

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023. Т. 32. № 4. С. 5–14
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2023; 32(4):5-14

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 05.614.849

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2023.32.04.5-14>

Имитационное моделирование и критерии решений по противопожарной защите общественных зданий

Владимир Иванович Присадков¹, Светлана Витальевна Муслакова^{1✉},
Александр Анатольевич Абашкин¹, Константин Владимирович Присадков²

¹ Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

² ООО «Центр проектно-сметных работ», г. Владимир, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Гибкое нормирование определяет цели проектирования системы противопожарной защиты объекта, а пути их достижения выбирает проектировщик. Выполнение поставленной задачи подтверждается проверкой критериев. Цель статьи — показать возможности использования имитационного моделирования для реализации целей гибкого нормирования систем противопожарной защиты общественных зданий.

Теоретические основы имитационного моделирования. Предлагается при имитационном моделировании учитывать индивидуальный пожарный риск и риск материальных потерь при пожаре. Для розыгрыша одного случайного сценария пожара используют утвержденную процедуру расчета индивидуального пожарного риска, входящую в основной блок. Перечень случайных входных величин, области их изменения, розыгрыш значений, обработка результатов моделирования, выбор решений по полученным результатам, управление моделированием проводится во втором блоке имитационной системы.

Результаты и их обсуждение. Применение имитационного моделирования обосновано для выбора рациональных решений по пожарной безопасности. Проектировщик, исходя из условий объекта и требований пожарной безопасности, может выбрать критерий и систему защиты объекта, решив многокритериальную задачу. Предложены модели для оценки надежности использования первичных средств пожаротушения, тушения пожарной охраной пожара в очаге, надежности противопожарных строительных конструкций, противопожарных дверей, отдельных или в составе противопожарных преград. Сформулирована система критериев, включающих критерии: индивидуального пожарного риска, приведенных затрат, «запаса времени эвакуации», необходимого времени эвакуации. На основе статистики, полученной в результате имитационного моделирования, проектировщик определяет искомые показатели. Приведена формула для расчета числа испытаний в зависимости от точности определения математического ожидания, дисперсии случайных величин статистических параметров.

Выводы. Предложено в рамках гибкого нормирования при проектировании систем противопожарной защиты использовать имитационное моделирование по методу Монте-Карло. Систематизированы критерии принятия решений, учитывающие характеристики пожарных рисков. Приведены расчетные оценки эффективности ряда противопожарных мероприятий.

Ключевые слова: гибкое нормирование; имитационная система; рациональный вариант; случайные факторы; пожарный риск

Для цитирования: Присадков В.И., Муслакова С.В., Абашкин А.А., Присадков К.В. Имитационное моделирование и критерии решений по противопожарной защите общественных зданий // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 4. С. 5–14. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.5-14.

✉ Муслакова Светлана Витальевна, e-mail: msv-nika@yandex.ru

Simulation modelling and decision criteria for fire protection of public buildings

Vladimir I. Prisadkov¹, Svetlana V. Muslakova^{1✉}, Aleksandr A. Abashkin¹,
Konstantin V. Prisadkov²

¹ All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

² Design and Estimate Center, Vladimir, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Flexible rationing determines the design objectives of the fire protection system of the object, and the ways to achieve them are chosen by the designer. The fulfilment of the set task is confirmed by the verification of criteria. The purpose of the article is to show the possibilities of using simulation modelling to implement the objectives of flexible rationing of fire protection systems of public buildings.

Theoretical foundations of simulation modelling. It is proposed to take into account individual fire risk and the risk of material losses in case of fire during simulation modelling. To draw one random fire scenario, an approved procedure for calculating individual fire risk is used, which is included in the main block. The list of random input variables, the areas of their change, the drawing of values, the processing of simulation results, the choice of solutions based on the results obtained, modelling control is carried out in the second block of the simulation system.

Results and their discussion. The application of simulation modelling is justified for the choice of rational decisions on fire safety. The designer based on the conditions of the object and fire safety requirements can choose the criterion and system of object protection by solving a multi-criteria problem. Models for assessing the reliability of the use of primary fire extinguishing means, fire extinguishing by the fire brigade in the fire centre, reliability of fire protection building structures, fire doors, separate or as part of fire barriers are proposed. The system of criteria is formulated, including the following criteria: individual fire risk, reduced costs, "evacuation time reserve", necessary evacuation time.

On the basis of statistics obtained as a result of simulation modelling, the designer determines the required indicators. The formula for calculating the number of tests depending on the accuracy of determining the mathematical expectation, dispersion of random values of statistical parameters is given.

Conclusions. It is proposed to use Monte Carlo simulation modelling in the framework of flexible rationing when designing fire protection systems. Decision-making criteria that take into account the characteristics of fire risks are systematized. Calculated estimates of the effectiveness of a number of fire-fighting measures are given.

Keywords: flexible rationing; simulation system; rational variant; random factors; fire risk

For citation: Prasadkov V.I., Muslakova S.V., Abashkin A.A., Prasadkov K.V. Simulation modelling and decision criteria for fire protection of public buildings. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(4): 5-14. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.5-14 (rus).

✉ Svetlana Vitalievna Muslakova, e-mail: msv-nika@yandex.ru

Введение

В последние десятилетия во всем мире происходит внедрение гибкого нормирования в практику проектирования систем противопожарной защиты общественных зданий. Суть гибкого нормирования состоит в том, что устанавливаются цели, которые должны быть достигнуты на объекте с помощью системы противопожарной защиты, а пути достижения установленных целей выбирает проектировщик. В западноевропейской и американской научно-технической литературе такой способ проектирования называется «performens based design», иногда переводимый на русский язык как объектно-ориентированный подход. Основой гибкого нормирования являются критерии (целевые установки) и их расчетные оценки.

В области проектирования систем противопожарной защиты общественных зданий актуальным является вопрос вариантного проектирования — разработки инструментария для выбора наилучшей, в определенном смысле, системы противопожарной защиты (СПЗ) здания.

Ниже изложены подходы, элементы гибкого нормирования, позволяющие найти и обосновать оптимальные решения в рамках постановки задачи обеспечения пожарной безопасности. Систематизированы критерии, отражающие социальные и экономические аспекты создания СПЗ объекта; разработаны модели по оценке эффективности (надежности) ряда элементов СПЗ зданий. Эффективным матема-

тическим обеспечением гибкого нормирования является имитационное моделирование.

В настоящее время в России пожарные риски оцениваются для общественных зданий, по сути, детерминировано. Стохастичность риска учитывается только через вероятность возникновения пожара в соответствии с Федеральным законом «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»¹ (далее — ФЗ-123).

В связи с развитием вычислительных возможностей для широкого круга исследователей, совершенствованием постановок задач в пожарной науке, включая введение новых критериев с учетом возможности их оценок, происходит внедрение имитационного моделирования для решения задач гибкого нормирования [1].

При этом осуществляется переход от детерминированных представлений к вероятностному описанию процессов, исходных данных и полученных результатов.

Цель настоящей статьи — показать возможности использования имитационного моделирования для реализации целей гибкого нормирования систем противопожарной защиты общественных зданий; разработать модели для оценки надежности ряда противопожарных мероприятий; систематизировать критерии для решения, как правило, многоцелевой

¹ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

задачи выбора рационального варианта противопожарной защиты объектов; определить возможности повышения качества проектирования с использованием гибкого нормирования за счет учета стохастической природы развития пожара и эффективности противопожарных мероприятий на основе статистических испытаний (метод Монте-Карло).

Процесс статиспытаний обеспечивает средства для получения вероятностных распределений искомых параметров, что позволяет оценить точность полученных результатов. Выбор оптимального варианта СПЗ проводится с учетом значений заданных критериев оптимизации.

Теоретические основы имитационного моделирования

Суть использования метода Монте-Карло, как основы имитационного моделирования [1], заключается в следующем. В основу расчетов положены детерминированные модели, используемые для оценки эффективности (надежности) отдельных противопожарных мероприятий. Все случайные входные данные согласно априорно заданных законов распределения генерируются. Полученные входные данные подставляются в соответствующую детерминированную модель для получения одного результата статиспытания. Затем процесс повторяется; проводится всего n статиспытаний. Результаты испытаний («искусственная» статистика) обрабатываются с целью определения характеристик искомых величин (одного выходного параметра).

Вопрос заключается в количестве n необходимых реализаций (статиспытаний) модели для определения математического ожидания выходных параметров с заданной точностью [1]. Ниже приведены формулы для оценки необходимого числа испытаний на основе «искусственных» статистик.

Полученные оценки надежности противопожарных мероприятий используются для моделирования пожара в здании и расчета критериев. С учетом полученных значений критерия выбирается оптимальный вариант СПЗ здания.

Модели оценки пожарных рисков

Пожарные риски включают, как правило, вопросы безопасности людей и сохранения материальных ценностей при пожарах^{2, 3, 4} [2].

² National Fire Protection Association. Life Safety Code. NFPA 101, Edition, National Fire Protection Association, Quincy. MA. 2021.

³ British Standards Institution (Ed.) Fire Safety in the Design, Management and Use of Buildings, BSI, London, 2017, Code of practice, BS 9999.

⁴ British Standards Institution (Ed.) Application of Fire Safety Engineers Principles to the Design of Buildings. Part-6: Human Factors: Life Safety Strategies – Occupant Evacuation, Behaviour and Condition (Sub-system 6). PD 7974-6, BSI, London, 2019.

Вероятностная оценка риска позволяет отразить изменчивость риска и неопределенности при моделировании риска, а именно:

- неопределенность входных параметров задачи (скорость распространения пожара, время начала эвакуации, разбросы в скоростях движения людей, стоимость материальных ценностей, коэффициентов ущерба);
- приближенность исходной детерминированной модели к реальной картине события;
- неопределенности, связанные с действиями человека при пожаре, например ошибки при выборе пути эвакуации, физические ограничения возможностей человека и т.д.

При решении вопросов по оценке пожарных рисков в части безопасности людей независимо от формы расчетов исходят из сравнения допустимого времени эвакуации (времени блокирования опасными факторами пожара путей эвакуации) $T_{нб}$ и времени эвакуации $T_{э}$, включая время начала эвакуации $T_{нэ}$.

Аналогичные времена в зарубежной литературе [3] имеют названия: доступное время эвакуации (available safe egress time) t_{ASET} и требуемое время эвакуации (required safe egress time) t_{RSET} .

Имитационное моделирование основано на апробированных детерминированных моделях, включенных в основной блок имитатора. Для каждого отдельного испытания разыгрывается набор входных параметров. Этот набор данных может изменяться в зависимости от помещения объекта и от времени пожара. Розыгрыш исходных данных, обработка результатов, управление имитатором включено во вспомогательные блоки имитатора [4].

В России используются различные модели, описывающие динамику пожаров в помещениях и зданиях [5]. Известны также зарубежные модели для описания развития пожара в здании [6–8].

Модели динамики людских потоков при эвакуации из зданий подробно описаны в работах В.В. Холщевникова и Д.А. Самошина [9, 10]. Указанные модели позволяют оценить, в том числе, индивидуальные пожарные риски с учетом требований ФЗ-123 и Методики определения расчетных величин пожарного риска⁵ (далее — Методика).

Один из недостатков такого подхода заключается в том, что не учитываются возможности развития пожара из помещений по всем направлениям. Например, принимаются в расчет только открытые

⁵ Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : утв. приказом МЧС России от 30.06.2009 № 382 (с Изменениями, внесенными приказами МЧС России № 749 от 12.12.2011 и № 632 от 02.12.2015).

проемы без учета надежности средств защиты проемов в них.

В конце прошлого столетия во ВНИИПО МВД СССР успешно развивалось направление динамического вероятностного моделирования пожаров на графах, по сути моделирование на полумарковских сетях [11, 12].

Моделирование на графах позволяло исключить указанный выше недостаток.

Выделялись с присвоением номеров помещения здания. Далее устанавливались возможные направления и вероятности развития пожаров из указанных помещений по возможным направлениям, определялось время до перехода пожара в смежное помещение. В результате определялась динамическая картина развития пожара: для любого временного промежутка устанавливались помещения, охваченные пожаром.

Модели на стохастических графах позволяют детализировать направления, вероятностные и временные характеристики динамики пожаров в здании; предназначены в первую очередь для прогнозирования материальных потерь от пожара с учетом ряда элементов систем противопожарной защиты объекта.

Ряд практически важных случаев можно рассмотреть с помощью аналитических моделей, разработанных во ВНИИПО МВД СССР [11, 13].

В качестве примера возьмем здание, разделенное противопожарными преградами на пожарные отсеки (секции) так, что каждый отсек граничит не более чем с двумя отсеками. Отсеки в здании примем одинаковыми по параметрам. Определим ниже прогнозный ущерб от пожаров в здании с учетом защиты помещений здания автоматической установкой пожаротушения (АУП).

Без деления здания на пожарные отсеки материальный ущерб при пожаре составит (приближенно), руб/год:

$$K_1 = \lambda S(1 - P_A)YSR, \quad (1)$$

где λ — вероятность возникновения пожара в здании, год⁻¹·м⁻²;

S — площадь здания, м²;

P_A — надежность тушения пожара АУП;

Y — стоимость материальных ценностей в здании, включая конструкции здания, руб·м⁻²;

R — коэффициент ущерба при пожаре.

При делении здания на два одинаковых пожарных отсека материальный ущерб приближенно равен, руб/год:

$$K_2 = \frac{\lambda S(1 - P_A)YSR(1 + q)}{2}, \quad (2)$$

где q — ненадежность противопожарной стены.

При делении здания на три одинаковых пожарных отсека ожидаемый ущерб при пожаре составит:

$$K_3 = \frac{\lambda S(1 - P_A)YSR}{9}(3 + 4q + q^2) \quad (3)$$

и так далее.

Аналитические модели типа (1), (2) и (3) удобны для использования в имитационном моделировании, в основном блоке. При этом достаточно знать законы распределения входных параметров. В данном случае случайными параметрами являются λ , Y , q . Далее необходимо разыграть входные параметры с помощью генератора случайных чисел, подставить их в аналитическую модель, получить результаты статиспытания.

Результаты отдельных испытаний составляют статистику, которая обрабатывается определенным способом для получения характеристик искомого параметра с заданной точностью за счет подбора числа испытаний.

Результаты и их обсуждение

Модели оценки эффективности элементов систем пожарной безопасности

Исходные данные по эффективности противопожарных мероприятий определяются из данных статистики, расчетным путем или принимаются экспертно. Мы не будем утверждать, что экспертный подход — это не совсем хорошо; когда данные отсутствуют, на практике такой подход является единственно возможным.

Первичные средства пожаротушения

Принимается, что пожар тушится в очаге первичным средством пожаротушения (огнетушителем, противопожарным водопроводом) обученным персоналом. Вероятность успеха тушения определяется по следующей формуле [14]:

$$P_{\text{п.с}} = K_{10} \text{Вер} (S_{\text{п.с}} > S_{\text{ф}}), \quad (4)$$

где K_{10} — экспертный коэффициент успеха тушения, отражающий факторы, не учтенные в модели, например неплоскостное развитие пожара, вероятность отказа первичных средств пожаротушения;

$S_{\text{п.с}}$ — площадь пожара, которая может быть потушена первичным средством пожаротушения, м²;

$S_{\text{ф}}$ — площадь горения в очаге пожара на момент подачи первичных средств пожаротушения, м².

Для случая нормального распределения входных факторов формула (4) может быть записана в квадратурах и вероятность успеха тушения первичными средствами определяется по таблице 7 [14].

Успех тушения пожара пожарной охраной

Ниже вероятность успеха тушения пожара в помещении очага пожарной охраной предлагается оценивать для первого прибывшего подразделения по формуле [15]:

$$P_{\text{по}} = K_{20} \text{Вер}(S_{\text{т}} > S_{\text{ф}}), \quad (5)$$

где $S_{\text{т}}$ — площадь тушения пожара, которая может быть потушена первым прибывшим подразделением, м²;

$S_{\text{ф}}$ — фактическая площадь пожара на момент подачи первых стволов, м².

Формула (5) позволяет учитывать время прибытия, время развертывания и подачи стволов, а также данные по скоростям распространения горения при пожаре.

Коэффициент K_{20} определяется экспертно. При отсутствии данных он принимается равным 1.

Эффективность строительных конструкций

Строительные конструкции выполняют задачу при пожаре [16, 17], если:

$$t_{\text{ог}} > t_{\text{эк}},$$

где $t_{\text{ог}}$ — предел огнестойкости строительной конструкции, мин;

$t_{\text{эк}}$ — эквивалентная продолжительность пожара, мин [5].

Надежность строительной конструкции равна вероятности:

$$P_{\text{с.к}} = \text{Вер}(t_{\text{ог}} > t_{\text{эк}}), \quad (6)$$

где $t_{\text{ог}}, t_{\text{эк}}$ — случайные величины [19].

В качестве строительной конструкции в формуле (6) рассматриваются противопожарные стены, противопожарные перегородки, противопожарные перекрытия и т.д.

Надежность противопожарных дверей

Вероятность выполнения задачи противопожарной дверью при пожаре определим как:

$$P_{\text{дв}} = P_{\text{пол}} P_{\text{пр}} P_{\text{зам}}, \quad (7)$$

где надежность двери при пожаре по полотну двери:

$$P_{\text{пол}} = \text{Вер}(t_{\text{ог.м}} > t_{\text{эк.п}}); \quad (8)$$

$P_{\text{пр}}$ — надежность противопожарной двери в узле притвора, определяемая по данным огневых испытаний;

$P_{\text{зам}}$ — надежность устройства закрытия противопожарных дверей при пожаре, определяемая по результатам обследования зданий после пожара или экспертно;

$t_{\text{ог.м}}$ — предел огнестойкости конструкции полотна двери, мин;

$t_{\text{эк.п}}$ — эквивалентная продолжительность пожара, рассчитанная по полотну двери, мин.

Надежность противопожарных стен, перегородок с противопожарными дверями, клапанами

Запишем надежность противопожарных преград, оборудованных инженерными средствами как:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{с.к}} P_{\text{дв}} P_{\text{кл}}, \quad (9)$$

где $P_{\text{кл}}$ — надежность клапана, установленного на воздуховоде в месте пересечения воздуховодом противопожарной преграды, устанавливается на основе данных огневых испытаний или экспертно.

Критерии выбора проектных решений по противопожарной защите общественных зданий

Современные критерии в части проектирования противопожарной защиты зданий условно можно разделить на две группы:

- глобальные критерии;
- локальные критерии.

Необходимо отметить, что здесь речь идет о размерных критериях, а не о широко известных безразмерных критериях типа критериев Фруда, Рейнольдса, Нуссельта и т.д.

К глобальным критериям относится, например, критерий индивидуального пожарного риска. Установлено предельное значение критерия: например, для общественных зданий 10^{-6} воздействий опасных факторов пожара (ОФП) на одного человека в год. Согласно ФЗ-123¹, система противопожарной защиты объекта должна обеспечить значение индивидуального риска в общественных зданиях, не превышающее нормативной величины.

В области материальных потерь известен критерий приведенных затрат, равный сумме приведенных затрат на систему пожарной безопасности объекта и материальных потерь от пожаров в здании в течение года [18].

В России известны и другие критерии, например относительный уровень ожидаемых материальных потерь на объекте от пожара [19]. Уровень потерь не должен превышать средний уровень потерь по аналогичным объектам.

Локальные критерии используются достаточно часто в пожарном деле. Например, при выборе пределов огнестойкости противопожарной преграды величина $t_{\text{ог}} - t_{\text{эк}}$ является локальным критерием с критическим значением, равным 0. Для выполнения задачи предотвращения распространения ОФП через преграду критерий должен быть больше 0.

Новые критерии по безопасности людей, численные значения которых в вероятностной постановке рассчитываются с помощью имитационного моделирования, представлены ниже.

Время эвакуации

В России принято записывать время эвакуации как:

$$t_{\text{э}} = t_{\text{р}} + t_{\text{н.э}}, \quad (10)$$

где $t_{\text{р}}$ — расчетное время эвакуации, мин;

$t_{\text{н.э}}$ — время начала эвакуации, отсчитываемое от времени возникновения пожара, мин.

Предлагается детализировать время начала эвакуации с учетом [1, 9, 10]:

$$t_{\text{н.э}} = t_{\text{об}} + t_{\text{оп}} + t_{\text{реак}}, \quad (11)$$

где $t_{\text{об}}$ — время обнаружения пожара, отсчитываемое от начала пожара, мин;

$t_{\text{оп}}$ — время оповещения о пожаре, мин;

$t_{\text{реак}}$ — время реагирования людей от момента оповещения до начала движения, мин.

Все величины в формуле (11) рассматриваются как случайные. Время эвакуации является суммой четырех случайных величин, что позволяет считать величину $t_{\text{э}}$ распределенной по нормальному закону.

Необходимое время эвакуации

Необходимое время эвакуации для зальных помещений нормируется п. 7.3.4 СП 1.13130.202⁶. В зарубежной литературе необходимое время эвакуации для однородных потоков эвакуирующихся (без маломобильных групп населения) обозначается как t_{ASET} [19, 20].

После введения требований по необходимому времени эвакуации время эвакуации становится критерием.

В нормативных документах в качестве необходимого времени эвакуации используется величина:

$$t_{\text{нб}} = 0,8t_{\text{бл}},$$

где $t_{\text{бл}}$ — время блокирования путей эвакуации ОФП, а коэффициент 0,8 учитывает случайный характер процесса и возможные разбросы величин.

Критерий «запас времени при эвакуации»

Разность величин $t_{\text{нб}} - t_{\text{бл}}$ можно рассматривать как критерий с учетом статьи 53 ФЗ-123¹. Для успеха эвакуации в рассматриваемых точках здания согласно сценарию пожара критерий должен быть положительным.

⁶ СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы.

В зарубежной литературе широко используется аналогичный критерий $t_{\text{ASET}} - t_{\text{RSET}}$, где t_{ASET} — время блокирования путей эвакуации; t_{RSET} — время выхода людей из здания наружу для рассматриваемой точки в здании [19]. Предложено графическое представление критерия запаса времени $t_{\text{ASET}} - t_{\text{RSET}}$, которое позволяет установить узкие места в проектах по обеспечению безопасности людей при пожарах [19, 21].

Актуальный вопрос: какие значения должны быть поставлены в выражения критериев при гибком нормировании систем противопожарной защиты?

Влияние количества испытаний на точность расчетов

Имитационное моделирование с целью получения искомого параметра дает некоторое распределение полученных значений. При проектировании системы противопожарной защиты необходимо знать значение параметра и точность его определения. Для определенности в качестве искомого параметра рассмотрим время эвакуации $t_{\text{э}}$. Методом статистических испытаний получим статистику значений $t_{\text{э}1}, t_{\text{э}2}, \dots, t_{\text{э}n}$ для конкретного сценария пожара. Среднее значение статистики: $\bar{t}_{\text{э}}$ и дисперсии $\sigma_{\text{э}n}^2$. Введем среднее значение всех имитаций времени эвакуации $\bar{t}_{\text{э.м}}$ и дисперсию $\sigma_{\text{э.м}}^2$. В случае больших n центральная предельная теорема позволяет утверждать, что:

$$\bar{t}_{\text{э.м}} = \bar{t}_{\text{э}} \text{ и } \sigma_{\text{э.м}}^2 = \frac{\sigma_{\text{э}n}^2}{n}. \quad (12)$$

Доверительный интервал $100(1 - \alpha) \%$ для среднего значения $\bar{t}_{\text{э}}$ распределения $t_{\text{э}}$ дается приближенной формулой [1]:

$$\text{Вер} \left(-Z_{\alpha/2} < \frac{\bar{t}_{\text{э.м}} - \bar{t}_{\text{э}}}{\sigma_{\text{э}} / \sqrt{n}} < Z_{\alpha/2} \right) \approx 1 - \alpha. \quad (13)$$

Доверительные коэффициенты $Z_{\alpha/2}$ берутся из таблиц как функция уровня доверительности α [1].

Если $t_{\text{э}i}$ распределены по нормальному закону независимо от величины выборки n , то $\bar{t}_{\text{э}i}$ также имеет нормальное распределение.

Используя среднее значение выборки

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{э}i}}{n} \quad (14)$$

и стандартное отклонение

$$\sigma_s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{t}_{\text{э}i} - S)^2 \frac{1}{n-1}}, \quad (15)$$

получим доверительный интервал [1]:

$$S - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma_s}{\sqrt{n}} < \bar{t}_3 < S + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma_s}{\sqrt{n}}. \quad (16)$$

Формула (16) при заданном уровне доверительности α позволяет установить доверительный интервал для искомого параметра числа испытаний n . При этом могут быть особенности, определяемые физическим смыслом параметра.

Например, если речь идет о необходимом времени эвакуации, то целесообразно принять за искомую величину первый квартиль распределения $t_{нб}$.

При рассмотрении времени эвакуации следует брать третий квартиль распределения t_3 .

Точность определения искомого параметра возрастает по мере увеличения числа испытаний n . Достоинства формулы (16) определяются независимостью от вида распределения параметра, получаемого на основе статиспытаний. В работе [1] приведены ссылки и формулы для определения доверительных интервалов при малом числе статиспытаний.

Распределение искоемых величин, которые определяются на основе метода статиспытаний, позволяет оценить успех эвакуации людей при пожаре по формуле:

$$P_{3,6} = \text{Вер}(t_3 < t_{нб}). \quad (17)$$

В случае аппроксимации нормальными законами распределений входных параметров t_3 и $t_{нб}$ вероятность эвакуации может быть записана через интеграл Гаусса Φ [22]:

$$P_{3,6} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \frac{1}{2} + \Phi(\gamma), \quad (18)$$

где

$$\gamma = \frac{\bar{t}_{нб} - \bar{t}_3}{\sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_{нб}^2}}, \quad (19)$$

где $\bar{t}_{нб}$ — математическое ожидание необходимого времени эвакуации.

Таким образом, показаны возможности и целесообразность статистического моделирования для реализации гибкого нормирования систем противопожарной защиты общественных зданий. Предложено ряд входных факторов (исходных данных) в имитационной модели рассматривать случайными, включая характеристики параметров, определяющих динамику опасных факторов пожара, процессов эвакуации, материального ущерба при пожаре.

Выводы

1. Для повышения эффективности гибкого нормирования СПЗ общественных зданий предложено последовательно использовать стохастический подход, включающий вероятностные характеристики исходных данных, имитационное моделирование методом Монте-Карло и специальную обработку полученных результатов.

2. Систематизирована система критериев решения многофункциональной задачи выбора рационального варианта противопожарной защиты объектов. Искомые параметрами могут быть: величина материального ущерба при пожаре, вероятности возникновения ущерба определенного размера, необходимое время эвакуации, время эвакуации, «запас времени эвакуации», успех эвакуации.

3. Приведены формулы для оценки необходимого числа испытаний, математического ожидания расчетных величин на основе «искусственных» статистик, результатов имитационного моделирования.

Предложено в качестве основных значений искоемых параметров принимать их средние значения (математические ожидания), определяемые по результатам статиспытаний с указанием доверительных интервалов.

4. Для зданий с особой ответственностью в части пожарного риска предлагается принимать значения параметров, соответствующих первому или третьему квартилям распределений с учетом физического смысла искоемых параметров.

5. Сформулированы модели для оценки надежности ряда противопожарных мероприятий. Предложена и подтверждена возможность учета при имитационном моделировании надежности выполнения задачи следующими элементами СПЗ объекта:

- первичные средства пожаротушения;
- тушения пожара в помещении очага пожарной охраны;
- предотвращение распространения пожара через ограждения помещения с проемами, защищенными противопожарными дверями и/или огнезадерживающими клапанами, установленными на воздуховодах;
- тушение пожара АУП.

6. Основной недостаток имитационных моделей — их громоздкость и трудоемкость расчетов — преодолевается по мере развития средств вычислительной техники и навыков пользователей, а главное — окупается возможностями метода и ценностью получаемых результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tinaburri A. Principles for Monte Carlo agent-based evacuation simulations including occupants who need assistance. From RSET to RISET // *Fire Safety Journal*. 2022. Vol. 127. P. 103510. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103510
2. Присадков В.И., Муслакова С.В., Костерин И.В., Фадеев В.Е., Шамаев А.М. Инженерный метод выбора рационального варианта противопожарной защиты объектов с экономической ответственностью // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2016. № 8. С. 49–57. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.49-57
3. Poon S. A dynamic approach to ASET/RSET assessment in performance based design // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 71. Pp. 173–181. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.025
4. Вентцель Е.С. Исследование операций. М. : Советское радио, 1972. 407 с.
5. Молчадский И.С. Пожар в помещении. М. : ВНИИПО, 2005. 456 с.
6. Peacock R.D., Hoskins B.I. A review of building evacuation models. National Institute of Standards and Technology, 2010. Technical Note 1680.
7. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K. Fire dynamics simulator. Technical Reference Guide. Vol. 3: Validation. National Institute of Standards and Technology, 2015.
8. Heskestad G. Fire plumes, flame height, and air entrainment // *Handbook of Protection Engineering*. 3rd ed. Chapter 1. Springer, New York, 2016. Pp. 2–1, 2–17. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_13
9. Холщевников В.В., Самошин Д.А. Эвакуация и поведение людей при пожарах. М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. 212 с.
10. Холщевников В.В. Гносеология людских потоков : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2019. 592 с.
11. Присадков В.И. Разработка методов выбора рациональных вариантов систем противопожарной защиты промышленных зданий : дис. д-ра техн. наук. М. : ВНИИПО, 1990. 540 с.
12. Исачков А.В., Присадков В.И. Модель распространения пожара по зданию на основе вероятностных сетей // *Безопасность людей при пожарах в зданиях и сооружениях : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1987. С. 69–77.*
13. Присадков В.И., Исачков А.В., Лицкевич В.В., Дударев Г.И. Имитатор пожара в здании и выбора экономически целесообразного варианта противопожарной защиты // *Проблемы пожарной безопасности объектов и административно-территориальный единиц : сб. науч. тр. М. : ВНИИПО, 1988. С. 24–30.*
14. Присадков В.И., Муслакова С.В., Хатунцева С.Ю., Костерин И.В., Фадеев В.Е., Шамаев А.М. Расчетные оценки эффективности тушения пожара в очаге внутренним противопожарным водопроводом // *Пожарная безопасность*. 2017. № 1. С. 49–54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28844561>
15. Терещнев В.В. Справочник руководителя тушения пожара. Технические возможности пожарных подразделений. М. : Пожжника, 2004. 256 с.
16. Костерин И.В., Муслакова С.В., Присадков В.И., Фадеев В.Е. Коэффициенты безопасности и надежность строительных конструкций при пожаре // *Материалы XXIX междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России. М., 2017. С. 295–296.*
17. Присадков В.И., Молчадский И.С., Лицкевич В.В., Гудков А.А. Вероятностный метод расчета надежности конструкций при пожаре // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1990. № 1. С. 22–25.
18. Аболенцев Ю.И. Экономика противопожарной защиты. М. : ВИПТША МВД СССР, 1985. 216 с.
19. Schröder B., Arnold L., Seyfried A. A map representation of the ASET-RSET concept // *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 115. P. 103154. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103154
20. Ronchi E. Developing and validating evacuation models for fire safety engineering // *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 120. P. 103020. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103020
21. Grandison A. Determining confidence intervals, and convergence, for parameters in stochastic evacuation models // *Fire Technology*. 2020. Vol. 56. Pp. 2137–2177. DOI: 10.1007/s10694-020-00968-0
22. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М. : Стройиздат, 1978. 239 с.

REFERENCES

1. Tinaburri A. Principles for Monte Carlo agent-based evacuation simulations including occupants who need assistance. From RSET to RISET. *Fire Safety Journal*. 2022; 127:103510. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103510
2. Prasadkov V.I., Muslakova S.V., Kosterin I.V., Fadeev V.E., Shamaev F.M. Engineering method of selection of rational variant of fire protection of objects with economic responsibility. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2016; 8:49-57. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.08.49-57 (rus).
3. Poon S. A dynamic approach to ASET/RSET assessment in performance based design. *Procedia Engineering*. 2014; 71:173-181. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.025
4. Ventsel E.S. *Research of operations*. Moscow, Soviet Radio Publ., 1972; 407. (rus).
5. Molchadskiy I.S. *Fire in the room*. Moscow, VNIPO, 2005; 456. (rus).

6. Peacock R.D., Hoskins B.I. *A review of building evacuation models*. National Institute of Standards and Technology, 2010. Technical Note 1680.
7. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K. *Fire dynamics simulator*. Technical Reference Guide. Vol. 3: Validation. National Institute of Standards and Technology, 2015.
8. Heskestad G. Fire plumes, flame height, and air entrainment. *Handbook of Protection Engineering*. 3rd ed. Chapter 1. Springer, New York, 2016; 2-1, 2-17. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_13
9. Kholshchevnikov V.V., Samoshin D.A. *Evacuation and behavior of people in case of fires*. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2009; 212. (rus).
10. Kholshchevnikov V.V. *Epistemology of human flows : monograph*. Moscow, Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2019; 592. (rus).
11. Prisdakov V.I. *Development of methods for selecting rational options for fire protection systems of industrial buildings : dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Moscow, VNIPO, 1990; 540. (rus).
12. Isachkov A.V., Prisdakov V.I. A model of fire propagation through a building based on probabilistic networks. *Safety of people during fires in buildings and structures : collection of scientific papers*. Moscow, VNIPO, 1987; 69-77. (rus).
13. Prisdakov V.I., Isachkov A.V., Litskevich V.V., Dudarev G.I. A fire simulator in a building and the choice of an economically feasible fire protection option. *Problems of fire safety of objects and administrative-territorial units : a collection of scientific papers*. Moscow, VNIPO, 1988; 24-30. (rus).
14. Prisdakov V.I., Maslakova S.V., Khatuntseva S.Yu., Kosterin I.V., Fadeev V.E., Shamaeva A.M. Design assessment of the efficiency of fire fighting in the seat by the in-building fire. *Pozharnaya Bezopasnost' / Fire Safety*. 2017; 1: 49-54. (rus).
15. Terebnev V.V. *Handbook of the fire extinguishing manager. Technical capabilities of fire departments*. Moscow, Pozhkniga Publ., 2004; 256. (rus).
16. Kosterin I.V., Muslakova S.V., Prisdakov V.I., Fadeev V.E. Safety coefficients and reliability of building structures in case of fire. *Materials of the XXIX International scientific and practical conference dedicated to the 80th anniversary of the FSBI VNIPO EMERCOM of Russia*. Moscow, 2017; 295-296. (rus).
17. Prisdakov V.I., Molchadsky I.S., Litskevich V.V., Gudkov A.A. Probabilistic method for calculating the reliability of structures in case of fire. *Construction mechanics and calculation of structures*. 1990; 1:22-25. (rus).
18. Abolentsev Yu.I. *Economics of fire protection*. Moscow, VIPTSH of the Ministry of Internal Affairs of the USSR, 1985; 216. (rus).
19. Schröder B., Arnold L., Seyfried A. A map representation of the ASET-RSET concept. *Fire Safety Journal*. 2020; 115:103154. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103154
20. Ronchi E. Developing and validating evacuation models for fire safety engineering. *Fire Safety Journal*. 2021; 120:103020. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103020
21. Grandison A. Determining confidence intervals, and convergence, for parameters in stochastic evacuation models. *Fire Technology*. 2020; 56:2137-2177. DOI: 10.1007/s10694-020-00968-0
22. Rzhantsyn A.R. *Theory of calculation of building structures for reliability*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978; 239. (rus).

Поступила 15.05.2023, после доработки 29.05.2023;

принята к публикации 06.06.2023

Received May 15, 2023; Received in revised form May 29, 2023;

Accepted June 6, 2023

Информация об авторах

ПРИСАДКОВ Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Балашиха, Московская обл., Российская Федерация; РИНЦ ID: 760543; ORCID: 0000-0002-2161-0794; e-mail: vniipo@mail.ru

МУСЛАКОВА Светлана Витальевна, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела моделирования пожаров и нестандартного проектирования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации

Information about the authors

Vladimir I. PRISADKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Main Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 760543; ORCID: 0000-0002-2161-0794; e-mail: vniipo@mail.ru

Svetlana V. MUSLAKOVA, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of Department of Fire Modeling and Non-Standard Design, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO,

по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Балашиха, Московская обл., Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-6146-8059; e-mail: msv-nika@yandex.ru

АБАШКИН Александр Анатольевич, начальник отдела моделирования пожаров и нестандартного проектирования, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Балашиха, Московская обл., Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: vniipo@mail.ru

ПРИСАДКОВ Константин Владимирович, главный инженер, ООО «Центр проектно-сметных работ», Россия, 600000, г. Владимир, ул. Большая Московская, 61; ORCID: 0000-0002-8307-3257; e-mail: k300572@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6146-8059; e-mail: msv-nika@yandex.ru

Aleksandr A. ABASHKIN, Head of Department of Fire Modeling and Non-Standard Design, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6347-3257; e-mail: vniipo@mail.ru

Konstantin V. PRISADKOV, Chief Engineer, Design and Estimate Center, Bolshaya Moskovskaya St., 61, Vladimir, 600000, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8307-3257; e-mail: k300572@yandex.ru

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.
The authors declare that there is no conflict of interest.