

В. К. Джеломанова-Кутана, канд. мед. наук

ИП Кутана Г. В., г. Севастополь

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРОВ МЕТОДОМ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА

*Представлен подход, позволяющий количественно оценить уровень безопасности для проектирования системы безопасности жизнедеятельности с использованием вероятностного анализа риска. Результирующая вероятность отказа  $P_{\text{н}}$  системы безопасности жизнедеятельности для конкретного сценария (i) предоставляет количественную оценку уровня безопасности жизнедеятельности. Кроме того, исследуемая методология учитывает неопределенность входных параметров и предоставляет информацию о чувствительности исследуемой модели к различным параметрам. В данном исследовании была применена методология количественной оценки для многоцелевого здания общественного типа.*

**Ключевые слова:** безопасность жизнедеятельности, пожарная безопасность, вероятностная оценка рисков, количественный метод, сценарии пожара, анализ чувствительности

### **Введение**

В области противопожарной техники одной из основных целей является защита жизни и безопасности лиц, находящихся в здании во время пожара [1]. Существуют различные подходы для достижения данной цели, начиная с соблюдения требований, закрепленных в нормативно-правовых документах и заканчивая вычислительными методами. Численные методы нашли применение в более сложных современных зданиях, где возможность реализации нормативных требований ограничена или вообще отсутствует.

Интересен опыт зарубежных коллег, несколько десятков лет использующих национальные нормы и расчетные методы в противопожарной защите объектов строительства. Зарубежные специалисты применяют различные математические инструменты для проектирования – детерминированный, сравнительный и вероятностный. Применение в практике вероятностного подхода на основе оценки риска активно развивается практически во всех зарубежных странах. В связи с этим многие национальные институты стандартизации и инженерные общества в последние несколько лет обобщили имеющуюся практику расчетов пожарного риска и доступные данные о вероятностях различных иницирующих событий.

В данной работе мы опирались на британские стандарты и руководства серии BS 7974 [2], а также на руководства американского объединения инженеров противопожарной защиты NFPA [3].

В случае применения методов численного моделирования фактическое время безопасной эвакуации (ASET, Available Safe Egress Time) рассчитывается на основе моделирования пожара и сопоставляется с результатами моделирования эвакуации для определения требуемого времени безопасной эвакуации (RESET, Required Safe Egress Time). Для безопасных проектов зданий и сооружений ASET должно быть больше, чем RESET. Имитационные модели могут быть различной сложности, но наиболее современными и широко используемыми являются модели вычислительной гидродинамики (CFD Computational Fluid Dynamics) для моделирования возгорания и индивидуальные модели для моделирования эвакуации.

Для корректного применения приведенных выше инструментов инженер по противопожарной безопасности выбирает репрезентативные сценарии пожаров и проектные пожары. Однако данным методам свойственна неопределенность. Чтобы учесть неопределенность, обычно выбирается произвольный коэффициент безопасности  $k$ :  $ASET > k \cdot RESET$ . Коэф-

коэффициент  $k$  варьируется в пределах 2...3 в зависимости от конструкции, типа и назначения здания [2].

В связи с применением достаточно больших коэффициентов безопасности, остается неясным, является ли найденное решение оптимальным или чрезмерно безопасным. В дальнейшем эта проблема решается путем проведения вероятностного анализа с целью количественной оценки вероятности ошибок при проектировании системы обеспечения безопасности жизни с использованием современных методов математического моделирования.

**Целью исследования** является оценка вероятности возникновения пожаров согласно заданным сценариям при помощи методов количественного анализа. Основная задача, связанная с использованием математических методов, заключается в том, чтобы свести к минимуму число требуемых операций при сохранении как можно более точных результатов.

### **Методология исследования**

В связи с вышеизложенным был рассмотрен метод Бокса – Уилсона.

В целях оптимизации большого числа требуемых оценок имитационных моделей были применены различные методологии для значительного сокращения их числа. Методология начинается с моделирования так называемой схемы проведения экспериментов (DoE Design of Experiments), описанной в [4]. Затем результаты вычисляемых точек анализируют на соответствие параметрам, с использованием таких методов, как линейный и ранговый, или с применением ступенчатой регрессии [5]. Второстепенные параметры могут быть впоследствии опущены. Это уменьшает объемность поставленной задачи и вместе с тем количество математических операций.

Следующим шагом является построение альтернативной модели, так называемой методологии расчета на основе поверхности отклика (метод Бокса – Уилсона). Таким образом, к вычисленным результатам (точкам опоры) подбирается математическая модель, позволяющая рассчитывать результаты моделирования между данными опорными точками. Общими подходами являются линейные или квадратичные регрессионные модели [6]. Здесь для большей точности использовался интерполяционный подход, основанный на перемещении наименьших квадратов [7].

Методология расчета на основе поверхности отклика была проведена с использованием подхода Монте-Карло, предусматривающего уменьшение дисперсии, так называемой дискретизации вероятностных распределений для построения дерева вариантов. Для того, чтобы учесть качество соответствия альтернативной модели, был выбран итеративный подход, при котором новые точки опоры создаются вокруг точки проектирования ( $ASET = RESET$ ) предыдущей итерации, пока не будет соблюден критерий сходимости.

Описанная выше методология позволяет быстро и точно рассчитать вероятность возникновения пожара с использованием современных подходов математического моделирования. Она также позволяет получить наиболее точные исходные параметры, которые обеспечивают основу для эффективного совершенствования конструкции.

### **Исходные данные**

Количественная оценка при проведении анализа безопасности жизнедеятельности на основе эксплуатационных характеристик представлена для здания многоцелевого назначения общественного типа (рисунок 1). Это небольшое здание было выбрано исходя из того, что многие из самых масштабных пожаров с большим количеством жертв за последнее десятилетие произошли в зданиях аналогичного назначения и размера, например: пожар в клубе «Хромая лошадь», пожар в клубе «Station», пожар на Гётеборгской дискотеке [8].

Считается, что данный тип зданий характеризуется наиболее высокой смертностью при возникновении пожара, поскольку сравнительно небольшая площадь обусловлена, как правило, довольно низкой высотой потолков, которая приводит к повышенной концентрации дыма быстрее, чем в крупных зданиях с высокими потолками.

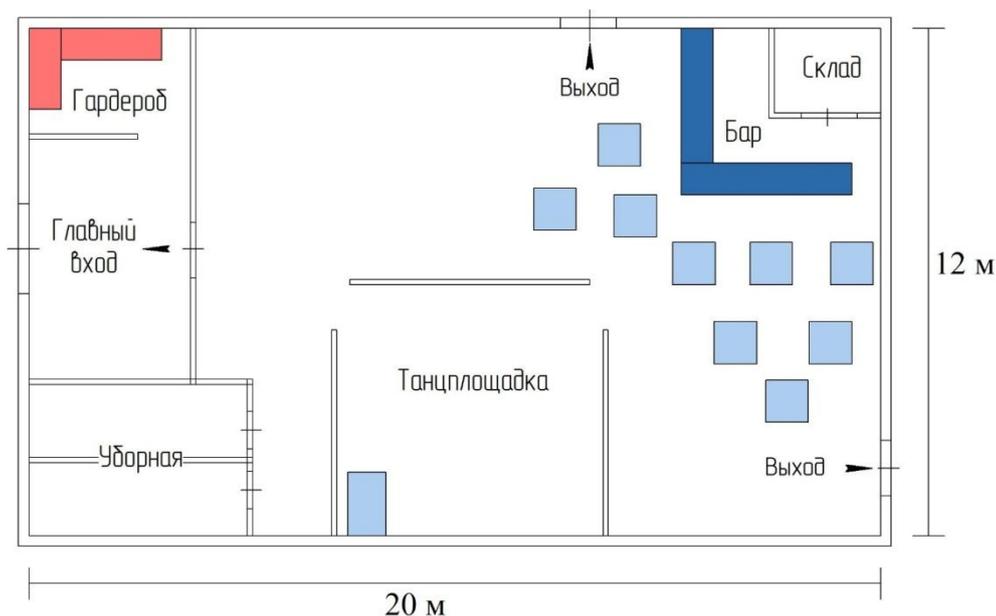


Рисунок 1 – Планировка здания. Высота потолка составляет 4 м

Для получения ASET необходимо исходить из фактических или предельных показателей с тем, чтобы установить предел допустимой концентрации вредных веществ для лиц, находящихся в помещении. Они могут основываться на различных выходных параметрах. Поскольку это может в значительной степени повлиять на результаты, в настоящем документе рассматриваются два различных критерия:

1. Чем выше оптическая плотность (концентрация) дыма, тем хуже видимость в помещении. В данном исследовании средняя оптическая плотность (концентрация) дыма анализируется для порогового значения  $0,15 \text{ м}^{-1}$ , что соответствует видимости около 10 м.

2. Для оценки воздействия монооксида углерода на организм человека предлагается использовать относительную эффективную дозу (FED), которая описывается в международном стандарте ISO 135711. Относительная эффективная доза определяется на основе измеренной концентрации токсичных веществ в воздухе, которой потенциально могут подвергаться животные или люди в течение определенного периода времени.

Модель  $FED_{\text{Общ}}$ , используемая в нашей статье, представляет собой модель, которая основана на принципах модели Шпейтлера [9], учитывающая вещества удушающего действия и тепловой поток. Следовательно, описываемая модель имеет вид:

$$FED_{\text{Общ}} = F'_{\text{удуш}} + F'_{\text{тепл}} \leq 1, \quad (1)$$

где  $F'_{\text{удуш}}$ ,  $F'_{\text{тепл}}$  – эквивалентные дозы удушающего и теплового воздействия.

Для оценки нынешнего уровня безопасности жизнедеятельности в стандартном сборном здании необходимо учитывать различные сценарии, а также соответствующую вероятность их возникновения, которая может быть получена на основе статистики пожаров. В данном случае сценарии были выбраны на основе некоторых из сценариев, предусмотренных национальной ассоциацией противопожарной защиты США (NFPA) [3]:

1. Стандартный проектный пожар на основе сценария NFPA 1, где интенсивность тепловыделения (HRR) используется для анализа безопасности жизнедеятельности. Данный

сценарий является базовым. Пожар локализован в баре в связи с высокой вероятностью возникновения пожара.

2. Предполагается, что скрытый, медленно развивающийся огонь (тлеющий) возникает в складском помещении. Мгновенное распространение огня и дыма происходит при открытии двери или после ее сгорания (прогорания).

3. Пожар вблизи главного входа, пострадавшие могут для эвакуации использовать только запасные выходы.

4. Сценарий сверхбыстрого пожара будет рассматриваться как исключение фазы линейного роста в моделируемом пожаре с использованием критериев оптической плотности и относительной эффективной дозы (FED). Вероятность возникновения подобного сценария низкая. Очаг возгорания находится в непосредственной близости от DJ стойки. Данный сценарий может быть спровоцирован легковоспламеняющимися украшениями интерьера, например, как при пожаре в клубе «Хромая лошадь».

Предполагается, что все описанные выше сценарии пожаров основываются на реакции пенополиуретана, приводящей к довольно большому количеству дыма и выбросу удушьяющих газов. Данные предположения являются обоснованными с учетом имеющегося опыта вышеупомянутых трагических пожаров.

Поиск стохастических моделей для различных параметров моделирования как пожара, так и эвакуации является весьма трудным, поскольку такие данные обычно отсутствуют или являются весьма ограниченными и применимы только в конкретных случаях. Таким образом, модели, включенные в следующие разделы, составлены на основе [7, 9].

Значения, приведенные в таблице 1 и в конечном итоге включенные в анализ, представляют собой наиболее обоснованные вероятности, подкрепляемые имеющейся информацией.

Таблица 1 – Стохастическая модель для количественной оценки надежности безопасности жизнедеятельности

Параметр	Ед. изм.	Распределение	Значение	Отклонение	Погрешность %
$Q_{\max}$	кВт/м <sup>2</sup>	Гаусс	500	100	20
$t_g$	с	Гумбель	250	50	20
$u_{CO}$	мг/м <sup>3</sup>	Гаусс	0,090	0,030	33
$u_{HCN}$	мг/м <sup>3</sup>	Гаусс	0,006	0,002	33
$u_C$	мг/м <sup>3</sup>	Гаусс	0,120	0,040	33
Плотность заполнения помещения	чел/м <sup>2</sup>	Гумбель	1,5	0,5	33
Время предупреждения	с	Гаусс	60	15	25
Время до начала движения	с	Гумбель	90/180	25/45	28/25
Скорость	м/с	Гаусс	1,25	0,3	24
Ширина плеч	м	Гаусс	0,51	0,07	14

### **Моделирование пожара**

Наиболее распространенными неопределенными параметрами, которые необходимо задать для расчетных пожаров, являются максимальные значения теплоотдачи ( $Q_{\max}$ ) и тепловая нагрузка ( $Q$ ).

В рассматриваемых случаях предполагается нормальное распределение тепловой нагрузки в сборочных/офисных зданиях со средним показателем  $600 \text{ МДж/м}^2$ . Для дальнейшего анализа тепловая нагрузка будет использоваться детерминированно со средним значением  $600 \text{ МДж/м}^2$ .

Для максимальной скорости теплоотдачи выбрано среднее значение  $500 \text{ кВт/м}^2$  со стандартным отклонением  $100 \text{ кВт/м}^2$ .

Скорость роста пожара ( $t_g$ ) является наиболее значимым параметром. В литературе можно найти стохастические модели с различными характеристиками. Магнуссон С. Е. и др. используют равномерное распределение для  $\alpha$  в диапазоне от  $0,001$  до  $0,01 \text{ кВт/с}^2$  [10]. Хазофер А. М. также использует равномерное распределение для скорости распространения огня в диапазоне от  $0,1$  до  $2,0 \text{ м/с}$  [11].

Вышеперечисленным параметрам необходимы дополнительные параметры для представления неопределенности в генерации побочных продуктов при пожаре, таких как удушьяющие газы или ограничения видимости из-за дыма. Обычно для анализа наиболее актуальными являются выбросы монооксида углерода (CO), диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) и цианистого водорода (HCN), в то время как выброс сажи ( $u_c$ ) является контрольной переменной в оценках порога видимости.

### **Моделирование эвакуации**

Для моделирования эвакуации рассматривались только физические параметры. Ранее было доказано, что наиболее значимыми параметрами для моделирования эвакуации являются время до начала движения и плотность заполнения помещения [12].

Плотность заполнения помещения может быть выражена как абсолютным количеством людей, так и количеством людей на единицу площади.

Ее можно найти в строительных нормах и стандартах. Немецкий строительный кодекс предписывает значение  $2 \text{ чел/м}^2$ , как максимально возможную плотность заполнения зданий общественного назначения.

Если проанализировать пожар в клубе «Station» с примерным числом  $460$  человек на  $350 \text{ м}^2$  площади (без служебных помещений), то понятно, что средняя плотность заполнения помещения  $1,3 \text{ чел/м}^2$  может привести к катастрофическому результату.

В нашем случае для здания выбрано среднее значение плотности заполнения помещения  $1,5 \text{ чел/м}^2$  и стандартное отклонение  $0,5 \text{ чел/м}^2$ . Следует отметить, что уровень заполняемости оказывает большое влияние на время эвакуации. Приведенная стохастическая модель является консервативной, допускающей перепополненность, даже несмотря на то, что вероятность возникновения сильного пожара при одновременном высоком уровне заполняемости помещения можно считать относительно низкой.

Для исследования получены и использованы модели средней плотности для общей площади. Высокое влияние на предельное состояние было также обнаружено для времени предупреждения и времени до начала движения к выходу. Время предупреждения состоит из времени обнаружения и оповещения, принимается со средним значением  $60 \text{ с}$  и стандартным отклонением  $15 \text{ с}$ . В качестве ассиметричного распределения было выбрано распределение Гумбеля (макс.) со средним значением  $180 \text{ с}$  со стандартным отклонением  $45 \text{ с}$ . Данные значения можно считать разумными, поскольку было смоделировано, что все посетители начинают движение одновременно, что приводит к большим заторам на выходе. Другие модели выведены и описаны для конкретных рассматриваемых сценариев.

Оставшиеся параметры – скорость и ширина плеч, представляют собой ожидаемую максимальную скорость в направлении эвакуации и ограничение оттока людей через выходы. Для анализа эти значения считаются нормально распределенными.

Наряду со стохастическими моделями оцениваются описанные сценарии на предмет их вероятности отказов. Поскольку каждый из четырех выбранных сценариев является возможным, они должны оцениваться в рамках системного подхода с соответствующей вероятностью их реализации. Базовый период системы выбирается равным одному году. Поскольку возникновение пожара в течение срока службы здания ( $t \geq 0$ ) предполагается пуассоновским процессом, время между пожарами экспоненциально распределяется с помощью нормируемого параметра  $\lambda > 0$ , обозначающего ожидаемое количество пожаров за единицу времени.

### Системный анализ

Для оценки общей надежности системы сценарии составляются в виде дерева событий. Частоты возгорания приведены в различных публикациях и стандартах, таких как BS 7974. При этом была выбрана общая годовая вероятность в 2 %. Зачастую действия по борьбе с пожаром предпринимаются людьми, находящимися в здании. Холборн П. Г. считает, что вероятность провала самостоятельной ликвидации пожара составляет 75 % [13]. При успехе (25 %) пожар считается ликвидированным или, по крайней мере, локализованным таким образом, чтобы предотвратить последующую опасность для лиц, находящихся в здании.

В случае неудачи самостоятельного тушения возгорания вероятность возникновения «стандартного сценария» составляет 50 %. Это предположение основано на выводах П. Г. Холборна о том, что пожары площадью от 1 до 10 м<sup>2</sup> происходят в 49 %. Возгорания площадью менее 1 м<sup>2</sup> происходят в 26 % случаев, так что вероятность медленного, тлеющего пожара выбирается равной 25 %. Остальные 25 % это случаи, когда происходит ультрабыстрый пожар (10 %) и блокирование основных путей эвакуации (15 %). Значения выбраны на основе [13]. Полученное дерево событий со всеми упомянутыми выше вероятностями изображено на рисунке 2.

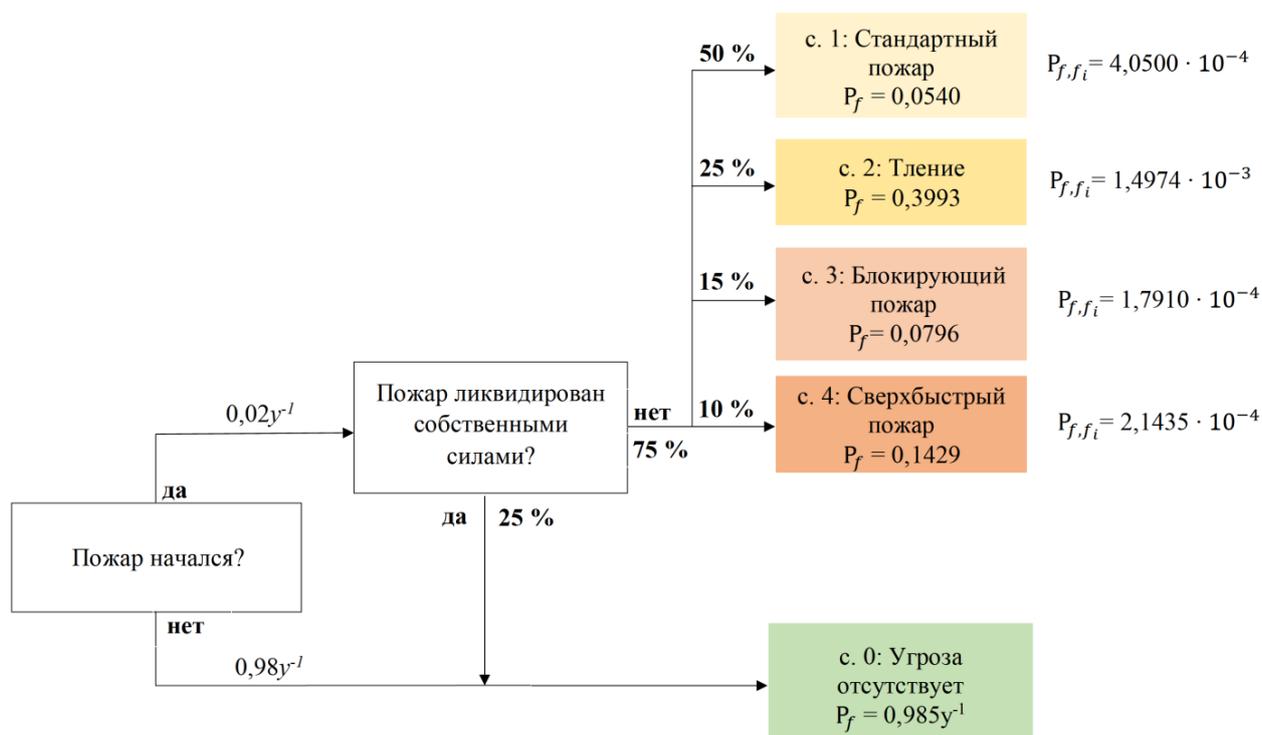


Рисунок 2 – Дерево событий анализа сценариев

### **Стандартный сценарий**

Стандартный сценарий был оценен как для критериев оптической плотности, так и для критериев FED с целью получения исходных вероятностей отказа. Факт того, что пороговые значения концентрации вредных веществ достигаются до того, как все лица, находящиеся в помещении, покинули его, приводит к высоким вероятностям отказа, которые приведены в таблице 2.

Кроме расчета вероятности отказа, разработанный алгоритм позволяет проводить базовый анализ чувствительности ( $\alpha_i$ ). Для оптической плотности наибольшее влияние оказывают скорость роста пожара ( $t_g$ ) и плотность заполнения помещения людьми ( $\rho$ ). Для FED влияние  $t_g$  еще больше, в то время как влияние количества людей, находящихся в помещении, так и времени, предшествующего перемещению  $\tau$ , уменьшается.

Таблица 2 – Результаты анализа для стандартного сценария

Критерий	$\alpha_{t_g}$	$\alpha_\rho$	$\alpha_\tau$	$P_{f1}$ %
FED	-0,9	0,2	0,4	5,4
Оптическая плотность	-0,6	0,5	0,6	68,2

### **Скрытый пожар**

Для изначально скрытого сценария пожара необходимо было внести некоторые коррективы как в стохастическую модель, так и в конструкцию пожара, чтобы учесть специфический риск, связанный с этим сценарием. Предполагается, что пожар начнется в складском помещении, при закрытой двери, что приведет к пожару с коэффициентом эквивалентности  $\Phi > 1,0$ . Предполагается, что HRR(t) в данном случае линейно возрастает до 2 % от HRR<sub>макс</sub> за время  $t_g$ , а затем линейно возрастает до 25 % от HRR<sub>макс</sub> за другое время  $t_g$ .

Принимаем, что дверь откроется или выйдет из строя через 300 секунд (5 минут), что приведет к мгновенному выбросу накопленных токсинов из складского помещения. Таким образом, 300 секунд добавляются к среднему времени предупреждения.

Опасность воздействия данного сценария становится очевидной при рассмотрении вероятности отказа. Для оптической плотности вероятность отказа больше 99 %, что означает, что практически в каждом случае по крайней мере один человек будет подвержен высокой оптической плотности дыма до того, как он сможет безопасно покинуть помещение. Для FED вероятность отказа составляет около 40 %, что также значительно выше, чем в стандартном сценарии (более чем в 7 раз). Ввиду того что многие посетители будут значительно замедлены густым, токсичным дымом, фактический процент может быть еще выше.

### **Блокирующий пожар**

В данном сценарии основной выход из помещения заблокирован пожаром, развивающимся в гардеробной. Чувствительность по сравнению со стандартным сценарием имеет тенденцию к небольшим изменениям, но порядок величин остается прежним; скорость роста пожара и плотность заполнения помещения людьми все еще являются наиболее значимыми критериями.

### **Сверхбыстрый пожар**

Этот сценарий считается важным, поскольку быстро развивающиеся пожары унесли много жизней, как, например, пожар в 2009 г. в клубе «Хромая лошадь», г. Пермь, Россия, где украшения интерьера загорелись от фейерверков, что привело к очень быстрому развитию пожара. Для ультрабыстрого пожара здесь предполагается, что HRR(t) развивается квад-

ратично. Причиной может быть также фейерверк и легковоспламеняющийся декоративный материал. Видео с пожара клуба «Хромая лошадь» демонстрирует, что время до начала эвакуации может быть довольно долгим, что в конечном счете способствует фатальному исходу.

Как и в сценарии скрытого пожара, вероятность отказа в случае сверхбыстрого сценария была больше 99 % для критерия оптической плотности и около 14 % для порогового значения FED. Наибольшая чувствительность обнаружена для трех параметров, приведенных в таблице 3. Выбросы HCN также оказывают достаточно большое влияние на предельное состояние с чувствительностью 0,2. Датчики дыма в симуляциях срабатывают в среднем через 30 с.

Таблица 3 – Результаты анализа для сверхбыстрого сценария

Критерий	$\alpha_{tg}$	$\alpha_{\rho}$	$\alpha_{\tau}$	$P_{f4}$ %
FED	-0,7	0,3	0,6	14,3
Оптическая плотность	-0,6	0,6	0,6	99,4

### **Выводы**

В соответствии с вышеизложенным подходом в настоящее время существует возможность количественной оценки действующих норм и правил с использованием современных математических методов. Полученные результаты вероятности возникновения отказов могут впоследствии использоваться в качестве количественной характеристики для альтернативных конструкций зданий и сооружений.

Предложенный метод позволяет напрямую сравнивать сценарии возникновения пожаров, что позволяет идентифицировать наиболее релевантные сценарии с учетом вероятности их возникновения. Анализ чувствительности выявляет наиболее значимые параметры, что позволяет инженеру-конструктору выбрать те из них, которые оказывают наибольшее влияние на уровень безопасности. Это позволяет не только повысить безопасность зданий, но и найти более экономичные решения.

Анализ, приведенный выше, показал, что для этой конкретной проблемы наиболее релевантными показателями являются: скорость распространения пожара, численность лиц, находящихся в здании, время до начала эвакуации. Таким образом, ограничение количества легковоспламеняющихся материалов или числа людей, находящихся в помещении, а также внедрение продвинутых систем оповещения являются наиболее эффективными мерами с точки зрения уровня безопасности в данном исследовании.

Следует отметить, что неопределенности, лежащие в основе математических моделей, были полностью проигнорированы. В будущем необходимо разработать методику, учитывающую различные типы зданий, используя различные модели для моделирования пожара и эвакуации, чтобы вывести средний уровень безопасности, который впоследствии может быть использован для концепции безопасности жизнедеятельности, основанной на информации о рисках. Различные системы противопожарной защиты и их влияние на уровень безопасности жизнедеятельности будут рассмотрены в дальнейших исследованиях.

### **Список литературы**

1. Российская Федерация. Законы. О противопожарном режиме : Постановление Правительства Российской Федерации от 25.04.2012 № 390 (ред. от 30.12.2017). – Москва : Кодекс.
2. BS 7974. Application of Fire Safety Engineering Principles to the Design of Buildings. Code of Practice, Technical Report, British Standards Institution (BSI), 2001.
3. NFPA 101, NFPA 101: Life Safety Code, National Fire Protection Association (NFPA) : [сайт]. – 2008. – URL: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=101> . – Текст : электронный.
4. Mason, R. L. Statistical Design and Analysis of Experiments – With Applications to Engineering and Science / R. L. Mason, R. F. Gunst, J. L. Hess. – 2nd ed. – NJ : John Wiley & Sons Inc., Hoboken, 2003. – ISBN 978-0-471-37216-5.

5. Sensitivity Analysis in Practice – A Guide to Assessing Scientific Models / A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo, M. Ratto. – UK : John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2004.
6. Bucher, C. G. A fast and efficient response surface approach for structural reliability analysis, Struct / C. G. Bucher, U. Bourgund // Structural Safety. –1990, January. – Vol. 7, Issue 1. – P. 57–66.
7. Lancaster, P. Surfaces generated by moving least squares methods / P. Lancaster, K. Salkauskas // Mathematics of Computation. – 1981. – Vol. 37, Issue 155. – P. 141–158.
8. Задурова, А. А. Вопросы обеспечения безопасности людей при пожарах в ночных клубах / А. А. Задурова, Э. А. Джафаров // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2019. – № 10. – С. 114–116.
9. Speitel, L.C. Fractional effective dose model for post-crash aircraft survivability / L. C. Speitel // Toxicology. – 1996. – Vol. 115, Iss. 1–3. – P. 167–177.
10. Magnusson, S. E. Fire safety design based on calculations: Uncertainty analysis and safety verification / S. E. Magnusson, H. Frantzich, K. Harada // Fire Safety Journal. – 1996. – Vol. 27, Iss. 4. – P. 305–334.
11. Hasofer, A. M. Response surface modelling of Monte Carlo fire data / A. M. Hasofer, J. Qu // Fire Safety Journal. – 2002. – Vol. 37, Iss. 8. – P. 772–784.
12. Яковлев, В. А. Основные аспекты обеспечения пожарной безопасности в техносфере / В. А. Яковлев // МНИЖ. – 2020. – № 11–1(101). – С. 78–84.
13. Holborn, P. G. An analysis of fire sizes, fire growth rates and times between events using data from fire investigations / P. G. Holborn, P. Nolan, J. Golt // Fire Safety Journal. – 2004. – Vol. 39, Iss. 6. – P. 481–524.

***В. К. Джеломанова-Кутана***  
***ИП Кутана Г. В., г. Севастополь***

**Разработка алгоритма прогнозирования вероятности возникновения пожаров  
методом количественного анализа**

В статье представлен подход, позволяющий количественно оценить уровень безопасности для проектирования системы безопасности жизнедеятельности с использованием вероятностного анализа риска. Результирующая вероятность отказа  $P_{fi}$  системы безопасности жизнедеятельности для конкретного сценария ( $i$ ) предоставляет количественную оценку уровня безопасности жизнедеятельности. Кроме того, исследуемая методология учитывает неопределенность входных параметров и предоставляет информацию о чувствительности исследуемой модели к различным параметрам. В данном исследовании была применена методология количественной оценки для многоцелевого здания общественного типа.

В настоящее время существует возможность количественной оценки действующих норм и правил с использованием современных математических методов. Полученные результаты вероятности возникновения отказов могут впоследствии использоваться в качестве количественной характеристики для альтернативных конструкций зданий и сооружений.

Предложенный метод позволяет напрямую сравнивать сценарии возникновения пожаров, что позволяет идентифицировать наиболее релевантные сценарии с учетом вероятности их возникновения. Анализ чувствительности выявляет наиболее значимые параметры, что позволяет инженеру-конструктору выбрать те, которые оказывают наибольшее влияние на уровень безопасности. Это позволяет не только повысить безопасность зданий, но и найти более экономичные решения.

Проведенный анализ показал, что для этой конкретной проблемы наиболее релевантными показателями являются: скорость распространения пожара, численность лиц, находящихся в здании, время до начала эвакуации. Таким образом, ограничение количества легковоспламеняющихся материалов или числа людей, находящихся в помещении, а также внедрение продвинутых систем оповещения являются наиболее эффективными мерами с точки зрения уровня безопасности в данном исследовании.

**БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА РИСКОВ, КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ МЕТОД, СЦЕНАРИИ ПОЖАРА, АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ**

***V. K. Dzhelomanova-Kutana***  
***SP Kutana G. V., Sevastopol***

**Algorithm Development for Predicting Fire Probability by the Quantitative Analysis Method**

The article presents an approach that allows to quantify the safety level for the life safety system design using probabilistic risk analysis. The resulting failure probability  $P_{fi}$  of the life safety system for the particular scenario ( $i$ ) provides a quantitative assessment of the life safety level. In addition, the investigated methodology takes into account the uncertainty of the input parameters and provides information on the sensitivity of the investigated model to various parameters. In this study, a quantitative assessment methodology for the multipurpose public building was applied.

Currently, it is possible to quantify the current rules and regulations using modern mathematical methods. The obtained results of the failure probability can subsequently be used as a quantitative characteristic for alternative structures of buildings and constructions.

The proposed method allows direct comparison of fire scenarios, which makes it possible to identify the most relevant scenarios, taking into account the probability of their occurrence. The sensitivity analysis identifies the most significant parameters, allowing the design engineer to select those that have the greatest impact on the safety level. This allows not only to improve the safety of buildings, but also to find more cost-effective solutions.

The analysis showed that for this particular problem the most relevant indicators are: the rate of the fire spread, the number of people in the building, the time before the evacuation. Thus, limiting the amount of flammable materials or the number of people in the room, as well as the introduction of advanced warning systems are the most effective measures in terms of the safety level in this study.

LIVING SAFETY, FIRE SAFETY, PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT, QUANTITATIVE METHOD, FIRE SCENARIOS, SENSITIVITY ANALYSIS

**Сведения об авторе:**

**В. К. Джеломанова-Кутана**

SPIN-код: 3976-5414

ORCID: 0000-0001-6890-3319

Телефон: + 38 (071) 307-24-43

Эл. почта: victoriadkk@mail.ru

*Статья поступила 16.03.2021*

*© В. К. Джеломанова-Кутана, 2021*

*Рецензент: М. В. Коновальчик, канд. техн. наук, АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»*