

УДК 614.8

doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.67.64.005

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ В ДОШКОЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЯХ

*Калач А.В.<sup>1,2</sup>, д-р хим. наук, профессор; Вытовтов А.В.<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
Брюхов Е.Н.<sup>2</sup>, канд. пед. наук, Калач Е.В.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, Мартинович Н.В.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Воронежский государственный технический университет*

<sup>2</sup>*Уральский институт ГПС МЧС России СПСА*

<sup>3</sup>*Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России*

**Аннотация:** Метод ситуационного моделирования использован для описания развития пожароопасных ситуаций на территории дошкольных учреждений с целью оптимизации путей эвакуации. Особое внимание уделено выполнению требований нормативных правовых документов в сфере пожарной безопасности. Предложенный подход открывает возможности эффективного совместного моделирования развития пожаров и эвакуации людей из помещений. По результатам вычислительных экспериментов даны рекомендации по изменению геометрических параметров помещений исследуемых объектов защиты для оперативной эвакуации людей в случае пожара.

**Ключевые слова:** моделирование, оценка рисков, дошкольные учреждения, пожар.

## MODELING OF FIRE-HAZARDOUS SITUATIONS IN PRESCHOOL INSTITUTIONS

*Kalach A.V.<sup>1,2</sup>, Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Chemical Sciences,  
Full Professor; Vytovtov A.V.<sup>1</sup>, Ph.D. of Engineering Sciences; Bryukhov E.N.<sup>2</sup>, Ph.D. of  
Pedagogic Sciences; Kalach E.V.<sup>1</sup>, Ph.D. of Engineering Sciences, Docent; Martinovich N.V.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Voronezh State Technical University*

<sup>2</sup>*Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia*

<sup>3</sup>*Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia*

**Abstract:** The situational modeling method used to describe the development of fire-hazardous situations on the territory of preschool institutions in order to optimize evacuation routes. Particular attention paid to meeting the requirements of regulatory legal documents in the field of fire safety. The proposed approach opens up the possibility of effective joint modeling of the development of fires and evacuation of people from premises. Based on the results of computational experiments, recommendations given for changing the geometric parameters of the premises of the studied objects of protection for the prompt evacuation of people in case of fire.

**Keywords:** modeling, risk assessment, preschool institutions, fire

Статистические данные последних лет показывают постоянный рост природных и техногенных пожаров и катастроф в мире. Этот факт означает, что применение современных

методов регулирования устойчивого состояния сложных организованных систем недостаточно эффективно. Причина данных проблем объясняется отсутствием исследования системных связей и закономерностей функционирования, а также ограниченностью модельного описания противопожарного состояния объекта и обстоятельств, влияющих на него косвенно, либо в результате воздействия комплекса противокатастрофных мероприятий и мер [1]. Таким образом, системные исследования пожароопасных ситуаций на основе риск-ориентированного подхода являются актуальной задачей.

Кроме того, в условиях современных реалий, вызванных новой коронавирусной инфекцией, происходит всеобщее переосмысление ранее утвержденных принципов функционирования различных секторов экономики. Не осталась в стороне и строительная отрасль, в которой от проектировщиков требуют создавать здания с максимальной экономической рентабельностью, при этом не нарушая действующего законодательства, что не всегда предоставляется возможным. Примерами подобных ситуаций служат следующие:

- усложнение организационной схемы объекта в плане, путем ограничения длины эвакуационного пути до лестничной клетки, что позволяет повысить освещенность помещений, уменьшить площадь коридоров, максимально эффективно разместить эвакуационные выходы;

- для дошкольных учреждений действует норма о необходимости двух эвакуационных выходов для каждого помещения, в котором пребывает более 10 человек, причем в старой и новой редакции эвакуационные пути и выходы, указывается помещение, а не групповая ячейка. Также продолжает действовать требование к проектированию не менее двух рассредоточенных эвакуационных выходов. Два документа прямо не противоречат друг другу, однако создают условия, осложняющие работу проектировщиков;

- в новой трактовке нормативных документов введено ограничение на эвакуацию через соседнее помещение и, если из помещения требуется устройство не менее 2-х эвакуационных выходов. Введено ограничение, что через одно соседнее помещение допускается предусматривать не более 50% таких выходов. Следует отметить, что к уже существующим зданиям, и прошедшим экспертизу проектной документации данное требование не относится, но оно значительно усложняет обеспечение двух выходов для каждого помещения с количеством пребывающих более десяти человек;

Специалисты отдела надзорной деятельности и профилактической работы преимущественно при проведении проверок используют метод сопоставления фактического состояния объекта защиты с требованиями нормативных документов по пожарной безопасности, в соответствии с [2], что не позволяет дифференцировано выполнить требования нормативных документов, реализуя понятие, когда пожарная безопасность объекта защиты считается обеспеченной. Обратной стороной вопроса является требование технического регламента, который вводит условие об обязательном выполнении нормативного значения пожарного риска. Значения риска должны быть, обеспечены при разработке системы обеспечения пожарной безопасности специалистами проектных организаций.

Для зданий Ф1.1 в действующей методике оценки пожарного риска [3], установлен специальный порядок расчета, включающий большое количество анализируемых параметров, влияющих на расчетные значения пожарного риска в виде установленных коэффициентов, а также в [4] для дошкольных учреждений введен коэффициент ( $K_{эв,i}$ ), учитывающий соответствие путей эвакуации требованиям нормативных документов по пожарной безопасности и определены условия: если нормы выполняются значение составляет 0,8, в ином случае принимают равным 0.

Отметим, что рассматривая объект защиты, принимают во внимание год постройки, дата сдачи проектной документации в экспертизу [5] и для зданий, построенных под старые требования, допускается использовать старые требования, даже если они предъявляют более низкие требования пожарной безопасности в сравнении с действующими [6].

Таким образом, это приводит к тому, что для одинаковых зданий, построенных в разные годы значения пожарного риска будут различны. Поэтому в настоящем исследовании предлагается провести натурный и вычислительный эксперимент по варьированию значений коэффициента  $K_{эв,i}$  для зданий Ф1.1.

На рис. 1. представлен алгоритм определения коэффициента на основе обнаруженных нарушений, тогда как математическая модель будет обладать адекватностью в пределах от 0 до 0,8. Первым фактором будет являться количество нарушений, снятых с контроля в связи с действием старых норм. Второй фактор - группа к которой относится нарушение [7]. В связи с неоднородным влиянием на риск нарушений в размерах пути эвакуации и в противопожарных ограждениях экспертным образом определены их весовые коэффициенты [8].

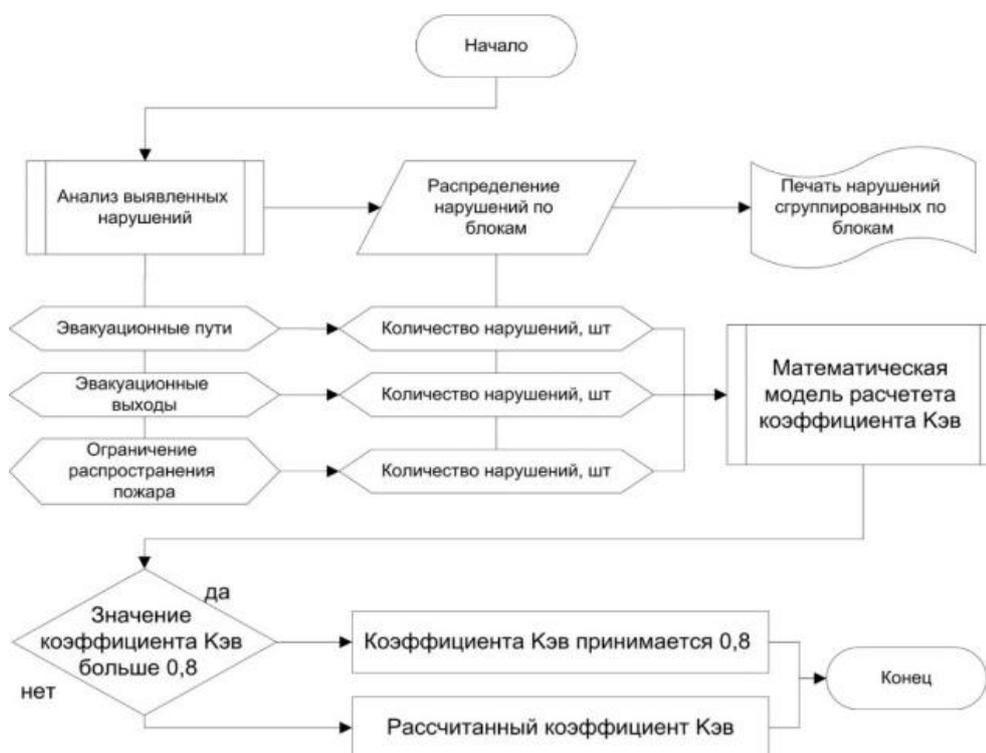


Рисунок 1. Схема алгоритма расчета коэффициента  $K_{эв}$

Алгоритм описывает порядок определения коэффициента соответствия путей эвакуации требованиям пожарной безопасности; случаи, когда выявленные отступления допускается не применять, так как здание построено раньше выхода соответствующих положений.

Вычислительное моделирование проведем на примере детского сада. Здание спроектировано в 2016 году. Надземная часть здания трехэтажная, подземная один этаж. Состоит из трех секций, конструктивно выделенных в отдельные блоки, в каждом из которых располагается две групповые ячейки на этаже. Рассматриваемый объект имеет сложную блочную форму с диагональным смещением. Здание детского сада спроектировано в соответствии п.6.7.10 и таблицей № 6.12 СП2.13130.21012 и п.5.2.34 изм. №1 СП 1.13130.2009: количество мест - 330; степень огнестойкости здания - II; класс конструктивной пожарной опасности - СО; этажность здания - 3; на 3-м этаже здания запроектированы помещения только для старших групп, зал для физкультурных занятий, служебно-бытовые помещения; из помещений групповых (одновременное пребывание более 10 человек) запроектированы рассредоточенные выходы на две лестничные клетки; входные двери групповых ячеек запроектированы samozакрывающиеся, укомплектованные дверными закрывателями типа ЗД-1 по ГОСТ 5091-78\*, уплотняющими прокладками по ГОСТ 10174-72 и дверными упорами типа УД-1 по ГОСТ 5091-78. В здании объекта защиты запроектирована автоматическая пожарная

сигнализация [9] с дополнительной передачей сигнала о пожаре непосредственно в подразделение пожарной охраны, в соответствии с чем, здание запроектировано 3-этажным [10]. Проектное решение соответствует требованию п.6.7.12 СП 2.13130.2012.

Для расчета коэффициента примем пять эталонных участка с нарушениями пожарной безопасности. Число нарушений варьируем в диапазоне от 1 до 10. Количество групп нарушений: первая – эвакуационные пути и выходы, вторая – ограничение, распространяя пожара на объектах защиты. Необходимо отметить, что нарушение может быть отнесено ко второму блоку только в случае если оно будет регламентировано сводом правил эвакуационные пути и выходы.

Для получения коэффициента использовано время эвакуации по фрагменту пути здания детского дошкольного учреждения [11]. Расчет эвакуации выполнен в программном обеспечении СИТИС Флоутек 4.10. Для каждого из пяти эталонных участков установлено время эвакуации.

**Сценарий 1.** При моделировании наиболее неблагоприятного сценария один выход заблокирован, по п. 4.2.17 СП 1.13130.2020, пожар принят в раздевалке, помещение 301. Данный сценарий блокирует лестничную клетку 318 и ближайший к ней эвакуационный выход, расположенный в осях И-Ж / 8-9. Количество этажей: 1, Количество выходов: 1, Количество человек: 80.



Рис. 2 Графическая интерпретация реализации сценария 1 Актовый зал  
(а – нарушения, б – без нарушений)

На рис. 2 (б) представлен случай, когда эвакуационный выход сдвинут вправо, что обеспечивает выполнение требований по рассредоточенности для старой и новой нормативной базы. Уменьшение времени эвакуации происходит за счет сокращения эвакуационного пути [12]. Как видно из рисунка выполнение требования по рассредоточенности сократило путь эвакуации по коридору.

**Сценарий 2.** В сценарии предполагаем, что пожар происходит в помещении № 101 в осях И-К / 2-4 и блокирует эвакуационный выход, лестничная клетка оси К-Л / 2-3. Пожарно-технические характеристики горючей нагрузки выбраны исходя из справочных данных [13]. Данная лестничная клетка является вторым эвакуационным выходом для двух групповых ячеек. Сценарий не предусматривает эвакуацию всего персонала учреждения, в связи, с чем моделирование проведено только для 70 воспитанников, двух воспитателей и двух нянечек. В сценарии предусматривается десять нарушений от действующих нормативных документов. Нарушена ширина эвакуационных выходов в девяти местах и ширина пандуса.

На рис. 3 наглядно представлено изменение объемно-планировочных решений. Приведение объемно-планировочных решений в соответствие с нормами позволяет увеличить скорость эвакуации из здания [14].



Рис. 3 Графическая интерпретация реализации сценария 2 групповые ячейки (а – нарушения, б – без нарушений)

В исследовании применяли факторный эксперимент с двумя переменными [15]. Результаты вычислительного эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1. Матрица плана эксперимента

№	План эксперимента		
	коэффициент $K_{эв1}$	Группа G1	Количество нарушений N1
1.	+1	+1	-1
2.	+1	+1	+1
	коэффициент $K_{эв2}$	Группа G2	Количество нарушений N1
3.	+1	+1	-1
4.	+1	+1	+1

В обновлённой редакции СП 1.13130.2020 изменился порядок расчета расстояния между эвакуационными выходами. В действующих требованиях для определения данного значения необходимо наибольшую диагональ помещения разделить на два [17]. Осуществим сравнительный расчет двух методик на предмет соответствия требованиям пожарной безопасности помещения первого этажа №103 спальная комната групповой ячейки на тридцать кроватей. Рассчитаем рассредоточенность для выбранного помещения:

$$L \geq \frac{1,5\sqrt{(6 + 12) \times 2}}{3 - 1} = 4,5 \text{ м.}$$

По новой редакции методики определяем диагональ помещения, она составляет 13,8 м. Полученное значение делим на два, и получаем требуемое расстояние равное 6,9 м. Полученное значение вводит и обеспечивает более строгие требования к расстоянию между эвакуационными выходами [18].

Для исследуемого объекта защиты фактическое расстояние между эвакуационными выходами, принятыми про проекту, составляет 5 м. Из представленных расчетов видно, что этот факт не противоречит старым нормам [19]. Результаты вычислительного эксперимента представлены в табл. 2.

**Таблица 2. Результаты проведенного вычислительного эксперимента**

№	План			Данные		Результаты, время выхода $t$ ; повторы				
	$K_{эв1}$	$G_1$	$N_1$	Группа 1	п шт.	1	2	3	4	5
1.	+1	-1	-1	1	1	0,88	0,92	0,89	0,91	0,93
2.	+1	-1	+1	1	10	0,36	0,31	0,39	0,35	0,38
3.	+1	+1	-1	2	1	1	0,99	0,98	1	0,97
4.	+1	+1	+1	2	10	0,86	0,86	0,87	0,88	0,80

Для описания полученных данных использовали линейную регрессию вида:

$$K_{эв} = 0,8 \times (\delta_0 - \delta_2 \times N_1) \times (\delta_0 - \delta_2 \times N_1) \quad (1)$$

Для рассматриваемых сценариев полученная зависимость имеет вид:

$$K_{эв} = 0,8 \times (0,944 - 0,03867 \times N_1) \times (1,0017778 - 0,0137778 \times N_2)$$

Выражение (1) позволяет прогнозировать параметры, значения которых превышают граничные условия, установленные методикой расчета пожарного риска [20]. Например, количество выявленных нарушений может превысить число десять, или в данной группе не будет обнаружено ни одного нарушения.

Для исключения таких случаев предлагается использовать выражение (2). Уравнение позволяет гарантированно получить значение коэффициента  $K_{эв,i}$  в пределах от 0 до 0,8.

$$K_{эв,i} = \begin{cases} K_{эв}, & \text{если } K_{эв} < 1 \\ 0,8, & \text{если } K_{эв} \geq 0,8 \\ 0, & \text{если } K_{эв} \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Состояние объекта защиты, характеризующееся возможностью возникновения воздействия на людей и имущество опасных факторов пожара, в рамках действующего законодательства выражено термином «Пожарная опасность объекта защиты». Оценить вероятность воздействия на людей продуктов горения в рамках утвержденных методик можно только при расчете пожарного риска [21]. В исследовании представлены результаты вычислительного моделирования значений коэффициента соответствия путей эвакуации требованиям норм, с учетом вновь вводимых требований руководящих документов.

Для расчета значений пожарного риска и отработки приложенной методики в здании детского сада выбран самый неблагоприятный сценарий [22]. В этом случае, полагали, что пожар произошел в пищеблоке в помещении, не защищенном противопожарной дверью №130 комната персонала пищеблока.

Для моделирования использовали помещения пищеблока, поликлиники и две групповые ячейки, выделенные противопожарными преградами и объединенные в крыло детского сада. Коэффициент, учитывающий соответствие систем противопожарной защиты, направленных на обеспечение безопасной эвакуации людей при пожаре [23], находящихся в помещениях объекта защиты, требованиям нормативных документов по пожарной безопасности определяли по формуле (1):

$$K_{эв} = 0,8 \times (0,944 - 0,03867 \times 3) \times (1,0017778 - 0,0137778 \times 4) = 0,6270643$$

В этом случае индивидуальный пожарный риск составит.

$$Q_B = 1,04201 \cdot 10^{-6} > Q_B^H = 10^{-6}$$

Условие выполняется, следовательно, индивидуальный пожарный риск в помещениях объекта защиты превышает допустимого значения, установленного Федеральным законом от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

Полученные численные значения пожарного риска учитывают нарушение требований пожарной безопасности, действующих документов. А именно допущено сужение трех эвакуационных выходов и отсутствуют четыре противопожарные двери при выходе из групповых ячеек.

Проведем расчет с заменой обычных дверей при выходе из групповых ячеек на противопожарные.

$$K_{эв} = 0,8 \times (0,944 - 0,03867 \times 3) \times (1,0017778 - 0,0137778 \times 0) = 0,6635696$$

Результат выражения не нарушает граничных условий модели. Расчетное значения индивидуального пожарного риска составит:

$$Q_{в} = 0,93985 \cdot 10^{-6} < Q_{в}^н = 10^{-6}$$

Условие выполняется, следовательно, индивидуальный пожарный риск в помещениях объекта защиты не превышает допустимого значения.

Таким образом, по результатам моделирования установлено, что требуемое условие безопасности выполняется, следовательно, индивидуальный пожарный риск в помещениях дошкольного учреждения не превышает допустимого значения. Для обеспечения безопасности людей на объекте защиты необходимо установить четыре противопожарные двери.

Кроме того, рассматриваемый сценарий наиболее неблагоприятен, так как в нем присутствует пожар в пищеблоке и как следствие вероятность пожара взята как для предприятия питания. В связи с тем, что другие сценарии пожароопасных ситуаций маловероятно, так как установлено, что вероятность пожара на кухне в 29 раз больше чем в групповой ячейке, моделирование иных сценариев не целесообразно.

Предложенный подход открывает возможности эффективного совместного моделирования развития пожаров и эвакуации людей из помещений. Это позволит по результатам вычислительных экспериментов выдавать рекомендации по изменению геометрических параметров помещений для более оперативной эвакуации людей в случае пожара.

Модельные описания развития пожаров необходимы не только в практических целях, например, для оптимизации путей эвакуации, но и при расчетах мощности систем вентиляции или при выборе способов пожарной защиты.

### Литература:

1. Ramli N., Ghani N.A., Ahmad N. et al. Psychological Response in Fire: A Fuzzy Bayesian Network Approach Using Expert Judgment // Fire Technol. – 2021. – 57. – 2305-2338. – DOI 10.1007/s10694-021-01106-0
2. Еремина Т. Ю., Богданов А. В., Сушкова О. В., Юг А. Исследование особенностей процесса эвакуации для объектов культурного наследия // Пожаровзрывобезопасность. – 2019. – Т. 28. – № 1. – С. 54-66. – DOI 10.18322/PVB.2019.28.01.54-66.
3. Панов А. А., Журавлев С.Ю., Журавлев Ю. Ю. Независимая оценка риска и исходные данные для расчета пожарного риска в общественных зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности // Пожаровзрывобезопасность. – 2019. – Т. 28. – № 5. – С. 9-18. – DOI 10.18322/PVB.2019.28.05.9-18.
4. Захматов В. Д., Турсенев С. А., Чернышов М. В., Адаев А.А., Бекасов А.В. Новые средства обеспечения эвакуации в общественных зданиях с массовым пребыванием людей // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27. – № 5. – С. 61-69. – DOI 10.18322/PVB.2018.27.05.61-69.
5. Kodur V.K.R., Venkatachari S. & Naser M.Z. Egress Parameters Influencing Emergency Evacuation in High-Rise Buildings // Fire Technol. – 2020. – 56. – 2035-2057. – DOI 10.1007/s10694-020-00965-3
6. Kountouris Y. An Assessment of the Relationship Between Daylight Saving Time, Disruptions in Sleep Patterns and Dwelling Fires // Fire Technol. – 2021. – 57. – 123-144. – DOI 10.1007/s10694-020-00983-1

7. Deere S. et al. An evacuation model validation data-set for high-rise construction sites // *Fire Safety Journal*. – 2021. – Т. 120. – С. 103118. – DOI 10.1016/j.firesaf.2020.103118.
8. Chu M.L., Law K.H. Incorporating Individual Behavior, Knowledge, and Roles in Simulating Evacuation // *Fire Technol.* – 2019. – 55. – 437–464. – DOI 10.1007/s10694-018-0747-6
9. Gilbert S.W. Estimating Smoke Alarm Effectiveness in Homes // *Fire Technol.* – 2021. – 57. – 1497–1516. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01072-z>.
10. Hamilton G.N., Lennon P.F. & O’Raw J. Toward Fire Safe Schools: Analysis of Modelling Speed and Specific Flow of Children During Evacuation Drills // *Fire Technol.* – 2020. – 56. – 605–638. – DOI 10.1007/s10694-019-00893-x
11. Kholshchevnikov V. V., Samoshin D. A., Parfyonenko A. P., Belosokhov I. P. Study of children evacuation from pre-school education institutions // *Fire and Materials*. – 2012. – Vol. 36. – No 5-6. – P. 349-366. – DOI 10.1002/fam.2152
12. Тимофеев В. Д. Актуальность исследований уровня осведомленности студентов, проживающих в общежитии, о пожарной безопасности // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2020. – Т. 29. – № 1. – С. 69-77. – DOI 10.18322/PVB.2020.29.01.69-77.
13. Королев Д.С., Каргашилов Д.В., Сорокина Ю.Н., Калач А.В. Прогнозирование основных показателей пожаровзрывоопасности органических соединений с помощью дескрипторов и искусственных нейронных сетей, используемых в расчете пожарного риска // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2015. – Т. 24. – № 9. – С. 32-38. – DOI 10.18322/PVB.2015.24.09.32-38.
14. Hunt, A.L.E., Galea, E.R., Lawrence, P.J. et al. Simulating Movement Devices Used in Hospital Evacuation // *Fire Technol.* – 2020. – 56. – 2209–2240. – DOI 10.1007/s10694-020-00971-5
15. Korolev D.S., Vytovtov A.V., Kargashilov D.V., Odnolko A.A., Denisov M.S. Mathematical simulation of the forecasting process of the fire hazard properties of substances // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, – 2020. – 52025.
16. Spearpoint, M., Hopkin, C. A Study of the Time of Day and Room of Fire Origin for Dwelling Fires // *Fire Technol.* – 2020. – 56. – 1465–1485 (2020). – DOI 10.1007/s10694-019-00934-5.
17. Еремина Т. Ю., Юг А. Некоторые аспекты основ подготовки методических рекомендаций по организации учебной эвакуации детей различного возраста // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2018. – Т. 27. – № 4. – С. 6-12. – DOI 10.18322/PVB.2018.27.04.6-12.
18. Bode N.W.F., Codling E.A. Exploring Determinants of Pre-movement Delays in a Virtual Crowd Evacuation Experiment // *Fire Technol.* – 2019. – 55. – 595–615. – DOI 10.1007/s10694-018-0744-9
19. Danial S.N., Smith J., Khan F. et al. Human-Like Sequential Learning of Escape Routes for Virtual Reality Agents // *Fire Technol.* – 2019. – 55. – 1057–1083. – DOI 10.1007/s10694-019-00819-7
20. Krasuski A., Krenski K. A-Evac: The Evacuation Simulator for Stochastic Environment // *Fire Technol.* – 2019. – 55. – 1707–1732. – DOI 10.1007/s10694-019-00827-7
21. Forsberg M., Kjellström J., Frantzych H. et al. The Variation of Pre-movement Time in Building Evacuation // *Fire Technol.* – 2019. – 55. – 2491–2513. – DOI 10.1007/s10694-019-00881-1
22. Zhiming F., Wei L., Xiaolian L. et al. A Multi-Grid Evacuation Model Considering the Threat of Fire to Human Life and its Application to Building Fire Risk Assessment // *Fire Technol.* – 2019. – 55. – 2005–2026. – DOI 10.1007/s10694-019-00840-w
23. Ronchi E. Developing and validating evacuation models for fire safety engineering // *Fire Safety Journal*. – 2021. – Т. 120. – 103020. – DOI 10.1016/j.firesaf.2020.103020.