отсека); 2 – завеса не учитывается в расчете (это означает, что ОФП распространяются по объему третьего этажа). Вторая цифра обозначает местоположение очага пожара в соответствии с рис. 4б.

Расчетная область для сценариев 1.1, 1.2 включает в себя группу помещений, относящихся только к киноцентру (детские аттракционы, кинозалы, и прилегающие коридоры), рис.5а. Очаги пожара №1 и №2 расположены в киноцентре (детские аттракционы, входная группа в киноцентр, рис. 4б).

Расчетная область для сценариев 2.1, 2.2, включает в себя элементы всего третьего этажа – то есть добавляются пешеходная галерея третьего этажа, зона фудкорта, пространство атриумов, рис.5б.

Расчетная область для сценария 2.3 совпадает со сценариями 2.1, 2.2, но дополнительно включает в себя торговое помещение с очагом пожара №3, рис. 4б.

Для моделирования развития пожара применялась полевая модель, которая позволяет рассматривать развития пожара в трехмерном пространстве без ограничений к пространственной структуре и образующимся течениям. Для выполнения расчетов выполняется дискретизация расчетной области и построение расчетной сетки, рис. 5: для дискретизации расчетной области выбран шаг сетки от 0,2х0,2х0,2 м3 - для помещений с очагом пожара, до 0,45х0,45х0,45 м3 – для объемов на удалении от очага. В ПО «Сигма ПБ» используются неортогональные структурированные сетки, поэтому дискретизация с любым шагом не приводит к искажению границ расчетной сетки относительно модели объекта.

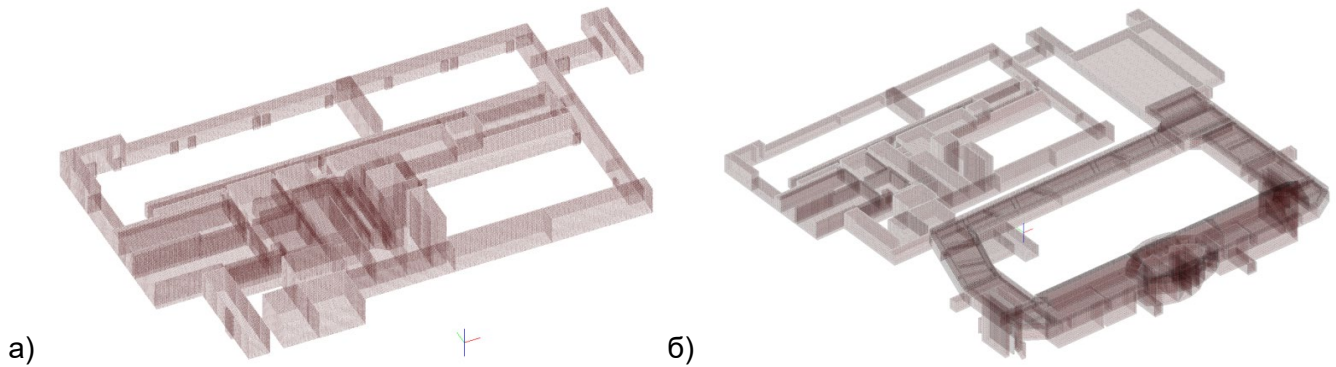


Рис. 5 – Расчетная сетка для моделирования распространения ОФП: для сценариев с противопожарной шторой (а), для сценариев без противопожарной шторы (б)

Fig. 5 – Computational grid for modeling the spread of fire hazards: for scenarios with a fire curtain (a), for scenarios without a fire curtain (b)

На границах расчетной области приняты адиабатные условия, то есть обеспечивалась максимальная концентрация тепла внутри расчетной области, что сказывалось на более быстром переносе продуктов горения, и следовательно – уменьшении времени блокирования путей эвакуации. Кроме того, в таких условиях оценку времени достижения температурой критических значений можно считать оценкой снизу, а оценку величины самого параметра (температуры) – оценкой сверху.

Температура внутри расчетной области в начальный момент времени и снаружи принималась равной 20°C.

В сценариях 1.1, 1.2, 2.1, 2.2. применялась одинаковая горючая нагрузка – кабели оборудования. Горючая нагрузка (ГН) выбиралась, исходя из функционального назначения помещений [22], [23]. В сценарии 2.3 в качестве нагрузки принята «Магазины» [24]. Площадь расположения нагрузки определялась из условия нарастания номинальной мощности в течение времени эвакуации с учетом линейной скорости принятой нагрузки, то есть не менее 8 м². Удельная масса нагрузки также принималась из соображений поддержания горения загоревшимся участком в течение всего времени моделирования эвакуации и равна 30 кг/м².

В расчетах принята скорость закрытия противопожарной шторы 0,15 м/с на основе технической документации. Высота проема составляет 3 метра, следовательно время, необходимое для полного закрытия шторы, равно 20 секундам. Учитывая задержку пожарной автоматики согласно [24], принято время закрытия шторы равное 80 секунд от начала пожара.

Время начала эвакуации для людей в сценариях 1.1, 1.2, 2.1, 2.2 принято равным 10 секунд для людей у очага пожара и 105 секунд - для остальных по расчету согласно [24]. Время начала эвакуации в сценарии 2.3 принято равным 7 секунд для людей у очага пожара и 85 секунд для остальных согласно [24].

3 Results and Discussion

Схемы эвакуации при очагах 1 и 2 варьировались в зависимости от опускания шторы. В случае отсутствия шторы (сценарии 2.1, 2.2) часть людей из фойе киноцентра могла использовать ЛК4 как ближайшую, рис.6. Тем самым уменьшалась нагрузка на основные лестницы ЛК5, ЛК6, ЛК7, обслуживающие киноцентр. При этом следует заметить, что начало эвакуации принималось одинаковым для всех кинозалов во всех сценариях. Общая численность без малого 1500 человек, Таблица 2. Планировка киноцентра такова, что зрители залов 6 и 7 в количестве 544 человека направляются в ЛК7 одним путем. Так же часть зрителей зала 5 и посетители из фойе и игровой зоны могут быть направлены в эту лестницу Это самая нагруженная ЛК во всех рассмотренных сценариях с максимальной продолжительностью эвакуации в лестничную клетку, Таблица 5. Условие беспрепятственности (2) при максимальной одновременной наполненности кинозалов обеспечивается на грани допустимого времени скопления при критической плотности, которая образуется при входе в ЛК. На входе в ЛК 5 и ЛК6 скопления так же выражены. Однако менее длительны.

При анализе результатов сосредоточимся на оценке влияния противопожарной шторы на состоянии путей эвакуации в киноцентре и прилегающей части 3-го этажа.

В Таблице 4 сведены описания рассмотренных сценариев и их результатов, проведен сравнительный анализ. В Таблице 5 представлены временные характеристики рассмотренных сценариев (время эвакуации и необходимое), замеренные на выходах в лестничные клетки.

Таблица 4. Описание сценариев пожара и результаты расчетов
Table 4. Fire situations description and calculation results

№	Описание сценария пожара	Краткое описание результатов расчетов
1	<p>Сценарий 1.1. Очаг № 1, на третьем этаже в зоне детских аттракционов, рис.4б. Противопожарная штора считается сработавшей, то есть ОФП распространяются только в объеме киноцентра, рис. 5а. Горючая нагрузка - кабели оборудования. Площадь области горения составляет 72,5 м²</p>	<p>Этот сценарий предполагает опущенную противопожарную штору и ограниченный киноцентром объем для распространения ОФП. Является самым опасным с точки зрения воздействия ОФП, достигших критических значений, на людей – на выходе в ЛК7 не соблюдается критерий своевременности, Таблица 5. Высота помещения детских игровых автоматов достигает 5 м, так же устройство припотолочной зоны таково, что образуются дымовые карманы глубиной 1,3 м, рис.7, что способствует первичному накоплению дыма в них и замедлению его распространения по объему эвакуационных путей. Однако ограничение объема, в котором распространяются ОФП за счет противопожарной шторы, является причиной критического задымления наиболее удаленной ЛК от очага (в сравнении с вариантом отсутствия шторы, сценарий 2.1). Условие своевременности (1) выполняется на входах в ЛК5, ЛК6, и не выполняется для ЛК7, Таблица 5, рис. 8а. Эвакуация из оставшейся части этажа проходит в безопасных условиях.</p>
2	<p>Сценарий 1.2. Очаг № 2, на третьем этаже у входной зоны в киноцентр, рис.4б. Противопожарная штора считается сработавшей, то есть ОФП распространяются только в объеме киноцентра, рис. 5а. В качестве горючей нагрузки выступают кабели оборудования. Площадь области горения составляет 28,5 м²</p>	<p>Этот сценарий так же предполагает опущенную противопожарную штору и ограниченный киноцентром объем для распространения ОФП. Однако, очаг находится в другом месте – у входа в киноцентр, рядом со шторой, на удалении от основных выходов из кинозалов. Такое расположение очага способствует более медленному блокированию эвакуационных коридоров и выходов на основные лестницы ЛК5, ЛК6, ЛК7 для посетителей киноцентра, за счет чего обеспечивается своевременная эвакуация зрителей киноцентра, то есть условие (1) для каждого участка киноцентра, Таблица 5, рис. 9а. Эвакуация из оставшейся части этажа проходит в безопасных условиях.</p>
3	<p>Сценарий 2.1. Очаг № 1, на третьем этаже в зоне детских аттракционов, рис.4б. Считается, что противопожарная штора не опускается, и ОФП распространяются по объему 3-го этажа, рис. 5б. В качестве горючей нагрузки выступают кабели оборудования.</p>	<p>Сценарий парный сценарию 1.1, считается, что противопожарная штора не опустилась. ОФП распространяются по всему объему пешеходных магистралей третьего этажа здания. Это сказывается на: - скорости задымления эвакуационных коридоров и выходов на основные лестницы ЛК5, ЛК6, ЛК7 для посетителей киноцентра – она снижается, - на увеличении необходимого времени ($t_{i,необ} = t_{i,бл} \cdot 0,8$) для каждой лестницы, Таблица 5.</p>



	<p>Площадь области горения составляет 72,5 м²</p>	<p>Это обстоятельство позволяет обеспечить своевременную эвакуацию зрителей киноцентра, то есть условие (1) для каждого участка.</p> <p>Возможность эвакуации из фойе киноцентра в ЛК4 незначительно разгружает лестницы киноцентра, время эвакуации уменьшается, Таблица 5.</p> <p>Распространение дыма в пешеходную галерею происходит со скоростью, при которой безопасные условия реализуются, рис.8б. Это связано с высотой фойе киноцентра (5,3 м) и устройством подвесного потолка в пешеходной галерее, см. п.5 Таблицы</p> <p>Эвакуация из оставшейся части этажа проходит в безопасных условиях: при выполнении условий (1) и (2). То есть факт отсутствия противопожарной шторы не повлиял на условия эвакуации на 3-м этаже в торговой части.</p>
4	<p>Сценарий 2.2. Очаг № 2, на третьем этаже у входной зоны в киноцентр, рис.4б.</p> <p>Считается, что противопожарная штора не опускается, и ОФП распространяются по объему 3-го этажа, рис. 5б.</p> <p>В качестве горючей нагрузки выступают кабели оборудования. Площадь области горения составляет 28,5 м²</p>	<p>Сценарий парный сценарию 1.2, считается, что противопожарная штора не опустилась. ОФП распространяются по всему объему пешеходных магистралей третьего этажа здания. Это сказывается на:</p> <ul style="list-style-type: none"> - скорости задымления эвакуационных коридоров и выходов на основные лестницы ЛК5, ЛК6, ЛК7 для посетителей киноцентра – она снижается, - на увеличении необходимого времени ($t_{i,необ} = t_{i,бл} \cdot 0,8$) для каждой лестницы, Таблица 5. Это обстоятельство позволяет обеспечить своевременную эвакуацию зрителей киноцентра. <p>Возможность эвакуации из фойе киноцентра в ЛК4 разгружает лестницы киноцентра, время эвакуации уменьшается, Таблица 5.</p> <p>Распространение дыма в пешеходную галерею происходит со скоростью, при которой безопасные условия реализуются, рис. 9б. Это связано с высотой фойе киноцентра (5,3 м) и устройством подвесного потолка в пешеходной галерее, см. п.5 Таблицы.</p> <p>Эвакуация из оставшейся части этажа проходит в безопасных условиях: при выполнении условий (1) и (2). То есть факт отсутствия противопожарной шторы не повлиял на условия эвакуации на 3-м этаже в торговой части.</p>
5	<p>Сценарий 2.3. Очаг № 3, на третьем этаже в торговом помещении напротив входа в киноцентр, рис.4б.</p> <p>Считается, что противопожарная штора не опускается, и ОФП распространяются по объему 3-го этажа, рис. 5б.</p> <p>В качестве горючего выступает нагрузка «Магазин». Площадь области горения составляет 41 м²</p>	<p>Данный сценарий рассмотрен с целью изучения воздействия пожара за пределами киноцентра (но в непосредственной близости) на состояние путей эвакуации в киноцентре при отсутствии преграды в виде противопожарной шторы.</p> <p>В этом случае минимизируется использование ЛК4 как посетителями киноцентра, так и посетителями торговой части этажа (поскольку этот маршрут предполагает движение в сторону очага). Минимизируется использование ЛК3, поскольку эта лестница находится не далеко от очага. Схема эвакуации в киноцентре соответствует сценариям 1.1 и 1.2, рис. 6а.</p> <p>При наличии свободного сообщения между двумя пожарными отсеками и распространении ОФП</p>

из торговой части этажа в киноцентр условия на путях эвакуации в киноцентре таковы, что условие своевременности эвакуации обеспечивается. Это происходит из-за большого объема, в котором происходит распространение ОФП. Кроме того, высота пешеходной галереи составляет 4.4 м, имеется подвесной потолок, частично замощенный «грильято». Это способствует прониканию ОФП в запотолочное пространство и более медленное оседание за счет сплошных частей потолка. Совокупность этих факторов создает противодымную защиту, способствующую очень медленному заполнению ОФП киноцентра в отсутствие противопожарной шторы, рис.10.

Таблица 5. Время окончания эвакуации и необходимое время для лестничных клеток в рассмотренных сценариях
Table 5. Fire situations description and calculation results

1	Время эвакуации ($t_{ЭВ} = t_{Н.ЭВ} + t_p$) и необходимое ($t_{необ} = 0,8 * t_{бл}$) на выходах в ЛК на 3 этаж для рассмотренных сценариев, с									
	1.1		1.2		2.1		2.2		2.3	
	$t_{ЭВ}$	$t_{необ}$	$t_{ЭВ}$	$t_{необ}$	$t_{ЭВ}$	$t_{необ}$	$t_{ЭВ}$	$t_{необ}$	$t_{ЭВ}$	$t_{необ}$
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ЛК3	203	*	203	*	203	**	203	**	130	298
ЛК4	114	*	114	*	114	764	114	**	152	390
ЛК5	244	345	244	622	256	360	256	616	278	768
ЛК6	379	392	379	796	358	465	358	796	592	**
ЛК7	493	460	493	750	445	528	445	**	402	602

*В силу учета при моделировании развития пожара противопожарной шторы, блокирование данной лестничной клетки не происходит в течение 1000 секунд от начала пожара (рассмотренный интервал при моделировании развития пожара)

** Лестничные клетки не были заблокированы в течение 1000 секунд от начала пожара

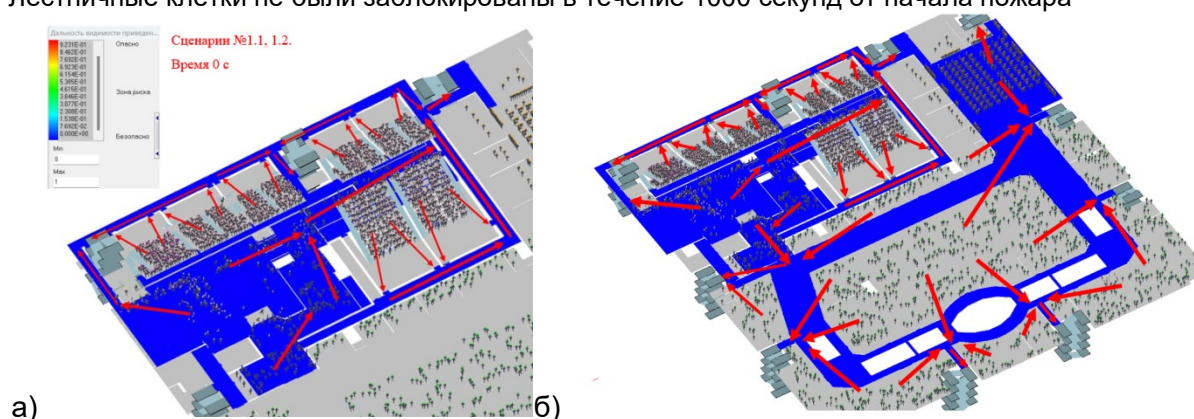


Рис. 6 – Направление движения людей при эвакуации из киноцентра в сценариях 1.1, 1.2, 2.3 (а) и 2.1, 2.2 (б) обозначено красными стрелками
Fig. 6 – The direction of movement of people during evacuation in situations 1.1, 1.2 (a) и 2.1, 2.2 (б) indicated by red arrows

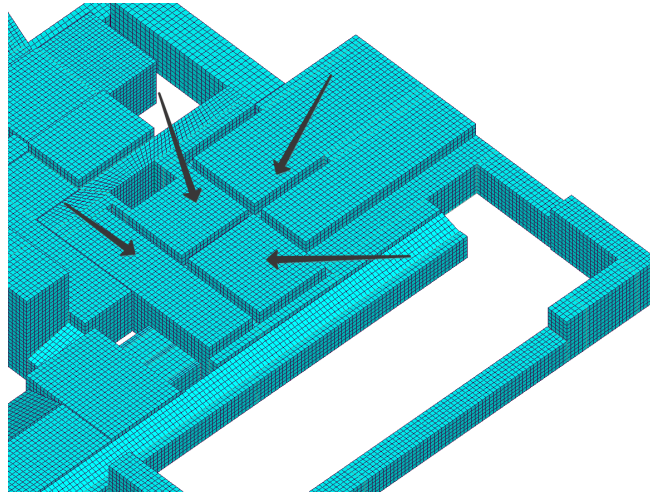


Рис. 7 – Расчетная сетка в киноцентре и дымовые карманы
Fig. 7 – Simulation grid in cinema center

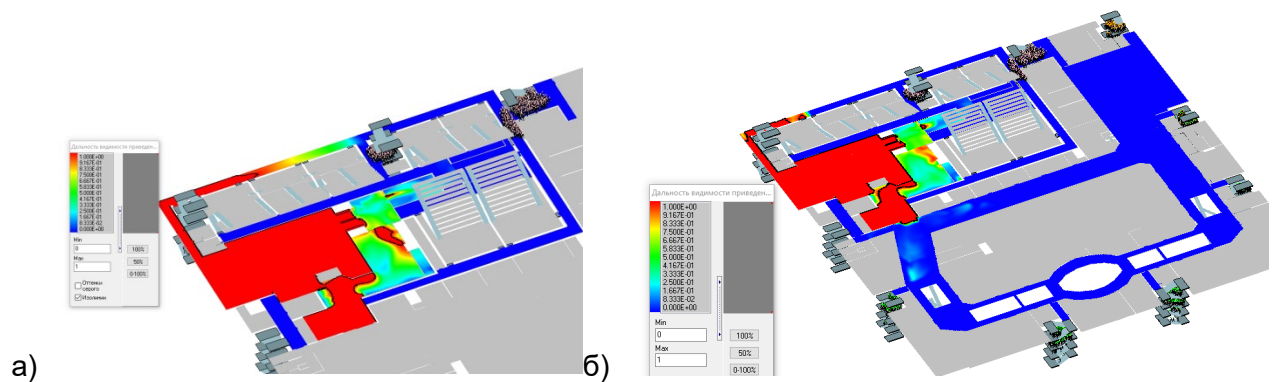


Рис. 8 – Положение людей при эвакуации и поля дальности видимости (приведенной) в сценариях 1.1 (а) и 2.1 (б) на 385 с (красный цвет соответствует критическому значению)
Fig. 8 – The position of people during evacuation and visibility fields for scenario 1.1 (a) и 2.1 (б) at 400 sec (red color corresponds to a critical value)

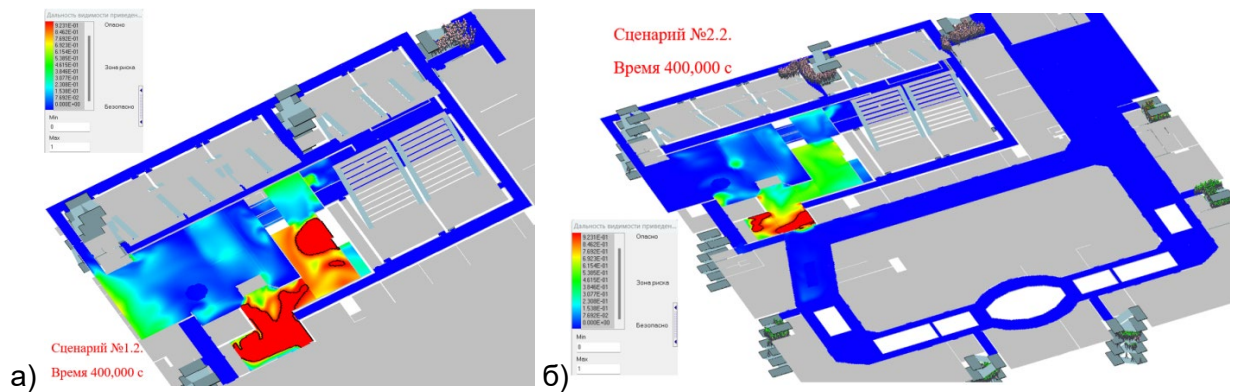


Рис. 9 – Положение людей при эвакуации и поля дальности видимости (приведенной) в сценариях 1.2 (а) и 2.2 (б) на 400 с (красный цвет соответствует критическому значению)
Fig. 9 – The position of people during evacuation and visibility fields for scenario 1.2 (a) и 2.2 (б) at 400 sec (red color corresponds to a critical value)

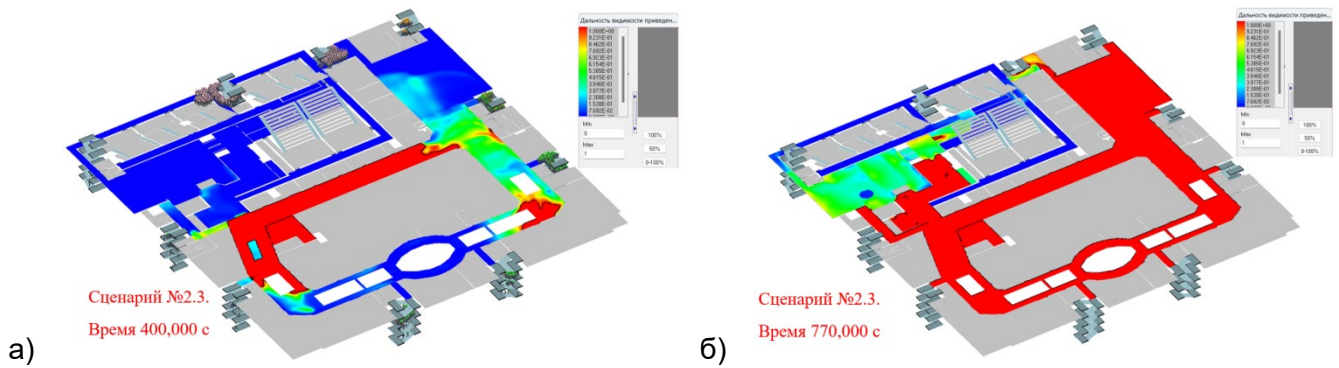


Рис. 10 – Положение людей при эвакуации и поля приведенной видимости в сценарии 2.3 на момент эвакуации 400 (а) и 770 (б) секунд соответственно (красный цвет соответствует значению критическому значению)

Fig. 10 – The position of people during evacuation and visibility fields for scenario 2.3 at 400 (a) and 770 (b) seconds respectively (red color corresponds to the value 70°C)

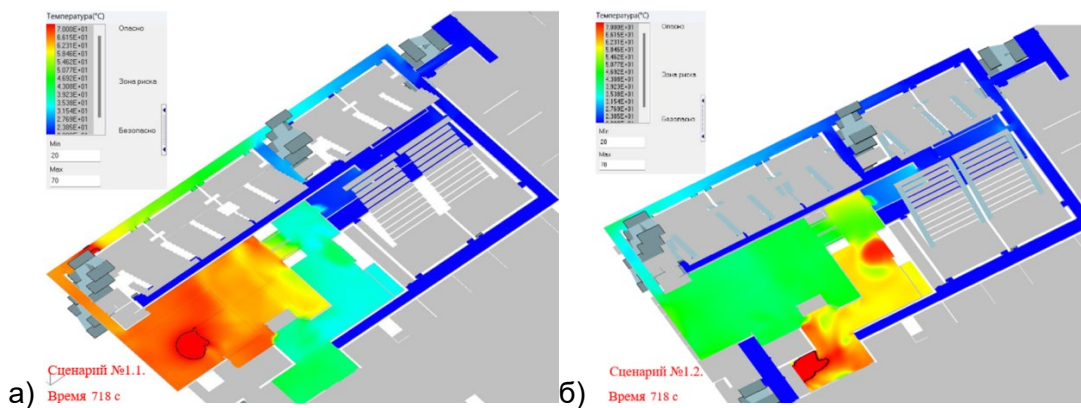


Рис. 11 – Поля температуры в сценариях 1.1 (а) и 1.2 (б) на момент 718с (красный цвет соответствует значению 70°C)

Fig. 11 – Temperature slice for scenarios 1.1 (a) and 1.2 (b) at 718 s (red color corresponds to the value 70°C)

В рассмотренных сценариях время блокирования во всех случаях определялось по первому ОФП, достигнутому критического значения. Во всех случаях это была дальность видимости. Критическое значение температуры на путях эвакуации достигалось существенно позднее. На рис. 11 представлены поля температуры на момент примерно 700 с для сценариев 1.1 и 1.2. Видно, что критическое значение температуры для человека, а именно 70°C, только начинает достигать ЛК5 на момент окончания эвакуации людей. Из чего можно сделать вывод, что в случае применения шторы, как элемента противодымной защиты достаточно предела EI15.

4 Conclusions

На основе анализа результатов расчетов распространения опасных факторов пожара и эвакуации людей для рассмотренного торгово-развлекательного центра сделаны следующие выводы:

1. Наличие/отсутствие противопожарной шторы не определяет успешность эвакуации, это связано с объемами планировочного решения, где распространяются ОФП. Высота помещений, наличие подвесного потолка создают «естественную» противодымную защиту - условия для замедления блокирования путей эвакуации и обеспечения на путях эвакуации безопасных условий.

2. Наличие противопожарной шторы, скорее приходится рассматривать, как негативный фактор: в рассмотренных сценариях наличие противопожарной шторы ограничивает объем, где распространяются ОФП, это способствует ухудшению состояния путей эвакуации и уменьшению времени блокирования, среди рассмотренных сценариев нашлась одна ситуация, где критерий своевременности не был обеспечен.



3. Наличие противопожарной шторы в рассмотренных сценариях уменьшает количество доступных путей эвакуации для посетителей фойе киноцентра, и тем самым делает эвакуацию через ЛК5, ЛК6, ЛК7 более продолжительной.

4. При использовании противопожарной шторы, на основании того, что максимальное время эвакуации с третьего этажа не превышает 10 минут можно сделать вывод о нецелесообразности использования противопожарной шторы с характеристиками выше E115. Соответственно решение по проектированию в данном здании противопожарной шторы E160, как способа защиты людей, является завышенным и не обоснованным с точки зрения обеспечения безопасных условий эвакуации в образованных объемах пожарных отсеков после опускания шторы.

5. Показано, что применение компьютерного моделирования развития пожара и эвакуации позволяет проверять эффективность принимаемых решений при построении СО ПБ объекта и является необходимым для подтверждения соответствия требованиям 123-ФЗ в части обеспечения безопасных условий эвакуации.

References

1. Ahn, C., Kim, J. and Lee, S. (2016) An Analysis of Evacuation under Fire Situation in Complex Shopping Center Using Evacuation Simulation Modeling. *Procedia - Social and Behavioral Sciences, Elsevier BV*, **218**, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.04.007>.
2. Godakandage, R., Weerasinghe, P., Gamage, K., Adnan, H. and Nguyen, K. (2024) A Systematic Review on Cavity Fires in Buildings: Flame Spread Characteristics, Fire Risks, and Safety Measures. *Fire*. <https://doi.org/10.3390/fire7010012>.
3. Reva, Yu. V. and Gerasimova, T.N. (2021) Modern Fire Safety Systems in Shopping and Entertainment Centers. *XXI Century. Technosphere Safety*, Irkutsk National Research Technical University, **6**, 303–308. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-3-303-308>.
4. Md. Main Uddin, S. M. Nawshad Hossain, Tanzila Aktar Shawon, Ashraf Uddin Fahim, Sabrina Sharmin and Rahman, M.M. (2023) ADDRESSING THE FIRE SAFETY PROBLEMS IN SHOPPING CENTRES OF DHAKA CITY: A CASE STUDY ON SOME SELECTED SHOPPING CENTRES IN MIRPUR AREA. *International Journal of Engineering Science Technologies*, **7**. <https://doi.org/10.29121/ijoest.v7.i6.2023.539>.
5. Efimov, A. A. and Shikhalev, D. V. (2022) Assessment of the behavior of the staff of shops of shopping and entertainment centers when organizing the evacuation of people. *Technology of Technosphere Safety*, **97**, 144–159. <https://doi.org/10.25257/tts.2022.3.97.144-159>.
6. Ha-Sung Kong, S.-Y.K. (2021) Evacuation Safety Evaluation in the Event of a Fire in a Shopping Center with a Connected Passageway in Korea. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, **12**. <https://doi.org/10.17762/turcomat.v12i5.956>.
7. Lama, S. (2022) Operational Assessment of Fire Safety Status of Existing Commercial Buildings at Birtamode, Jhapa, Nepal. *Journal of Advanced Research in Construction and Urban Architecture*, **7(3&4)**, 9–24. <https://doi.org/10.24321/2456.9925.202202>.
8. Rule book 2.13130.2020 T Fire protection systems. Ensuring fire resistance of objects of protection. <https://mchs.gov.ru/dokumenty/vse-dokumenty/6665>.
9. Gravit, M., Shabunina, D. and Nedryshkin, O. (2023) The Fire Resistance of Transformable Barriers: Influence of the Large-Scale Factor. *Fire*, **6**. <https://doi.org/10.3390/fire6080294>.
10. Yuen, A.C.Y., Chen, T.B.Y., Yang, W., Wang, C., Li, A., Yeoh, G.H., Chan, Q.N. and Chan, M.C. (2019) Natural Ventilated Smoke Control Simulation Case Study Using Different Settings of Smoke Vents and Curtains in a Large Atrium. *Fire*, **2**. <https://doi.org/10.3390/fire2010007>.
11. Fan, Y., Cui, H., Qin, J., Liu, C. and Huang, Q. (2024) A Case Study on the Evacuation of People during a Fire in the Workshop of a Large Factory. *Fire*, **7**. <https://doi.org/10.3390/fire7020047>.
12. Haghani, M., Lovreglio, R., Button, M.L., Ronchi, E. and Kuligowski, E. (2024) Human Behaviour in Fire: Knowledge Foundation and Temporal Evolution. *Fire Safety Journal*, **144**. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104085>.
13. Syarlianti, D., Hanan, H., Kusuma, H.E. and Tambunan, L. (2023) Experience with the Circulation Path as a Determinant Factor in Evacuation Exit Selection. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, **22**. <https://doi.org/10.1080/13467581.2022.2145213>.
14. Samoshin, D. (2004) Calculation of the Time of Evacuation of People. Problems and Prospects. *Fire and explosion safety*, Pozhnauka Publishing House LLC, **13**, 33–46. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17868660>.

Gravit, M.; Kirik, E.; Kozupitsa, I.; Solntseva, Y.

Fire safety in Shopping Centers: Fire curtains for fire hazards localization and safe evacuation;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **112** Article No 11203. doi: 10.4123/CUBS.112.3



15. Gravit, M., Dmitriev, I., Kuzenkov, K. and Lunyakov, M. (2019) Dependence of the Human Flow Density from the Staircase and Exit Width. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199105017>.
16. Lee, M., Lee, J. and Jun, C. (2021) An Extended Floor Field Model Considering the Spread of Fire and Detour Behavior. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **577**. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126069>.
17. Kirik, E., Litvintsev, K., Dekterev, A., Khasanov, I., Gavrilov, A., Malyshev, A., Harlamov, E. and Popel, E. (2019) Simulations of Fire Evacuations in "Sigma FS" Software as a Fire Safety Training Instrument. Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards.
18. Rule book 1.13130.2020 The systems of fire protection. Evacuation ways and exits. With Amendment No. 1. <https://mchs.gov.ru/dokumenty/vse-dokumenty/6664>.
19. Technical Regulations on Fire Safety Requirements: Federal Law of the Russian Federation No. 123-FZ Dated July 22, 2008 (as Amended by Federal Law No. 538-FZ of December 27, 2018). <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/1249/>.
20. Nedryshkin, O. and Gravit, M. (2018) Software complexes for modeling of dangerous fire factors. *Fire safety*, Research Institute for Fire Protection of All-Russian Order 'Badge of Honor', 38–46. <https://elibrary.ru/item.asp?id=35102012>.
21. Gravit, M. and Nedryshkin, O. (2016) Software complexes for modeling fire hazards. Actual problems of fire safety, 315–322. <https://elibrary.ru/item.asp?id=28817895>.
22. Koshmarov, U.A., Puzach, S. V and Andreev V V. (2000) Prediction of Indoor Fire Hazards. M.: *Academy of SFS of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, **118**, 9. <https://mchs.fun/wp-content/uploads/2021/08/koshmarov-yu.a.-prognozirovanie-ofp-v-pomeshhenii-2000.pdf>.
23. Zhou, Y.C., Hu, Z.Z., Yan, K.X. and Lin, J.R. (2021) Deep Learning-Based Instance Segmentation for Indoor Fire Load Recognition. *IEEE Access*, **9**. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3124831>.
24. Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated November 14, 2022 No. 1140 "On approval of the methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and fire compartments of various classes of functional fire hazard", <https://ivo.garant.ru/#/document/406577165>.
25. Rule book 59.13330.2020 Accessibility of buildings and structures for persons with reduced mobility. With Amendment No. 1. <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/117294>.
26. Akizuki, Y. (2024) Evacuation Route Design Based on Visibility for Reducing Evacuation Delays. *Fire Safety Journal*, **144**. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104099>.
27. Tannous, W.K. (2021) The Economic Cost of Unwanted Automatic Fire Alarms. *Fire Safety Journal*, **124**. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103394>.
28. Yan, J., He, G., Basiri, A., Hancock, C. and Yeboah, S.K. (2024) The Impact of Postures and Moving Directions in Fire Evacuation in a Low-Visibility Environment. *Sensors*, **24**. <https://doi.org/10.3390/s24051378>.
29. Xu, H., Wei, Y., Tan, Y. and Zhou, Q. (2024) A BIM-FDS Based Evacuation Assessment of Complex Rail Transit Stations under Post-Earthquake Fires for Sustainable Buildings. *Buildings*, **14**. <https://doi.org/10.3390/buildings14020429>.
30. Wang, P., Dai, H., Yu, X., Wang, Q., Li, S. and Jia, C. (2024) Fire-Spread Characteristics and Evacuation Plan Optimization of Old Style Multi-Story Student Apartments. *Fire*, **7**. <https://doi.org/10.3390/fire7030072>.
31. Sazonova, S., Zvyaginceva, A. and Osipov, A. (2021) Simulation of Scenarios for the Development of a Fire in a Shopping and Entertainment Center. *Modeling of systems and processes*, **14**. <https://doi.org/10.12737/2219-0767-2021-14-3-50-59>.