

## Ранжирование территорий по уровню пожарной защищенности зданий общеобразовательных учреждений.

В.М.Колодкин

Одной из характеристик уровня пожарной защищенности зданий общеобразовательных учреждений, является величина индивидуального пожарного риска. Сопоставительный анализ количественных значений оценок пожарного риска, позволяет выделить здания общеобразовательных учреждений с высоким уровнем пожарной опасности. Именно к этим объектам должны в первую очередь применяться меры для уменьшения пожарной опасности. Динамика изменения количественных оценок риска позволяет проверить эффективность мер и, при необходимости, откорректировать меры, направленные на снижение ущербов от пожаров в общеобразовательных учреждениях. Количественная оценка пожарного риска, обеспечивая условия для ранжирования зданий по уровню пожарной защищенности, позволяет определиться с путями снижения уровня пожарной опасности с учетом существующих финансовых ограничений. Ранжирование зданий в зависимости от величины пожарного риска является необходимым условием для управления рисками, для применения организационных, экономических рычагов с целью увеличения пожарной защищенности зданий.

Оценке величины индивидуального пожарного риска, в настоящее время, посвящено большое количество работ, например [1,2]. Целью данной работы является ранжирование территорий по уровню пожарной защищенности зданий общеобразовательных учреждений, размещенных в пределах территориального образования. Ранжирование территорий способствует корректному распределению ограниченных финансовых ресурсов, распределяемых между территориями для обеспечения пожарной безопасности.

Для конкретизации рассмотрено ранжирование районов Удмуртской республики по уровню пожарной защищенности школьных зданий. В настоящее время в Удмуртской Республики ~ 600 общеобразовательных учреждений. Для целей данной работы выборка общеобразовательных учреждений включала ~ 160 учреждений. Эти учреждения расположены на территориях ~ 25 районов, которые сравнивались между собой по уровню пожарной защищенности зданий общеобразовательных учреждений.

Величины пожарного риска для зданий общеобразовательных учреждений, расположенных в пределах района, рассматриваются как значения случайной функции. Ранжирование районов проводилось на основе средних по районам значений индивидуального пожарного риска  $\overline{Q_B}$  (выборочное среднее). На первом этапе для каждого района рассчитывались значения выборочного среднего и выборочной дисперсии  $s^2$  -

$$\overline{Q_B} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot N_i}{\sum_{i=1}^n N_i}, \quad s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (Q_i \cdot N_i - \overline{Q_B} \cdot \overline{N})^2, \quad (1)$$

где  $\overline{N} = \sum_{i=1}^n N_i / n$ ,  $Q_i$  – величина индивидуального пожарного риска для  $i$ -го здания общеобразовательного учреждения, размещенного в пределах района, в расчете на одного человека;

$N_i$  - число людей в здании  $i$ ;

$n$  – количество зданий в пределах района.

На втором этапе отсеивались значения индивидуального пожарного риска, значения которых не укладывались в интервал  $\pm 3 \cdot s$ . По множеству значений индивидуального пожарного риска, отвечающих условию

$$|Q_i \cdot N_i - Q_B \cdot N| \leq 3 \cdot s,$$

определялось среднее по району значение индивидуального пожарного риска  $Q_B$ , которое и использовалось в процедуре ранжирования районов территориального образования по уровню пожарной защищенности зданий общеобразовательных учреждений.

Процедура отсеивания значений индивидуального пожарного риска позволяет исключить из рассмотрения здания общеобразовательных учреждений, при формировании пространственно-информационных моделей которых, были допущены существенные ошибки.

Величина индивидуального пожарного риска для здания  $Q_B$  может быть определена соотношением [3] –

$$Q_B = Q_n \cdot (1 - R_{ап}) \cdot P_{пр} \cdot (1 - P_э) \cdot (1 - P_{ПЗ}) \quad (2)$$

где  $Q_n$  - частота возникновения пожара в здании в течение года;

$R_{ап}$  - вероятность эффективного срабатывания установок автоматического пожаротушения;

$P_{пр}$  - вероятность присутствия людей в здании;

$P_э$  - вероятность эвакуации людей;

$P_{ПЗ}$  - вероятность эффективной работы системы противопожарной защиты.

Вероятность эффективной работы системы противопожарной защиты  $P_{ПЗ}$  в соответствии с [3] –

$$P_{ПЗ} = 1 - (1 - R_{обн} \cdot R_{соуэ}) \cdot (1 - R_{обн} \cdot R_{ПДЗ}), \quad (3)$$

или в соответствии с уточнением [4]:

$$P_{ПЗ} = R_{обн} \cdot [1 - (1 - R_{соуэ}) \cdot (1 - R_{ПДЗ})]. \quad (4)$$

В этих выражениях:

$R_{обн}$  - вероятность эффективного срабатывания системы пожарной сигнализации;

$R_{соуэ}$  - условная вероятность эффективного срабатывания системы оповещения людей о пожаре и управления эвакуацией, в случае эффективного срабатывания системы пожарной сигнализации;

$R_{ПДЗ}$  - условная вероятность эффективного срабатывания системы противодымной защиты в случае эффективного срабатывания системы пожарной сигнализации.

Для зданий общеобразовательных учреждений, в соответствии с рекомендациями [3], положим:

$R_{ап} = 0.9$  при наличии в здании системы автоматического пожаротушения и  $R_{ап} = 0$  в противном случае;

$R_{обн} = 0.8$ ;

$R_{соуэ} = 0.8$ ;

$R_{ПДЗ} = 0.8$ .

Положим, что вероятность присутствия людей в зданиях общеобразовательных учреждений -  $P_{пр} = 0.42$ .

Средняя по России частота возникновения пожара в здании общеобразовательного учреждения в течение года [3] -  $Q_n = 4.16 \cdot 10^{-5} \cdot N$ , где  $N$  – количество учащихся в учреждении. Для учета имманентных свойств зданий, воспользуемся разложением функции  $Q_n$  в ряд по параметрам, характеризующим свойства здания с точки зрения пожарной защищенности:

- огнестойкость здания (средняя по зданию огнестойкость конструктивных элементов здания),  $\mu_1$ ;

- износ оборудования здания, влияющего на пожарную защищенность (износ электропроводки, отопительного оборудования),  $\mu_2$ ;
- климатические факторы,  $\mu_3$ .

Факторы, характеризующие пожарную защищенность здания и учитывающиеся в выражении для величины пожарного риска (2), в разложении функции  $Q_n$  не рассматриваются. Также можно пренебречь влиянием климатических факторов  $\mu_3$  на частоту  $Q_n$ , если территориальное образование не выходит за границы одной климатической зоны. Если  $\langle Q_n \rangle$  - оценка математического ожидания частоты возникновения пожара в здании в расчете на одного человека в течение года, а  $\mu_i$  - факторы, влияющие на частоту, то, раскладывая  $Q_n(\mu_i)$  в ряд относительно точки математического ожидания факторов и ограничиваясь первыми членами разложения, имеем -

$$Q_n = Q_n(\langle \mu_1 \rangle, \langle \mu_2 \rangle, \dots, \langle \mu_n \rangle) + \sum_{i=1}^n \beta_i \left( \frac{\mu_i}{\langle \mu_i \rangle} - 1 \right), \quad \beta_i = \frac{\partial Q_n}{\partial \mu_i} \cdot \langle \mu_i \rangle. \quad (5)$$

В этих выражениях:  $\langle \mu_i \rangle$  - математическое ожидание значения  $i$ -ого фактора ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $Q_n(\langle \mu_1 \rangle, \langle \mu_2 \rangle, \dots, \langle \mu_n \rangle)$  - значение частоты в точке математического ожидания значений факторов, которое можно аппроксимировать значением  $\langle Q_n \rangle$ . В первом приближении значение частоты варьируется в пределах  $K$  при максимальной вариации значений факторов. Производная, входящая в выражение  $\beta_i$ , приближается выражением -

$$\frac{\partial Q_n}{\partial \mu_i} = \frac{K \cdot \langle Q_n \rangle}{n \cdot (\mu_{\max} - \mu_{\min})}. \quad (6)$$

Для каждой характеристики разработаны алгоритмы их количественной оценки [5]. Выбрана шкала изменения основных факторов, влияющих на частоту возникновения пожара так, чтобы значения факторов  $\mu_i$  изменялись от 0 до 1, то есть  $\mu_{\max} = 1$ ,  $\mu_{\min} = 0$ . Численное значение параметра  $K$  принимается равным 0.1. Соотношения (5) - (6) позволяют уточнить значение частоты возникновения пожара в здании в течение года  $Q_n$  в зависимости от свойств здания. Для зданий общеобразовательных учреждений, расположенных в пределах территории Удмуртской Республики, результаты уточненных расчетов частоты возникновения пожара, представлены в работе [5]. Уточненные значения частот возникновения пожара были использованы в расчетах величин пожарного риска.

При оценке вероятности эвакуации  $P_e$  может быть использован подход, основанный на сопоставлении временных интервалов: расчетное время эвакуации людей  $t_p$ , интервал времени от возникновения пожара до начала эвакуации  $t_{нэ}$ , время блокирования путей эвакуации  $t_{бл}$  [3,4]. Указанный подход определен нормативными документами, в частности [3]. Вместе с тем, данный подход имеет ряд недостатков [6]. Поэтому при ранжировании зданий по уровню пожарной безопасности, в данной работе было использовано «частотное» определение вероятности эвакуации людей при пожаре. По определению, индивидуальный пожарный риск - вероятность гибели человека при воздействии на него опасных факторов пожара. Вероятность эвакуации людей  $P_e$  может быть определена через вероятность выхода человека из здания.

Для определения вероятности эвакуации  $P_e$  рассмотрим функцию  $x(t)$  - количество людей, вышедших из здания при пожаре к моменту времени  $t$ .  $x(t)$  - ограниченная сверху, кусочно-непрерывная функция, увеличивающая свои значения в моменты времени выхода очередного человека из здания (процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем). Свойства функции:  $x(t=0)=0$ ;  $x(t) \leq N_0$ , где  $N_0$  - количество людей в здании при  $t=0$ . Значения функции  $x(t)$  зависят от многих случайных факторов: сценарий пожара, распределение людей по зданию, распределение пожарной нагрузки и т.д. Функция  $x(t)$  является одной из возможных реализаций случайного процесса  $X(t) = \varphi(t, \omega)$ ,  $\omega \in \Omega$  ( $\Omega$  - пространство элементарных событий). В сечении случайного процесса  $X(t=t^*)$ , имеем совокупность случайных величин  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i, \dots, \xi_m$ .  $\xi_i$  - количество людей вышедших из

здания к моменту времени  $t^*$  в условиях реализации  $i$ -го элементарного события. Распределение случайных величин в произвольном сечении случайного процесса характеризуется математическим ожиданием  $M[X(t)] = m_{\xi}(t)$ . Случайный процесс  $X(t)$  при  $t \geq t^0$  обращается в стационарный, если вариация математического ожидания случайного процесса, обращается в ноль -  $\delta M[X(t \geq t^0)] = 0$ . При этом  $\xi_1(t^0)/N_0, \xi_2(t^0)/N_0, \dots, \xi_n(t^0)/N_0, \dots, \xi_n(t^0)/N_0$  – относительное количество людей, вышедших из здания при пожаре, в условиях реализации соответствующего аварийного сценария. Относительная доля числа людей, вышедших из здания при пожаре, случайным образом принимает значение в интервале от нуля до единицы. Под вероятностью эвакуации людей  $P_s$ , будем понимать нормированное значение математического ожидания случайного стационарного процесса

$$P_s = \frac{1}{N_0} M[X(t \geq t^0)]. \quad (7)$$

Пространство элементарных событий  $\Omega$ , порождающих реализацию случайного процесса, в общем случае, бесконечно. Действительно, элементарные события различаются распределением людей по зданию, местом возникновения пожара в здании и т.д.

Моделирование пожара основано на идеализации тепломассообмена в условиях экзотермической реакции окисления. Состояние среды при пожаре описывается набором характеристик (количество горючего, количество окислителя, скорость компонентов газовой среды и т.д.). Если характеристики среды усредняются по помещению, приходим к интегральной модели [7], если усредняются по элементарному объему – приходим к полевой модели. В частности, двух зонная модель – усреднение характеристик среды по двум зонам в помещении, разделенном горизонтальной плоскостью. Двух зонная модель пожара реализована, в частности, в программном комплексе CFAST [8]. Моделирование пожара в зданиях, внутреннее строение которых не может быть сведено к системе помещений с простой конфигурацией, основано на использовании полевой модели. Полевая модель реализована, в частности, в программном комплексе FDS [9]. Программные комплексы CFAST и FDS - комплексы с открытым кодом и без ограничений на использование.

Результаты моделирования пожара представляются для каждого помещения здания в виде момента времени  $t_{бл}$ , отсчитываемого с момента возникновения пожара, при котором значение хотя бы одного из опасных факторов пожара, достигает критического значения для жизни человека (время блокирования путей эвакуации [3]). Введем функцию доступности  $k$ -го помещения для человека  $\Psi_k$ . Функция  $\Psi_k$  изменяется в пределах от единицы (полная доступность) до нуля (полная недоступность). Для целей данной работы принималось, что функция  $\Psi_k$  скачком изменяется от единицы до нуля при достижении момента времени  $t_{бл}$ .

Предварительные результаты по сопоставлению времен блокирования путей эвакуации, полученных при моделировании пожара в зданиях с использованием различных типов моделей [6], показывают, что наиболее консервативная оценка времени, достигается при использовании интегральной модели пожара в здании. Поэтому для целей данной работы использовалась интегральная модель пожара в здании, которая также отвечает ограничениям, накладываемым моделью.

Обращаясь к задаче моделирования эвакуации людей, отметим, что в России изучение и планирование процесса эвакуации людей прошло длительный путь. Начальное состояние работ было отражено в монографии С.В.Беляева [10]. Современное состояние работ, отражено в работах В.В.Холщевникова и Д.А.Самошина, в частности [11]. В нормативном документе [3] представлены три модели, которые описывают процесс эвакуации людей при пожарах из общественных зданий и сооружений. Математические модели частично реализованы в программных комплексах. Из российских программных комплексов моделирования процесса эвакуации можно выделить Ситис «Флоутек» и Ситис «Эватек» [12]. Процесс эвакуации в рамках комплекса Ситис «Флоутек» анализируется на основе упрощенной аналитической модели движения людского потока

[3]. В основе моделирования эвакуации в рамках комплекса Ситис «Эватек» лежит математическая модель индивидуально-поточного движения людей из здания [3] (аналог программы Simulex [www.iesve.com](http://www.iesve.com) Эдинбургского университета). Указанные программные комплексы ориентированы исключительно на условия локального использования. Для целей данной работы для моделирования процесса эвакуации использовалась имитационно-стохастическая модель движения людских потоков [3,11], программная реализация которой, предусмотрена в рамках проблемно-ориентированного Ресурса «Безопасность в техносфере» (<http://rintd.ru/>) [2].

Для каждого здания, размещенного в пределах территориального образования, рассчитывается величина индивидуального пожарного риска в соответствии с (2). Вероятность эвакуации людей из здания при пожаре, рассчитывается на основе соотношения (7). При этом для каждого здания создается пространственно-информационная модель. В автоматическом режиме на основе модели здания строится граф связности помещений, который определяет пути эвакуации людей из каждого помещения здания. Граф связности помещений перестраивается по мере развития пожара и изменений функций доступности помещений для человека  $\Psi_k$ . При расчете вероятности эвакуации людей из здания, в соответствии с (7), рассматривается  $M$  случаев реализации случайного процесса. Элементарные события, порождающие случайный процесс, в данном случае различаются местом возникновения пожара и распределением людей по зданию. Место возникновения пожара в здании в каждом из  $M$  случаев определяется процедурой случайного выбора (монте-карловской процедурой). Распределение людей по зданию подчиняется условию нормировки -

$$N_0 = \int_S g(x,y) dx \cdot dy, \quad (8)$$

где  $g(x,y)$  – начальная плотность распределения людей по зданию, площадь которого  $S$ . При каждом испытании на функцию плотности распределения людей накладывается возмущение, так чтобы, наряду с условием (8) для каждого из помещений здания  $k$  выполнялось условие -

$$N_k \leq \int_{S_k} \tilde{g}(x,y) dx \cdot dy, \quad (9)$$

где  $N_k$  - предельное количество людей в помещении  $k$ ,  $S_k$  - площадь помещения.

Таким образом, при расчете вероятности эвакуации людей в условиях пожара для каждого из зданий, расположенных в пределах территориального образования, моделируются  $M$  аварийных сценариев. Предварительно строится пространственно-информационная модель здания. Аварийные сценарии идентифицируются значениями случайных функций: место возникновения пожара; распределение людей по зданию в момент возникновения пожара. Для каждого аварийного сценария цикл моделирования включает: моделирование развития пожара за элементарный интервал времени, корректировка функций доступности помещений для человека  $\Psi_k$ , построение графа связности помещений в здании, моделирование эвакуации людей из здания. Для каждого из  $M$  аварийных сценариев процесс моделирования продолжается до тех пор, пока случайная величина  $\xi_i$  ( количество людей вышедших из здания при реализации  $i$ -го сценария) не обратится в константу.

Расчеты значений индивидуального пожарного риска базировались на возможностях проблемно-ориентированного Ресурса «Безопасность в техносфере» (<http://rintd.ru/>) [2].

Ранжирование районов Удмуртской Республики проводилось на основании сопоставления выборочных средних по соотношениям (1).

Работа выполнена в рамках гранта АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» «Паспорт безопасности образовательного учреждения как основа управления рисками в образовательных учреждениях России».

#### Список литературы

1. Колодкин В.М., Варламов Д.В., Малых Д.М. Количественная оценка пожарного риска образовательных учреждений // Пожаровзрыво Безопасность №4 2010, с.4-7.
2. В.М.Колодкин, О.А.Морозов, Д.В.Варламов. Количественная оценка пожарного риска общественных зданий территориального образования //Проблемы анализа риска, том 8, № 3, 2011, с.50-56
3. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. Приложение к Приказу МЧС РФ от 30.06.2009 г. № 382 (Зарегистрировано в Минюсте РФ 6.08.2009 № 14486).
4. Седов Д.В. Уточнение методики расчета индивидуального пожарного риска // Пожарная безопасность , №2, 2010, с 116-122
5. Варламова Д.М. Программный комплекс «Частотный анализ пожарной безопасности общественных зданий»
6. В.В.Холщевников, А.А.Самошин, И.Р.Белосохов и др. Парадоксы нормирования обеспечения безопасности людей при эвакуации из зданий и пути их устранения // Пожаровзрывобезопасность , том 20, №3, 2011, с 41- 51.
7. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении Учебное пособие. - М.: Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
8. Fire Growth and Smoke Transport Modeling with CFAST ( <http://cfast.nist.gov/> )
9. Fire Dynamic Simulator – FDS (<http://fire.nist.gov/fds/> )
10. Беляев С.В. Эвакуация зданий массового назначения. Издательство Всесоюзной академии архитектуры. 1938 г.
11. В.В.Холщевников, Д.А.Самошин. Эвакуация и поведение людей при пожарах. Учебное пособие. - М.: Академия ГПС МЧС России, 2009, 210 с.
12. <http://www.sitis.ru/>