

УДК 614.849

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.33.2.025](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.33.2.025)

## Об одном способе управления условием безопасности людей при моделировании эвакуации

Д.В. Шихалев

*Академия Государственной противопожарной службы МЧС России,  
Москва, Российская федерация*

**Резюме.** Статья посвящена разработке способа управления условиями безопасной эвакуации в рамках процедуры расчета риска на основе моделирования эвакуации людей при пожаре. Проведена оценка существующего коэффициента 0,8, применяемого для определения максимального допустимого расчетного времени эвакуации людей. Установлено, что линейная зависимость этого коэффициента не отражает специфику влияния времени блокирования как при малых, так и при высоких значениях такого времени. Кроме того, установлено, что существующий способ определения условий безопасной эвакуации требует совершенства, так как не позволяет учитывать величину времени блокирования путей эвакуации как таковую, что приводит, с одной стороны, к повышению опасности эвакуирующихся в случае малого времени блокирования, а с другой – к увеличению расходов на обеспечение пожарной безопасности в случае больших значений времени эвакуации. Предложены два способа совершенствования коэффициента, которые представляют более рациональный подход к определению коэффициента при оценке условий безопасной эвакуации. Проведена параметрическая оценка предложенных способов в сравнении с существующим. Результаты показали, что предложенные способы позволяют более рационально определить необходимое время эвакуации за счет отсутствия линейной зависимости от времени блокирования. В тоже время, существующий способ значительно увеличивает область недопустимых значений необходимого времени эвакуации при увеличении времени блокирования. Проведено компьютерное моделирование эвакуации людей и развития опасных факторов пожара, в ходе которого подтверждена эффективность предложенных способов. Проведен расчет условий безопасной эвакуации на основе существующего подхода и вновь предложенных. Результаты показали, что один из предложенных подходов позволяет более рационально оценить условия безопасной эвакуации и на более качественном уровне осуществлять анализ рассматриваемых условий. В тоже время, один из предложенных способов показал свое несовершенство и не был принят. Разработан алгоритм управления условием безопасной эвакуации людей в здании при пожаре на основе предложенного способа.

**Ключевые слова:** пожар, эвакуация, расчет пожарного риска, коэффициент безопасности, условия безопасной эвакуации, алгоритм управления эвакуацией.

**Для цитирования:** Шихалев Д.В. Об одном способе управления условием безопасности людей при моделировании эвакуации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2021;9(2). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=987> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.025

## The controlling method for pedestrian safety within the frame of evacuation simulation

D. V. Shikhalev

*State Fire Academy of EMERCOM of Russia,  
Moscow, Russian Federation*

**Abstract:** The article is devoted to developing a method for managing safe evacuation conditions within a fire risk calculation procedure based on improving the approach to determining the required evacuation time. The assessment of the existing coefficient 0.8, used to determine the maximum permissible

estimated time for people evacuation. It was found that the linear dependence of this coefficient does not reflect the specificity of the blocking time influence, both at low and high values of this time. In addition, it has been discovered that the existing method for determining the conditions for safe evacuation requires perfection since it does not allow taking into account the value of the blocking time of escape routes. On the one hand, this leads to an increase of hazard of evacuees in the case of a short blocking time, and on the other hand, to raising in the cost of ensuring fire safety in the case of long evacuation times. Two ways of improving the coefficient are proposed. It represents a more rational approach to determining the coefficient when assessing the conditions for safe evacuation. A parametric assessment of the proposed methods is carried out in comparison with the existing ones. The results showed that the proposed methods make it possible to more rationally determine the required evacuation time due to the absence of linear dependence on the blocking time. At the same time, the existing method significantly increases the area of unacceptable values of the required evacuation time while increasing the blocking time. Computer simulation for people evacuation and fire spreading was carried out. The effectiveness of the proposed methods was confirmed. The conditions for safe evacuation were calculated based on the existing approach and the newly proposed ones. The results showed that one of the proposed approaches makes it possible to assess the conditions for safe evacuation more rationally and to analyze them under consideration at a higher quality level. At the same time, one of the proposed methods showed its imperfection and was not accepted. An algorithm for managing the safe people evacuation condition has been developed based on the proposed method for a building in case of fire.

**Keywords:** fire, evacuation, fire risks assessment, margin safety, safe evacuation, evacuation management algorithm.

**For citation:** Shikhalev D.V. The controlling method for pedestrian safety within the frame of evacuation simulation. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(2). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=987> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.025 (In Russ).

## Введение (Introduction)

В настоящее время в Российской Федерации ежегодно происходит свыше 130 000 пожаров, на которых ежегодно гибнет более 7 000 человек [1]. Законодательством [2] установлены несколько способов подтверждения пожарной безопасности: выполнение технических регламентов и величина пожарного риска не превышает допустимых значений или выполнение технических регламентов и нормативных документов по пожарной безопасности. Процедура расчета пожарного риска определена в Методике [3], которая неоднократно критиковалась, в том числе в работах [4, 5]. В рамках данной процедуры осуществляется моделирование развития пожара и эвакуации людей. Большинство замечаний сводятся к следующим:

- неопределенность в выборе того или иного параметра в качестве исходных данных (сценарий развития пожара, вероятность возникновения пожара, вид и количество пожарной нагрузки, вид одежды и др.);
- отсутствие учета ряда параметров, влияющих на величину риска (подъезды/проезды, противопожарные расстояния, источники наружного водоснабжения и др.).

В тоже время, трудно не согласиться с выводом, представленным в работе [4] о том, что пожарный риск в такой постановке является скорее инструментов обоснования нарушений в области геометрических параметров путей эвакуации, чем показателем состояния пожарной безопасности здания как такового. Несмотря на существующие недостатки Методики, она является единственным инструментом, позволяющим количественно измерить величину пожарного риска. Подобный подход применяется и в зарубежной практике [6, 7], где проводится сопоставление двух величин – доступного и требуемого времени эвакуации (*ASET*, *RSET*). Это подход широко применяется в рамках проектирования на основе характеристик [8-11].

Не вдаваясь в подробности расчета величин пожарного риска, которые известны большинству специалистов в области обеспечения пожарной безопасности, остановимся на условиях безопасной эвакуации, а именно на коэффициенте безопасности 0,8, который умножается на время блокирования и учитывается при сопоставлении расчетного и необходимого времени эвакуации, являясь неким «запасом». Впервые в существующем виде он появился в Методике [3], хотя ранее применялся при определении необходимого времени эвакуации в ГОСТ [12]. В тоже время каких-либо обоснований данного коэффициента или его исследования в научной литературе в явном виде не представлено. Скорее всего целью его введения является учет погрешностей, которые присущи моделям процесса эвакуации и динамики развития пожара [13]. При этом, рассматриваемый коэффициент 0,8 в произведении с временем блокирования имеет линейную зависимость и, одинаков как для малых, так и для больших значений времени блокирования.

В свою очередь, в последнее десятилетие активно развивается область управления пожарным риском [14-16], где на основе некоторых критериев оказывается управленческое воздействие на величину пожарного риска с целью оценки влияния и разработки соответствующих управленческих решений, как правило направленных на обеспечение с одной стороны допустимой величины риска, а с другой, эффективного распределения ресурсов на обеспечение пожарной безопасности.

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка способа управления условиями безопасной эвакуации в рамках процедуры расчета риска на основе совершенствования подхода к определению необходимого времени эвакуации.

### Материалы и методы (Materials and Methods)

Для детализации проблемы, лежащей в основе исследования построим график, на котором продемонстрируем зависимость между временем блокирования пути эвакуации и имеющимся запасом времени, под которым понимаем разницу между временем блокирования и произведением времени блокирования на коэффициент 0,8. Другими словами, покажем максимально допустимое значения расчетного времени эвакуации в зависимости от времени блокирования. Результаты показаны на Рисунке 1.

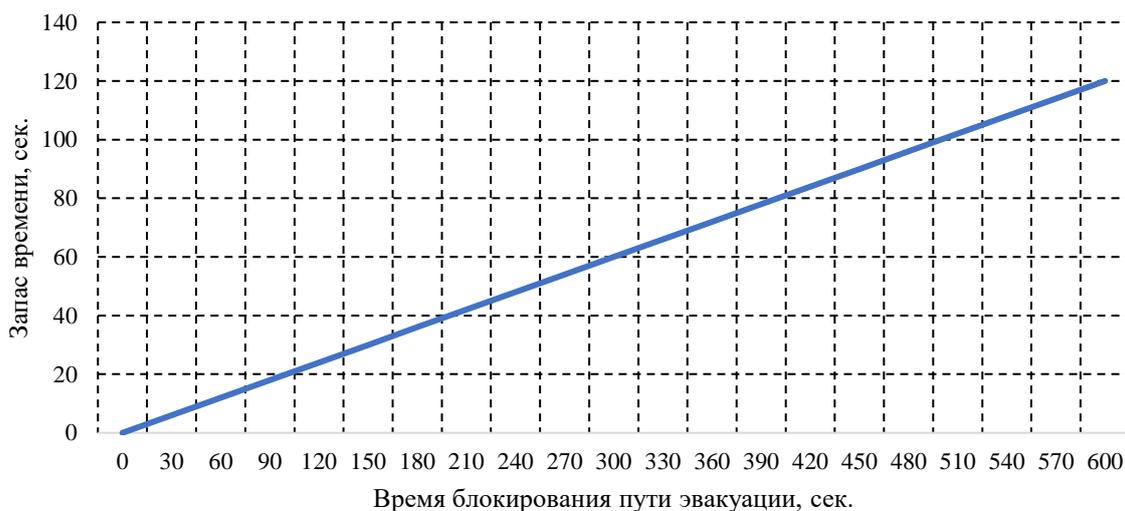


Рисунок 1 – Зависимость максимально допустимого времени эвакуации от времени блокирования пути эвакуации

Figure 1 – Dependence of the maximum available evacuation time on the time of blocking the escape routes

Из представленного графика следует, что линейная зависимость имеет следующие особенности, применительно к рассматриваемой проблеме. С одной стороны, когда время блокирования пути эвакуации относительно невелико (например, 30 секунд) имеющийся запас времени составляет не более 6 секунд, а для 60 секунд – 12 секунд. То есть, такие небольшие промежутки времени вполне могут быть сведены к нулю за счет изменения положения людей или особенностей топологии. С другой стороны, если время блокирования пути составляет свыше 300 секунд (5 минут), то такой запас составляет уже 60 секунд, а для 600 секунд – 120. Такие временные параметры могут потребовать не рациональных дополнительных инженерно-технических мероприятий.

Следовательно, необходимо определять данный коэффициент таким способом, который при малых значениях времени блокирования увеличит, а при больших, наоборот, сократит запас времени. Решения данной задачи можно достичь двумя способами: внесением изменений в способ расчета коэффициента 0,8 или изменением его формы и физического смысла. Проведем разработку данных способов.

Способ № 1 – Изменение способа расчета коэффициента 0,8.

Исходя из ранее определенного характера, который должен отражать рассматриваемый коэффициент целесообразно применить степенную функцию, определяющуюся видом:

$$y = k \cdot x^a \quad (1)$$

где:

$k$  – ненулевой коэффициент;  
 $a$  – показатель степени.

Учитывая характер изменения рассматриваемой функции, а также некоторые условия для области её значений, модифицируем выражение (1). В результате, получится следующее выражение:

$$k_{\text{зап}} = \frac{k}{t_{\text{бл}}} \quad (2)$$

где:

$k_{\text{зап}}$  – коэффициент запаса времени эвакуации;  
 $k$  – ненулевой коэффициент;  
 $t_{\text{бл}}$  – время блокирования пути эвакуации, сек.

Сформируем алгоритм расчета.

Шаг 1. Моделирование динамики развития опасных факторов пожара и получение значений времени блокирования путей эвакуации  $t_{\text{бл}}$ .

Шаг 2. Вычисление коэффициента запаса времени эвакуации  $k_{\text{зап}}$  по выражению (2) для каждого времени блокирования путей эвакуации  $t_{\text{бл}}$ .

Шаг 3. Вычисление необходимого времени эвакуации  $t_{\text{необ}}$  как разницу времени блокирования путей эвакуации  $t_{\text{бл}}$  и коэффициента запаса времени эвакуации  $k_{\text{зап}}$ .

В рассматриваемом способе необходимо установить ненулевой коэффициент  $k$ . В настоящем исследовании он принят равным 10, и, чем выше это значение, тем больше разница между временем блокирования и необходимым временем эвакуации. Рассмотрим еще один способ определения коэффициента безопасности.

Способ № 2 – Определение «запасного» времени.

Данный способ является более органичным в отношении расчетных переменных. Обозначим коэффициент как  $t_{\text{зап}}$ . Его физический смысл заключается в том, чтобы человек находился на определенном расстоянии от места (точки), где произошло наступление критического значения одного из опасных факторов пожара. Тогда запасное время  $t_{\text{зап}}$  будем определять по выражению:

$$t_{\text{зап}} = \frac{l_6}{V} \quad (3)$$

где:

$l_6$  – безопасное расстояние от места наступления опасного фактора пожара, м.;  
 $v$  – скорость движения человека в при текущей плотности потока, м/с.

Таким образом, человек всегда будет находиться на безопасном расстоянии от места наступления опасных факторов пожара. Открытым вопросом остается определение безопасного расстояния  $l_6$ . Формализуем алгоритм расчёта по данному способу.

Шаг 1. Установить безопасное расстояние  $l_6$  перед проведением расчетов. Если безопасное расстояние больше, чем расстояние до эвакуационного выхода непосредственно наружу – принять расстояние до эвакуационного выхода.

Шаг 2. Моделирование динамики развития пожара и эвакуации людей.

Шаг 3. Вычислить запасное время  $t_{зап}$  на основе результатов моделирования эвакуации людей.

Шаг 4. Вычислить необходимое время эвакуации людей  $t_{необ}$  как разницу времени блокирования путей эвакуации  $t_{бл}$  и запасного время  $t_{зап}$ .

Предложенные способы позволяют более рационально подходить к определению условий безопасной эвакуации. Проведем оценку разработанных способов.

Проиллюстрируем результаты определения необходимого времени эвакуации существующим и предлагаемыми способами (Рисунок 2), а также определим разницу между временем блокирования и необходимым временем эвакуации (Рисунок 3).

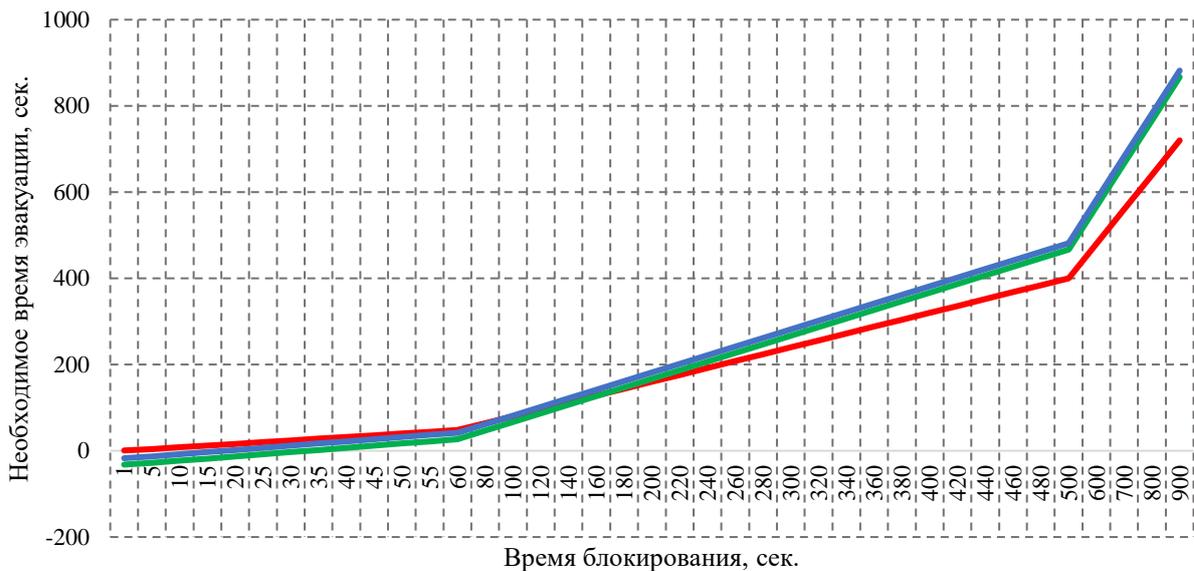


Рисунок 2 – Зависимость необходимого времени эвакуации от времени блокирования: красная кривая – существующий способ; зеленая кривая – способ № 1; синяя кривая – способ № 2 (при плотности людского потока  $D=0,01 \text{ м}^2/\text{м}^2$ ).

Figure 2 – Dependence of the required evacuation time on the blocking time: red curve – existing method; green curve – method № 1; blue curve - method № 2 (with a human flow density  $D = 0.01 \text{ m}^2 / \text{m}^2$ ).

Данные, показанные на Рисунках 2-3 свидетельствуют о том, что предложенные способы позволяют более рационально определить необходимое время эвакуации за счет отсутствия линейной зависимости от времени блокирования. В тоже время, существующий способ (применение коэффициента 0,8) значительно расширяет область недопустимых значений необходимого времени эвакуации при увеличении времени блокирования. Например, человеку при свободном движении во время эвакуации за

время, которое сейчас устанавливается методикой в качестве «запасного» ( $0,8t_{\text{бл}}$ ) в случае, если оно составит 900 секунд, эвакуирующийся сможет уйти на расстояние практически 300 метров ( $900 \cdot 0,8 = 720$  сек.,  $900 - 720 = 180$  сек.,  $180 \cdot 1,66 = 298$  м.). Таким образом, применение существующего способа определения необходимого времени, во-первых, не обеспечивает достаточного запаса времени для эвакуации, когда время блокирование относительно не высокое (до 60 сек.), во-вторых, требует излишних мер безопасности для обеспечения безопасности эвакуирующихся, когда время блокирование имеет высокие значения (свыше 270 сек.).

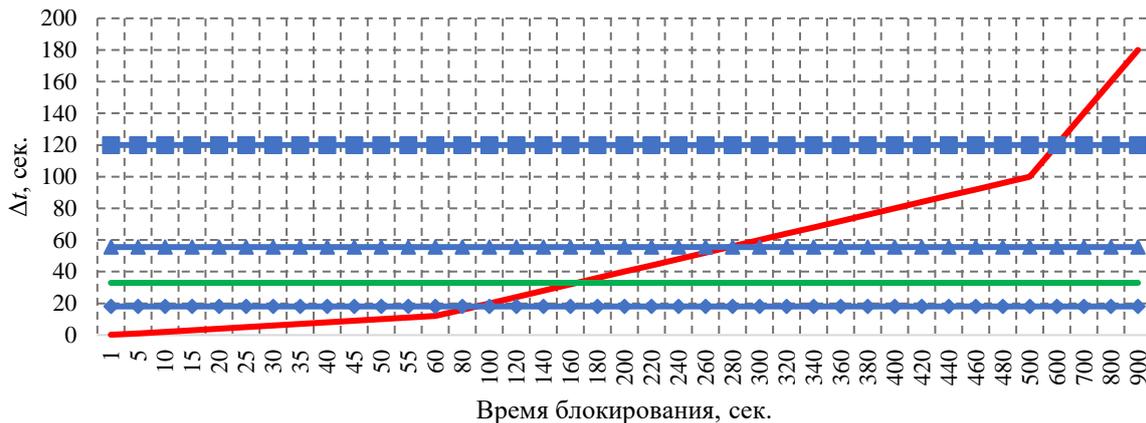


Рисунок 3 – Зависимость разницы между необходимым временем эвакуации от времени блокирования: красная кривая – существующий способ; зеленая кривая – способ № 1; синяя кривая – способ № 2 (ромб – при плотности людского потока  $D=0,01 \text{ м}^2/\text{м}^2$ ; треугольник – при плотности людского потока  $D=0,5 \text{ м}^2/\text{м}^2$ ; при плотности людского потока  $D=0,9 \text{ м}^2/\text{м}^2$ ).

Figure 3 – Dependence of the difference between the required evacuation time from the blocking time: red curve - existing method; green curve - method № 1; blue curve – method № 2 (rhombus - with a human flow density  $D = 0.01 \text{ м}^2 / \text{м}^2$ ; triangle – with a human flow density  $D = 0.5 \text{ м}^2 / \text{м}^2$ ; with a human flow density  $D = 0.9 \text{ м}^2 / \text{м}^2$ ).

## Результаты (Results)

Для оценки предложенных способов, проведем компьютерное моделирование, с помощью программного комплекса *Fenix+2* [17], в котором реализована индивидуально-поточная модель движения людей [3] и полевая модель развития пожара.

Для проведения компьютерного моделирования эвакуации людей в программном комплексе *Fenix+2* строится трехмерная модель здания, отражающая фактические объемно-планировочные решения здания и конструктивные элементы (стены, двери, перекрытия, помещения, атриумы, окна, проемы, лестницы и лестничные клетки, пандусы и др.). Затем, в модели здания размещается пожарная нагрузка (горючие вещества) в соответствии с ее фактическим расположением в здании. Далее, производится размещение людей внутри модели в соответствии с их преобладающим фактическим расположением. В заключение, в модели здания размещаются регистраторы (контрольные точки), которые измеряют время наступления опасных факторов пожара и время прохождения человека через данную точку. Кроме того, при создании модели объекта указывается ряд качественных характеристик, оказывающих влияние на результаты моделирования, а именно: наличие автоматической пожарной сигнализации и тип системы оповещения и управления эвакуацией (влияют на время начала эвакуации); класс функциональной пожарной опасности здания (влияет на способ расчета условий безопасной эвакуации и время начала эвакуации); время пребывания людей внутри здания (влияют на величину индивидуального пожарного риска) и др.

Более подробно процедура проведения моделирования приведена в методике [3]. Программный комплекс *Fenix+2* позволяет проводить как моделирования эвакуации людей, так и моделирования развития пожара на достаточно точном уровне, что подтверждается результатами валидации и верификации на основе экспериментальных данных [28].

В соответствии с приведенной выше процедурой, создана модель объекта, топология которого показана на Рисунке 4. Геометрические размеры приведены в миллиметрах.

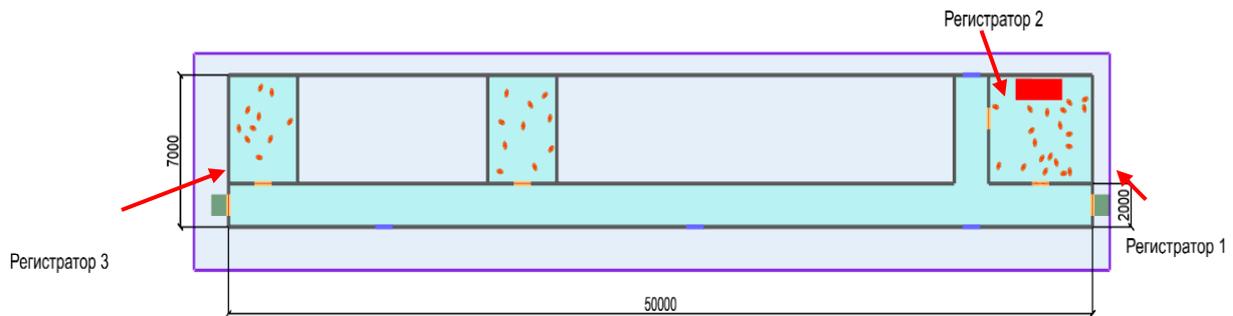


Рисунок 4 – Топология объекта моделирования  
Figure 4 – Simulation object's plan

Исходные данные принятые при моделировании эвакуации и динамики развития пожара представлены в Таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования эвакуации  
Table 1 – Initial data for evacuation simulation

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Значение
1	Группа мобильности	-	M1
2	Площадь горизонтальной проекции человека	метр <sup>2</sup>	0,1
3	Время начала эвакуации	секунда	60
4	Ширина дверных проемов	метр	1
5	Высота дверных проемов	метр	2
6	Количество людей в помещении очага пожара	человек	20
7	Количество людей в каждом из остальных помещений	человек	10

Таблица 2 – Исходные данные для моделирования динамики развития пожара  
Table 2 – Initial data for fire dynamics simulation

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Значение
1	Тип горючей нагрузки	-	Мебель + бумага (кабинет)
2	Площадь очага пожара	метр <sup>2</sup>	2,7
3	Удельная мощность очага пожара	кВт/метр <sup>2</sup>	168
4	Размер ячейки области расчета	м	0,125
5	Высота размещения регистратора	метр	1,7
6	Начальная температура воздуха	°C	38,4
7	Версия FDS	-	6

Примечание: Регистратор – расчетная точка, в которой происходит измерение параметров динамики развития пожара и эвакуации.

Результаты проведенного моделирования приведены в Таблице 3.

Таблица 3 – Результаты моделирования эвакуации существующим способом  
Table 3 – Results of evacuation simulation by the existing method

№ п/п	Регистратор	Время, сек.					Условие безопасности
		tp	t <sub>бл</sub>	t <sub>необ</sub>	$\Delta$ (t <sub>бл</sub> - t <sub>необ</sub> )	$\Delta$ (t <sub>бл</sub> - tp)	
1	1	22,4	45,3	36,24	9,06	22,9	Выполнено
2	2	14	19,9	15,92	3,98	5,9	Выполнено
3	3	75,8	87,2	69,76	17,44	11,4	Не выполнено

Полученные в ходе моделирования данные, подтверждают, что существующий способ определения условий безопасной эвакуации, в частности выражение  $0,8 \cdot t_{бл}$  требуют совершенства. Так, в помещении очага пожара разница между временем блокирования и расчетным временем эвакуации составляет всего 6 секунд, что является существенно малым запасом, который может быть сразу же нивелирован рядом факторов, например, задержкой времени оповещения [18], погрешностью моделей эвакуации [19-21] и др. В тоже время, когда запас времени фактически больше (для регистратора 3), условие безопасной эвакуации не выполняется.

Проведем повторное моделирование с учетом предложенных способов. Результаты моделирования представлены в Таблице 4.

Таблица 4 – Результаты моделирования эвакуации предлагаемыми способами  
Table 4 – Results of evacuation simulation by the proposed method

№ п/п	Регистратор	Время, сек.					Условие безопасности
		tp	t <sub>бл</sub>	t <sub>необ</sub>	$\Delta$ (t <sub>бл</sub> - t <sub>необ</sub> )	$\Delta$ (t <sub>бл</sub> - tp)	
Способ № 1							
1	1	22,4	45,3	35,3	10,0	22,9	Выполнено
2	2	14	19,9	9,9	10,0	5,9	Не выполнено
3	3	75,8	87,2	77,2	10,0	11,4	Выполнено
Способ № 2							
4	1	22,4	45,3	45,3	0	22,9	Выполнено
5	2	14	19,9	13,7	6,2	5,9	Не выполнено
6	3	75,8	87,2	87,2	0	11,4	Выполнено

Анализ полученных данных свидетельствуют о том, что оба предложенных способа определили необходимое время для помещения очага пожара меньшим, чем расчетное. В тоже время, при существующем способе получены противоположные результаты. Если рассматривать результаты по регистратору № 3, то наоборот, условие безопасной эвакуации выполнено в виду того, что существует больший запас по времени. При этом, выявлена одна особенность предложенного способа №2, заключающаяся в том, что в случае, если регистратор установлен в проеме эвакуационного выхода непосредственно наружу, то необходимое время приравнивается к времени его блокирования. Данную особенность следует скорректировать и установить дополнительное ограничение – если эвакуационный выход является выходом непосредственно наружу, то принять  $l_6$  равным, например, 2 метра. Это необходимо в

том числе потому, что для ряда зданий важную роль в пропускной способности эвакуационных выходов наружу оказывает количество людей на прилегающей территории [22].

Если сравнивать предложенные подходы между собой, то преимуществом обладает подход № 2, так как он имеет больший физический смысл, а применением степенной функции в подходе № 1 сводит всю процедуру к вычитанию от времени блокирования некоторой заданной константы. Кроме того, подход № 2 является более адаптивным, и позволяет учитывать локальную плотность людского потока при всем многообразии контингента людей [22-25].

Как ранее было упомянуто в начале настоящего исследования развитым зарубежным подходом при моделировании эвакуации является проверка условия  $Aset > Rset$ . В последнее время ряд публикаций [26-27] направлен на исследование взаимосвязи данных переменных. В частности, в работе [27] проведено компьютерное моделирование 8 640 сценариев для установления взаимосвязи данного неравенства и его исследование, путем нахождения разницы между  $Aset$  и  $Rset$ .

Автор приходит к выводу, что это неравенство является лишь индикаторами соответствия/не соответствия сценария конкретному условию, однако задачи прогнозирования он не выполняет.  $Aset$  и  $Rset$  это подходящая концепция для ответа может человек пострадать от реализации рассматриваемого сценария или нет. Данное обстоятельство, а также результаты настоящего исследования, свидетельствуют о возможности и необходимости управления условиями безопасной эвакуации людей в здании в рамках процедуры расчета риска.

Для формирования процедуры управления условием безопасной эвакуации людей в здании при пожаре определим следующие компоненты:

- *объект управления* – эвакуация людей при пожаре;
- *субъект управления* – лицо, осуществляющее расчет эвакуации людей при пожаре.
- *инструмент управления* – процедура расчета условий безопасной эвакуации;
- *критерий состояния объект управления* – условия безопасной эвакуации при пожаре;
- *параметр управления* – безопасное расстояние эвакуирующегося от места в здании, где наступило одно из критических значений опасных факторов пожара;
- *цель управления* – обеспечить условия безопасной эвакуации людей с помощью инструмента управления в зависимости от состояния внешней среды;
- *состояние внешней среды* – совокупность факторов, определяющих потенциальную «сложность» эвакуации при пожаре (например, нарушение требований к геометрическим размерам эвакуационных путей и выходов, превышение допустимого количества людей и др.).

Исходя из сформулированных компонентов, разработан алгоритм управления условием безопасной эвакуации людей в здании при пожаре, представленный на Рисунке 5.

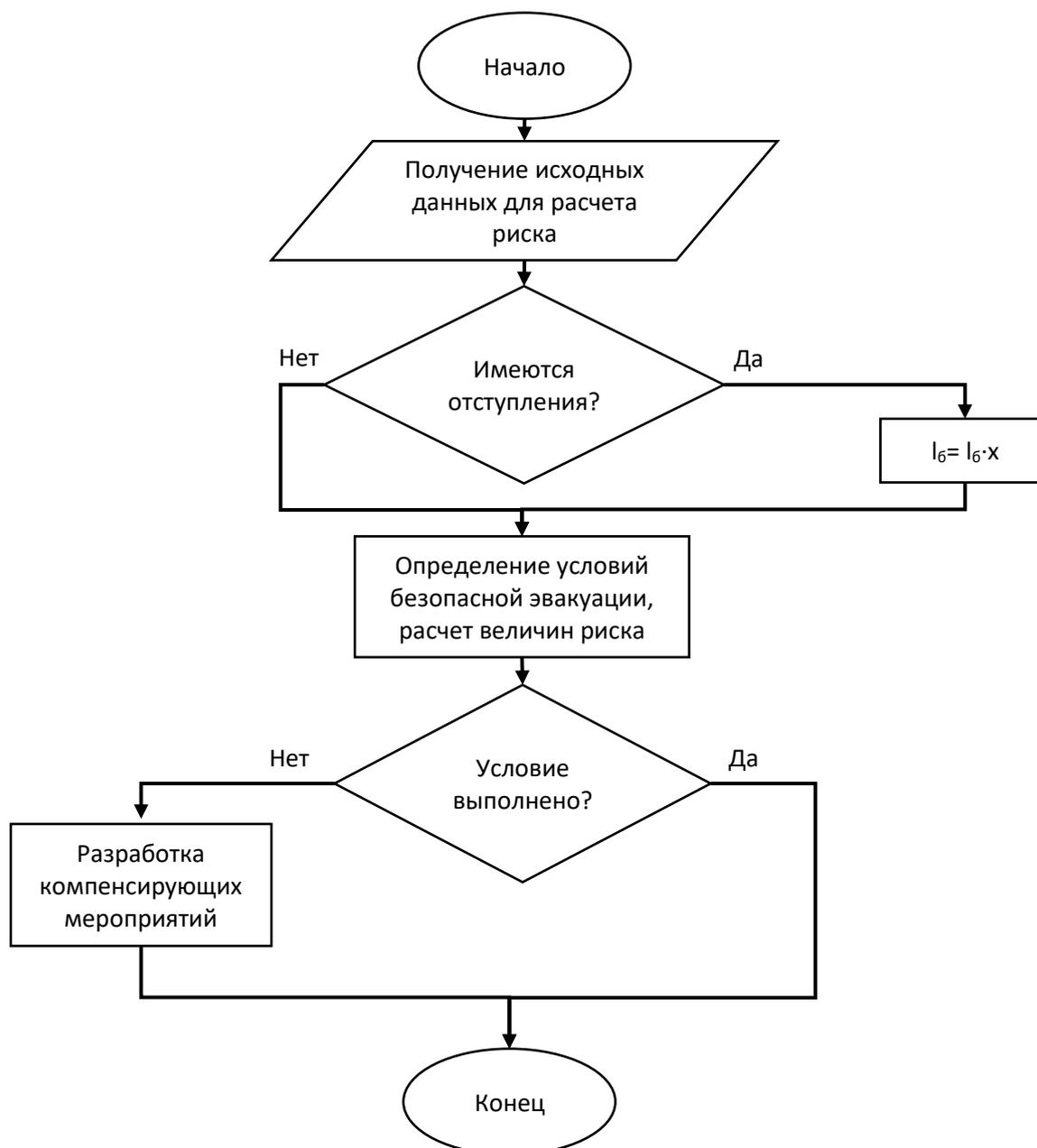


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма управления условием безопасной эвакуации людей в здании при пожаре

Figure 5 – Flowchart of the algorithm for safe evacuation of people in the control condition for fire building

Разработанный алгоритм позволяет в зависимости от имеющихся на объекте нарушений оказывающих влияние на эвакуацию людей при пожаре, увеличить безопасное расстояние  $l_6$  в  $x$  раз, например, пропорционально влиянию имеющегося нарушения, тем самым обеспечивая условия безопасной эвакуации.

В свою очередь, данный алгоритм применим только при наличии исправной системы автоматической пожарной сигнализации и системы оповещения и управления эвакуации, а также при соблюдении процедуры расчета, предусмотренной Методикой [3].

## Заключение (Conclusion)

В ходе проведения исследования установлено, что существующий способ определения условий безопасной эвакуации требует совершенства так как не позволяет учитывать величину времени блокирования путей эвакуации как таковую, что приводит с одной стороны к повышению опасности эвакуирующихся в случае малого времени блокирования, а с другой – к увеличению расходов на обеспечение пожарной безопасности в случае больших значений времени эвакуации.

Для решения данной проблемы предложены два новых способа определения необходимого времени эвакуации. Приведено их описание и алгоритм определения. Проведен расчет условий безопасной эвакуации на основе существующего подхода и вновь предложенных. Результаты показали, что один из предложенных подходов позволяет более рационально оценить условия безопасной эвакуации и на более качественном уровне осуществлять анализ рассматриваемых условий. В тоже время, один из предложенных способов показал свое несовершенство и не был принят.

На основе предложенного подхода разработана процедура управления условием безопасной эвакуации людей во время эвакуации при пожаре, сформулированы её основные компоненты, а также разработан соответствующий алгоритм, позволяющий в зависимости от нарушений оказывающих влияние на эвакуацию людей при пожаре увеличить безопасное расстояние  $l_6$  в  $x$  раз.

Дальнейшим развитием данного способа управления является установление экспериментально обоснованных числовых зависимостей безопасного расстояния  $l_6$ , а также формализация зависимостей типа управления от состояний внешней среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году: *статистический сборник*. М.: ВНИИПО, 2020;80.
2. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности. *Федер. закон от 22 июля 2008 года № 123-ФЗ*. Гарант. 2020.
3. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. *Приказ МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382*. Гарант. 2020.
4. Мешалкин Е.А., Бурбах В.А., Вантыкшев Н.Н. О применении методик расчетов по оценке пожарных рисков. *Пожаровзрывобезопасность*. 2015;24(2):23-31.
5. Якуш С.Е., Эсманский Р.К. Анализ пожарных рисков. Часть I: Подходы и методы. *Проблемы анализа риска*. 2009;6(3):8-25.
6. Bukowski R.W., Waterman T.E., Christian W.J. Detector sensitivity and siting requirement for dwellings. *Technical Report NBS-GCR-75-51*, U.S. National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, 1975.
7. Cooper L.Y. A concept for estimating available safe egress time in fires. *Fire Safety Journal*. 1983;5(2):135-144. DOI: 10.1016/0379-7112(83)90006-1.
8. SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection. National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2006.
9. Meacham B.J., Charters D., Johnson P., Salisbury M. Building Fire Risk Analysis. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer, New York. 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0\_75.
10. Kuehnen R.T., Youssef M.A., El-Fitany S. Performance-Based Design of RC Columns using an Equivalent Standard Fire. *Fire Safety Journal*. 2020;111. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102935.

11. Lu L., Yuan G., Huang, Z., Shu Q., Li Q. Performance-based analysis of large steel truss roof structure in fire. *Fire Safety Journal*. 2017;93;21-38. DOI:10.1016/j.firesaf.2017.08.002
12. ГОСТ Р 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. Гарант. 2020.
13. Холщевников В.В., Парфёненко А.П. Сопоставление различных моделей движения людских потоков и результатов программно-вычислительных комплексов. *Пожаровзрывобезопасность*. 2015;24(5):68-75.
14. Гудин С.В., Хабибулин Р.Ш., Рубцов Д.Н. Проблемы управления пожарными рисками на территории объектов нефтепереработки с использованием современных программных продуктов. *Пожаровзрывобезопасность*. 2015;24(12):40-45.
15. Федорец А.Г. Основные направления совершенствования системы обеспечения пожарной безопасности на основе методологии управления пожарными рисками. *Пожаровзрывобезопасность*. 2009;18(9):22-29.
16. Удилов В.П., Номинат С.Г., Кубарев А.С. и др. Модель системы управления пожарными и экологическими рисками на межрегиональном уровне. *Пожарная безопасность*. 2007;(1):116-122.
17. *Руководство пользователя Fenix+2*. Программа для определения величины индивидуального пожарного риска, Нижний Новгород, 2021.
18. Самошин Д.А. Проблемы нормирования времени начала эвакуации. *Пожаровзрывобезопасность*. 2016;25(2):37-51. DOI 10.18322/PVB.2016.25.05.37-51.
19. Ronchi E. Developing and validating evacuation models for fire safety engineering. *Fire Safety Journal*, 2021;120. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103020.
20. Lovreglio R., Ronchi E., Borri D. The validation of evacuation simulation models through the analysis of behavioural uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*. 2014;131:166-174. DOI: 10.1016/j.ress.2014.07.007.
21. Ronchi E. New approaches to evacuation modelling. *LUTVDG/TVBB No. 3209*. Lund University, Department of Fire Safety Engineering.
22. Шахуов Т.Ж. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам из зданий мечетей. *Дис. канд. техн. наук*. 2019.
23. Парфененко А.П. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам в зданиях детских дошкольных образовательных учреждений. *Дис. канд. техн. наук*. 2012.
24. Слюсарев С.В. Нормирование требований пожарной безопасности к эвакуационным путям и выходам для детей с ограниченными возможностями здоровья в зданиях с их массовым пребыванием. *Дис. канд. техн. наук*. 2017.
25. Самошин Д.А. Методологические основы нормирования безопасной эвакуации людей из зданий при пожаре. *Дис. д-ра техн. наук*. 2017.
26. Schröder B., Arnold L., Seyfried A. A map representation of the ASET-RSET concept. *Fire Safety Journal*, 2020;115. DOI:10.1016/j.firesaf.2020.103154.
27. Schröder B. Multivariate Methods for Life Safety Analysis in Case of Fire. *PhD thesis*. Forschungszentrum Jülich. 2016.
28. *Эвакуация людей: валидация и верификация*. Программа для определения величины индивидуального пожарного риска, Нижний Новгород, 2020.

## REFERENCES

1. Fire and fire safety in 2018. *Statistical issues*. All-Russian Research Institute for Fire Protection of EMERCOM of Russia, 2020 (in Russ).

2. Technical regulations for fire safety requirements. *Federal Law on 22.07.2008 No. 123* (in Russ).
3. Technique of determination of settlement sizes of fire risk in buildings, constructions and structures of various classes of functional fire danger. *Order of Emercom of Russia on 30.06.2009 No. 382*. 2009 (in Russ).
4. Meshalkin E.A., Burbah V.A., Vantyakshev N.N. O primeneniі metodik raschetov po ocenke pozharnykh riskov. *Pozharovzryvobezopasnost*. 2015;2(24):23-31 (in Russ).
5. Yakush S.E., Esmanskiy R.K. Analysis of Fire Risks. Part I: Approaches and Methods. *Issues of Risk Analysis Journal*. 2009;3(6):8-25 (in Russ).
6. Bukowski R.W., Waterman T.E., Christian W.J. Detector sensitivity and siting requirement for dwellings. *Technical Report NBS-GCR-75-51*, U.S. National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, 1975.
7. Cooper L.Y. A concept for estimating available safe egress time in fires. *Fire Safety Journal*. 1983;5(2):135-144. DOI: 10.1016/0379-7112(83)90006-1.
8. SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection. National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2006.
9. Meacham B.J., Charters D., Johnson P., Salisbury M. Building Fire Risk Analysis. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer, New York. 2016. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0\_75.
10. Kuehnen R.T., Youssef M.A., El-Fitany S. Performance-Based Design of RC Columns using an Equivalent Standard Fire. *Fire Safety Journal*. 2020;111. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.102935.
11. Lu L., Yuan G., Huang, Z., Shu Q., Li Q. Performance-based analysis of large steel truss roof structure in fire. *Fire Safety Journal*. 2017;93;21-38. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.08.002.
12. *GOST R 12.1.004-91. Occupational safety standards system. Fire safety. General requirements* (in Russ).
13. Kholshchevnikov V.V., Parfenenko A.P. Comparison of different models of the movement of human flows and results of program computer systems. *Pozharovzryvobezopasnost*. 2015;24(5):68-75 (in Russ).
14. Gudın S.V., Khabibulin R.S., Rubtsov D.N. Problems of decision making in the fire risks management at the territories of oil processing facilities using modern software products. *Pozharovzryvobezopasnost*. 2015;24(12):40-45. (in Russ) DOI: 10.18322/PVB.2015.24.12.40-45.
15. Fedorec A.G. Osnovnye napravleniya sovershenstvovaniya sistemy obespecheniya pozharnoi bezopasnosti na osnove metodologii upravleniya pozharnymi riskami. *Pozharovzryvobezopasnost*. 2009;18(9):22-29 (in Russ).
16. Udilov V.P., Nominat S.G., Kubarev A.S. et al. Model of a fire and environmental risk management system at the interregional level. *Fire safety*. 2007;(1):116-122 (in Russ).
17. *User manual Fenix+2*. Program for determining the value of an individual fire risk, Nizhny Novgorod, 2021 (in Russ).
18. Samoshin D.A. Problems of regulation of time to start evacuation. *Pozharovzryvobezopasnost*. 2016;25(5):37-51. (In Russ.) DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.37-51 (in Russ).
19. Ronchi E. Developing and validating evacuation models for fire safety engineering. *Fire Safety Journal*, 2021;120. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103020.
20. Lovreglio R., Ronchi E., Borri D. The validation of evacuation simulation models through the analysis of behavioural uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*. 2014;131:166-174. DOI: 10.1016/j.ress.2014.07.007.

21. Ronchi E. New approaches to evacuation modelling. *LUTVDG/TVBB No. 3209*. Lund University, Department of Fire Safety Engineering.
22. Shakhuov T. Zh. Standardization of fire safety requirements for evacuation routes and exits from mosque buildings. *Dis. cand. tech. sciences*. 2019 (in Russ).
23. Parfenenko A.P. Standardization of fire safety requirements for evacuation routes and exits in the buildings of preschool educational institutions. *Dis. cand. tech. sciences*. 2021 (in Russ).
24. Slyusarev S.V. Rationing of fire safety requirements for evacuation routes and exits for children with disabilities in buildings with their mass presence. *DIS. cand. tech. sciences*. 2017 (in Russ).
25. Samoshin D.A. Methodological foundations of standardization of safe evacuation of people from buildings in case of fire. *Dis. doct. tech. sciences*. 2017 (in Russ).
26. Schröder B., Arnold L., Seyfried A. A map representation of the ASET-RSET concept. *Fire Safety Journal*, 2020;115. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103154.
27. Schröder B. Multivariate Methods for Life Safety Analysis in Case of Fire. *PhD thesis*. Forschungszentrum Jülich. 2016.
28. *Evacuation of people: validation and verification*. Program for determining the value of an individual fire risk Fenix+2, Nizhny Novgorod, 2020 (in Russ).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Шихалев Денис Владимирович**, кандидат технических наук; начальник научно-исследовательского отдела автоматизированных систем и информационных технологий, УНК АСИТ Академия ГПС МЧС России, Москва, Российская Федерация.  
*e-mail:* [evacsystem@gmail.com](mailto:evacsystem@gmail.com)  
ORCID: [0000-0003-2205-0706](https://orcid.org/0000-0003-2205-0706)

**Denis V. Shikhalev**, Candidate of Technical Sciences, the head of automated systems and information technologies research department of the State Fire Academy of EMERCOM of Russia.