

Н.И. Васильев / N.I. Vasil'ev¹канд. техн. наук **И.А. Мовчан / I.A. Movchan, Ph.D.¹**

Przyjęty/Accepted/Принята: 10.06.2014;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 10.05.2015;

Opublikowany/Published/Опубликована: 31.03.2016;

Математическая модель и оценка риска ликвидации пожара²

Mathematical Model and Risk Evaluation for Firefighting

Model matematyczny i ocena ryzyka zwalczania pożaru

АННОТАЦИЯ

Цель: Ставится задача разработать метод определения риска процесса ликвидации пожара на объекте защиты с использованием основных положений теории надежности с разработкой функциональных моделей риска каждой технологической операции процесса ликвидации пожара, на основании которых получить математическую модель риска ликвидации пожара с установлением влияния составляющих риска на обеспеченность проектами и программами каждой технологической операции, которая влияет на эффективность тушения пожара.

Методы: В работе использован комплексный подход для определения риска своевременной ликвидации пожара с учетом всех технологических операций этого процесса. За основу при определении каждой составляющей риска использовались нормативные времена на выполнение той или иной операции технологического процесса. Для определения составляющих риска использовались зависимости распределения Вейбулла, экспоненциального и нормального законов распределения. Для выбора закона распределения выполнялся метод статистического моделирования параметров надежности каждой технологической операции.

Результаты: Результаты работы позволяют выявлять узкие места в работе пожарно-спасательных подразделений, а за счет анализа факторов, породивших эти причины, которые влияют на качество работы, устранять их и значительно повышать эффективность ликвидации пожаров. Например, разработка проекта выбора оптимальных путей следования до крайних границ района обслуживания позволяет уменьшить время следования на 30-35%, а внедрение автоматизированных систем расчета сил и средств ликвидации пожаров с учетом прогнозируемого времени свободного горения на пожаре значительно уменьшает значение риска несвоевременной ликвидации пожара.

Выводы: Предложенный метод определения риска ликвидации пожара дает возможность на основании статистических данных по времени ликвидации пожаров выполнять анализ работы пожарно-спасательных подразделений и выявлять узкие места в их работе. Результаты анализа риска ликвидации пожара показывает, что основным узким местом в работе пожарно-спасательных подразделений есть время следования к месту вызова. Для уменьшения времени локализации, тушения и дотушивания пожара на месте вызова, как показали результаты расчета, необходимо направлять оптимальное количество пожарно-спасательных подразделений.

Ключевые слова: пожар, ликвидация пожара, риск ликвидации пожара, математическая модель, распределение Вейбулла, экспоненциальное распределение, нормальное распределение, информационные технологии.

Вид статьи: оригинальная научная работа

ABSTRACT

Aim: The purpose of this article is to identify risks during firefighting operations, utilizing the basic principles of reliability theory, but also functional probability models, for all stages of the firefighting processes. With the aid of acquired data, develop a mathematical model to describe uncertainties associated with various phases of firefighting and define the influence of component parts, through projects and programmes for each operational element, on the overall outcome in the fight with a fire.

Methodology: The article utilised a complex approach to identify the probability of overcoming a fire within required timescales, by taking account of all tasks associated with the process. The probabilistic description of each component was based on the use of standard time for the completion of a given task. In order to determine each component of risk, the study utilised Weibull's distribution, exponential and normal laws of distribution. During the selection of distribution laws use was made of statistical modelling methods to determine the confidence levels for each operational task.

Results: Study results facilitate identification of weak areas in the operational performance of teams engaged in firefighting. From an analysis of factors influencing the quality of performance, adverse performance can be eliminated and consequently the effectiveness of firefighting can be significantly improved. Illustratively, the project development of access road selection and use of optimal routes within the operational boundary of a response unit will allow for a reduction in travelling time to an incident location by 30-35%. The application of automated calculation

¹ Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности / Lviv State University of Life Safety; e-mail: nikita888hans@ukr.net;

² Авторы внесли одинаковый вклад в создание статьи / The authors contributed equally to this article;

systems, to determine resource needs in fighting fires and by taking account of predicted timescales for undisturbed burning, will significantly reduce the probability value of failure in extinguishing fires within appropriate/desired time scales.

Conclusions: The proposed method for determining the probability of combating fires enables, on the basis of statistical data dealing with lead time for extinguishing fires, the conduct of work analysis for firefighting teams and to diagnose their weaknesses. Analysis of results reveals that the main weakness in team performance is the time taken for the journey to an incident location. Calculations indicate that, in order to reduce the time taken to locate and extinguish the fire, and clear the site of the incident, it is necessary to have at disposal an optimal number of firefighting teams.

Keywords: fire, extinguishing a fire, probability of extinguishing a fire, mathematical model, Weibull exponential distribution, normal distribution, information technology

Type of the article: original scientific article

ABSTRAKT

Cel: Celem artykułu jest opracowanie metody określenia ryzyka procesu zwalczania pożaru w chronionym obiekcie z wykorzystaniem podstawowych założeń teorii niezawodności, a także funkcjonalnych modeli ryzyka dla każdej operacji taktycznej w procesie zwalczania pożaru. Następnie, z wykorzystaniem otrzymanych danych, opracowanie modelu matematycznego ryzyka zwalczania pożaru oraz określenie wpływu składowych ryzyka operacji taktycznych na zabezpieczenie poprzez projekty i programy każdej operacji taktycznej wpływającej na skuteczność zwalczania pożaru.

Metody: W artykule wykorzystano kompleksowe podejście do określenia ryzyka przy zwalczaniu pożaru w wymaganym czasie z uwzględnieniem wszystkich operacji taktycznych związanych z tym procesem. Jako podstawę określenia każdej składowej ryzyka wykorzystano normatywny czas na wykonanie danej operacji taktycznej. Do określenia każdej składowej ryzyka wykorzystano zależności rozkładu Weibulla, rozkładu prawa wykładniczego i normalnego. Przy wyborze prawa rozkładu posługiwano się metodą modelowania statystycznego parametrów niezawodności każdej operacji taktycznej.

Wyniki: Wyniki badania pozwalają określić słabe punkty w działaniach zespołów ratowniczo-gaśniczych. Dzięki analizie czynników wpływających na jakość pracy można będzie wyeliminować te negatywne i przez to znacząco zwiększać skuteczność zwalczania pożarów. Przykładowo opracowanie projektu wyboru optymalnych dróg dojazdowych do granic obsługiwanej przez daną jednostkę obszaru pozwala skrócić czas dojazdu na miejsce zdarzenia o 30-35%, a zastosowanie zautomatyzowanych systemów obliczania sił i środków potrzebnych do zwalczania pożarów z uwzględnieniem prognozowanego czasu niezakłóconego spalania znacząco zmniejsza wartość ryzyka nieugaszenia pożaru w odpowiednim/wymaganym czasie.

Wnioski: Zaproponowana metoda określenia ryzyka przy zwalczaniu pożaru pozwala, na podstawie danych statystycznych na temat czasu gaszenia pożarów, przeprowadzić analizę pracy zespołów ratowniczo-gaśniczych i zdiagnozować jej słabe punkty. Wyniki analizy ryzyka przy zwalczaniu pożaru pokazują, że głównym słabym punktem w pracy zespołów jest czas dojazdu na miejsce zdarzenia. Aby zmniejszyć czas lokalizacji, gaszenia i dogaszania pożaru, jak pokazały wyniki obliczeń, należy dysponować optymalną liczbą zespołów ratowniczo-gaśniczych.

Słowa kluczowe: pożar, zwalczanie pożaru, ryzyko zwalczania pożaru, model matematyczny, rozkład Weibulla, rozkład wykładniczy, rozkład normalny, technologie informacyjne

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

1. Постановка проблемы

В сфере пожарной безопасности пользуются термином «пожарный риск» – это мера возможности реализации пожарной опасности объектов защиты и ее последствий для людей и материальных ценностей. Гарантирование пожарной безопасности объектов защиты, а также гарантия ликвидации пожара, в случае его возникновения, состоит из определения, анализа и оценивания пожарного риска, что позволяет разрабатывать и внедрять соответствующие мероприятия для его уменьшения до допустимого значения. Согласно рекомендациям Всемирной организации здравоохранения и Постановления Кабинета министров Украины [1-2] пожарные риски классифицируют так: 1) незначительный риск $\varepsilon \leq 10^{-6}$; 2) средний риск $\varepsilon = 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-5}$; 3) высокий (терпимый) риск $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-4}$; 4) неприемлемый риск $\varepsilon > 5 \cdot 10^{-4}$. В свою очередь пожарный риск указывает на соответствующую вероятность возникновения пожара на объекте. Относительно определения пожарного риска для объектов в настоящее время проделана значительная научно-исследовательская работа, на основании которой получены положительные результаты. Значительный вклад в решение этого вопроса внесли Н.Н. Брушлинский, В.В. Холщевников, Д.А. Самошин (Россия), Э.Н. Гулида, И.А. Мовчан, А.Д. Кузык, Я.И. Хомяк, Е.Ф. Якименко, Р.В. Климак (Украина) и многие другие. Однако, практически отсутствуют данные для определения риска ликвидации пожара, значение которого в первую очередь влияет как на величину ущерба объекта от пожара, так и на величину потерь пожарно-спасательных подразделений (ПСП), зависящих от времени его ликвидации. В свою очередь время ликвидации пожара зависит от технической вооруженности ПСП, навыков

и умения оперативно выполнять необходимые действия, а также от времени свободного горения в зоне возникновения пожара. Вследствие этого очень сложно дифференцировано проанализировать и предложить необходимые мероприятия для уменьшения общего ущерба от пожара. Поэтому возникает проблема в определении риска процесса ликвидации пожара с использованием математической модели, на основании которой, с использованием дифференцированного анализа, имеется возможность решать вопросы повышения эффективности работы ПСП.

2. Анализ последних достижений и публикаций

Первые теоретические исследования по установлению риска ликвидации пожара были выполнены Н.Н. Брушлинским [3]. Результаты статистических исследований [3] показывают, что длительность тушения пожара τ_T описывается с помощью распределения Эрланга

$$\varphi(\tau_T) = \frac{\mu (\mu \tau_T)^r}{r!} e^{-\mu \tau} \quad (\tau > 0; r = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

где μ – постоянный параметр; r – порядок распределения Эрланга.

Для нормирования длительности тушения пожара рекомендуют [4-5] рассматривать вероятность противоположного случайного события, то есть вероятность того, что τ_T будет не меньшим некоторого значения t . С учетом пожарного риска $\varepsilon_{n,n}$, то есть с учетом части пожаров от общего их количества, длительность тушения которых

выходит за границу некоторого нормативного значения τ_n , можно определить количество пожаров, которые будут превышать это время. В этом случае, если $\varepsilon_{л.н} = 0,01$, то лишь для одного пожара из 100, время тушения будет превышать нормативное время τ_n , то есть

$$P\{\tau_T \geq \tau_n\} \leq \varepsilon_{л.н} \quad (2)$$

Результаты анализа зависимости (2) показывают, что с уменьшением значения пожарного риска нормативное время тушения пожара увеличивается.

Для усовершенствования и повышения эффективности работы пожарно-спасательных подразделений при тушении пожаров явилась работа, которая состояла в разработке имитационной модели «ТИГРИС» в Академии ГПС МВД России [6]. Подобная имитационная модель была также разработана в Нью-Йоркском Ренд-институте [7].

При всех своих положительных характеристиках данные модели имеют один общий функциональный недостаток. Фактически основной показатель, который характеризует результативность действий пожарно-спасательных подразделений, - время обслуживания вызова или время локализации и тушения пожара определяются путем его моделирования на известных для данного населенного пункта статистических характеристиках, то есть практически независимо от времени реакции пожарно-спасательных подразделений на вызов. Кроме того, при получении данных после решения этих моделей не рассматривается риск ликвидации пожара.

Но даже при наличии рассмотренных результатов исследований возникает проблема в том, что совсем не рассматривался риск ликвидации пожара.

3. Постановка задачи и ее решение

Целью работы ставится задача разработать метод, который на основании математической модели позволит определять риск для каждой операции и всего процесса ликвидации пожара на объекте защиты и обеспечит выполнение нормативных времен за счет использования оптимального количества технических средств, знаний и умения исполнителей на каждой операции с целью повышения эффективности ликвидации пожара и обеспечения минимального ущерба от него.

Для решения этой задачи на первом этапе воспользуемся зависимостью для определения времени ликвидации пожара с использованием всех составляющих времен на выполнение необходимых тактических действий

$$\tau_{л.н} = \tau_{в.о} + \tau_{изв} + \tau_{п.о.и} + \tau_{с.с} + \tau_{сб} + \tau_{сл} + \tau_{раз} + \tau_{лок} + \tau_{туш} + \tau_{о.т} \quad (3)$$

где $\tau_{в.о}$ – время с момента возникновения до момента обнаружения пожара (на практике это время, согласно рекомендациям [8], для зданий, которые оборудованы системой извещения о пожаре и управлением эвакуацией, находится в пределах 3...6 мин); $\tau_{изв}$ – время с момента выявления пожара до момента извещения о нем в пожарно-спасательное подразделение; $\tau_{изв} = 3...4$ мин [9]; $\tau_{п.о.и}$ – время на получение и обработку извещения о пожаре; $\tau_{п.о.и} = 1$ хв [10]; $\tau_{с.с}$ – время на привлечение сил и средств гарнизона для тушения пожара; $\tau_{с.с} = 3$ мин (приказ МВД Украины №325 от 01.07.1993); $\tau_{сб}$ – время сбора личного состава; $\tau_{сб} = 1$ мин [10]; $\tau_{сл}$ – время следования на пожар; $\tau_{раз}$ – время оперативного развертывания; $\tau_{раз} = 5...8$ мин [9]; $\tau_{лок}$ – вре-

мя локализации очага пожара; $\tau_{туш}$ – время тушения пожара после его локализации; $\tau_{о.т}$ – время окончательного тушения (дотушивания) воспламеняющихся очагов пожара.

Кроме того, для успешной ликвидации пожара необходимо также учитывать время свободного горения $\tau_{с.г}$, от величины которого зависит площадь пожара. Это время можно определить с использованием зависимости

$$\tau_{с.г} = \tau_{в.о} + \tau_{изв} + \tau_{п.о.и} + \tau_{с.с} + \tau_{сб} + \tau_{сл} + \tau_{раз} \quad (4)$$

Также необходимо для решения поставленной задачи учитывать время занятости подразделений пожарно-спасательной службы, которое можно определить так

$$\tau_{з.ПСП} = \tau_{п.о.и} + \tau_{с.с} + \tau_{сб} + \tau_{сл} + \tau_{раз} + \tau_{лок} + \tau_{туш} + \tau_{о.т} \quad (5)$$

На втором этапе, на основании основных положений теории надежности, принимаем следующие положения. Вероятность безотказной работы $R(t)$ любой системы в зависимости от ее состояния или, например, любой технологической операции процесса ликвидации пожара, может изменяться в пределах от 0 до 1. В тоже время в процессе их функционирования может возникнуть вероятность отказа $F(t)$. Известно, что сумма этих параметров равняется единице, то есть

$$R(t) + F(t) = 1$$

Тогда вероятность отказа может быть определена из условия

$$F(t) = 1 - R(t)$$

Исходя из этого положения, было принято условие, которое заключается в следующем, что вероятность отказа $F(t)$ есть не что иное как определенный риск для продолжения функционирования соответствующей системы. Поэтому было принято, что

$$F_i(t) = \varepsilon_i$$

где ε_i – риск выполнения функционирования i -ой системы.

Кроме того, на основании положений теории вероятностей известно, что при последовательном размещении элементов системы, каждый из которых имеет свою независимую вероятность отказа, общая вероятность отказа будет определяться как произведение всех частных. В этом случае общий риск ε отказа всей системы можно определить так

$$\varepsilon = \prod_{i=1}^n \varepsilon_i$$

где n – общее количество последовательно размещенных элементов системы.

Такой подход был использован для определения риска процесса ликвидации пожара. Использование этого подхода для определения риска процесса ликвидации пожара подтверждается такими же положениями методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности, утвержденной приказом МЧС РФ от 30.06.2009 г. № 382 (Россия). Результат расчета пожарного риска или риска ликвидации

пожара не должен превышать значений, которые рекомендуются Всемирной организации здравоохранения. В случае превышения этих значений риска возникает вероятность увеличения времени свободного горения и времени ликвидации пожара, что в свою очередь приведет к увеличению общих потерь от пожара. Поэтому необходимо разрабатывать и внедрять в пожарно-спасательных подразделениях соответствующие мероприятия, которые бы способствовали снижению риска ликвидации пожара.

Тогда, используя зависимость (3), представим математическую модель риска $\epsilon_{л.п}$ ликвидации пожара

$$\epsilon_{л.п} = \epsilon_{о.п} \epsilon_{изв} \epsilon_{п.о.и} \epsilon_{с.с} \epsilon_{сб} \epsilon_{сл} \epsilon_{раз} \epsilon_{лок} \epsilon_{туш} \epsilon_{о.л} \leq [\epsilon] \quad (6)$$

где $\epsilon_{о.п}, \epsilon_{изв}, \epsilon_{п.о.и}, \epsilon_{с.с}, \epsilon_{сб}, \epsilon_{сл}, \epsilon_{раз}, \epsilon_{лок}, \epsilon_{туш}, \epsilon_{о.л}$ – соответственно риски своевременного нормативного: обнаружения пожара, извещения о пожаре, обрабатывания извещения, привлечения сил и средств гарнизона для ликвидации пожара, сбора личного состава, следования на пожар, оперативного развертывания, локализации очага пожара, тушения пожара, окончательного тушения; $[\epsilon] = 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-4}$ – допустимое значение риска [1-2].

Результаты предварительных исследований показали, что с увеличением значения риска ликвидации пожара увеличиваются соответственно время ликвидации пожара и общие потери от него. Для наглядности рассмотрим влияние $\epsilon_{л.п}$ на прогнозируемое время ликвидации пожара (рис. 1) и соответственно на общие потери от него.

Предварительное исследование выполнялось для случая ликвидации пожара в жилищном секторе. Согласно рекомендаций [15] $\tau_{л.п} = 46$ мин при выполнении всех нормативных времен для каждой операции ликвидации пожара, что соответствует значению риска $\epsilon_{л.п} = 10^{-6}$.

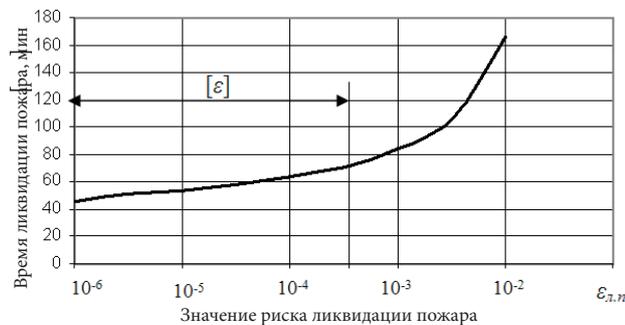


Рис. 1. Зависимость времени ликвидации пожара от риска
Fig. 1. Relationship between the time of extinguishing the fire and the risk

Источник: Собственная разработка.
Source: Own elaboration.

При выполнении этих исследований учитывалось увеличение площади пожара за счет возрастания времени свободного горения и соответственно увеличение общего ущерба. В этом случае использовались следующие зависимости:

– для определения площади пожара $S_{п}, м^2$

$$S_{п} = [25 + (\tau_{с.з} - 10)^2] v_n^2 \alpha \quad (7)$$

где v_n – линейная скорость распространения пожара, м/мин; α – угловой коэффициент, который учитывает форму пожара: круговая $360^\circ \alpha = 3,14$ рад; угловая $180^\circ \alpha$

$= 1,57$ рад; угловая $90^\circ \alpha = 0,785$ рад;
– для определения общего ущерба Y_{Σ}

$$Y_{\Sigma} = C_o S_{п} + C_n \tau_{з.л.с.п} N_o \quad (8)$$

где C_o – стоимость одного $м^2$ площади объекта, которая уничтожена пожаром; C_n – стоимость одной минуты работы одного пожарно-спасательного подразделения в процессе ликвидации пожара; $\tau_{з.л.с.п}$ – продолжительность занятости пожарно-спасательного подразделения в ликвидации пожара, мин; N_o – общее количество отделений, которое принимает участие в ликвидации пожара.

Результаты анализа показали, что в пределах допустимого значения риска ликвидации пожара (рис. 1) время занятости пожарно-спасательного подразделения может изменяться в пределах 1...1,6, а ущерб объекта – 1...3,3. В случае если имеет место нетерпимый риск, например $\epsilon_{л.п} = 10^{-3}$, то ущерб объекта по сравнению с $\epsilon_{л.п} = 10^{-6}$ возрастает в 5,4 раза, а время ликвидации пожара в 1,9 раза. Поэтому решение вопроса определения дифференцированного (для каждой операции) и общего значения риска ликвидации пожара имеет актуальное значение.

На третьем этапе определим значение составляющих риска согласно зависимости (6) с использованием основных положений теории надежности.

На основании анализа основных положений теории надежности [11-13] было установлено, что для математической модели определения риска ликвидации пожара наиболее целесообразно использовать распределение Вейбулла, плотность которого можно рассчитать с использованием зависимости

$$f(\tau) = \frac{b}{a} \left(\frac{\tau}{a}\right)^{b-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{\tau}{a}\right)^b\right] \quad (9)$$

где a – параметр масштаба, например, среднее значение наработки объекта на отказ T_o ; b – параметр формы плотности распределения; τ – действительное значение наработки объекта.

Распределение Вейбулла было принято за основу исходя из того, что в процессе ликвидации пожара почти на всех технологических операциях пожаротушения применяют технические средства, вероятность отказа работы которых в большинстве случаев определяют с использованием этого распределения. Кроме того, для определения параметра формы b , от значения которого зависит вид распределения, использовался метод статистического моделирования показателей надежности [11], который в данной статье не приводится. В случае, когда параметр формы $b \leq 1$, распределение Вейбулла превращается в экспоненциальное, которое определяют с использованием зависимости с параметром $\frac{1}{a} = \lambda = const$ – интенсивность отказов

$$f(\tau) = \lambda \exp(-\lambda \tau) \quad (10)$$

Интенсивность отказов для экспоненциального распределения определяют зависимостью

$$\lambda = \frac{1}{T_o} \quad (11)$$

где T_o – среднее значение времени (или другого фактора) наработки на отказ. Непрерывное время наработки на отказ приведено в стандартах или в нормативных документах, а его значение получают на основании результатов эксперимента или эксплуатации соответствующего

объекта

$$T_o = \frac{\sum_{i=1}^k T_{oi}}{m_k} \tag{12}$$

где T_{oi} – время непрерывной работы объекта после возобновления между двумя смежными отказами; k – общее количество отказов при исследовании N объектов; m_k – математическое ожидание количества отказов N объектов до наработки T_o

$$m_k = \frac{\sum_{i=1}^N k_i}{N} \tag{13}$$

где k_i – единичный отказ за время T_{oi} непрерывной работы объекта.

Тогда риск отказа события можно определить зависимостью

$$\varepsilon = \int_0^{\tau} \lambda e^{-\lambda \tau} d\tau = 1 - e^{-\lambda \tau} = 1 - \exp(-\lambda \tau) \tag{14}$$

В случае, когда параметр формы $1 < b \leq 2$, значения составляющих риска можно определить с использованием распределения Вейбулла. В этом случае

$$\varepsilon = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\tau}{T_o}\right)^b\right] \tag{15}$$

В случае, когда параметр формы $b > 2$, значения составляющих риска можно определить с использованием нормального распределения согласно зависимости

$$\varepsilon = 0,5 + \Phi(u_p) \tag{16}$$

где $\Phi(u_p)$ – функция Лапласа (эта функция является нечетной, то есть $\Phi(-u_p) = -\Phi(u_p)$); u_p – квантиль нормального распределения.

Функцию Лапласа и квантиль нормального распределения можно определить с использованием зависимости [11-12]

$$\Phi(u_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_p} e^{-\frac{u_p^2}{2}} du_p \tag{17}$$

$$u_p = \frac{\tau - T_o}{S_{\tau}} \tag{18}$$

где S_{τ} - среднее квадратичное отклонение наработки τ , которое определяют с использованием зависимости для случая, когда $N \leq 25$

$$S_{\tau} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\tau_i - T_o)^2}{N - 1}} \tag{19}$$

τ_i - время наработки на отказ одного i -го объекта из N объектов, которые исследуются.

Для определения функции Лапласа необходимо сначала определить квантиль нормального распределения согласно (18) для соответствующего времени τ , а потом с использованием справочника, в котором размещены таблицы функции Лапласа, выбрать значение $\Phi(u_p)$.

Теперь переходим к определению значений составляющих риска.

Риск обнаружения пожара $\varepsilon_{o,n}$ в пределах установленного нормативного времени подчиняется, как показали результаты статистического моделирования, нормальному закону распределения. Тогда

$$u_p = \frac{\tau_{o,o,d} - 6}{2}; \quad \varepsilon_{o,n} = 0,5 + \Phi(u_p) \tag{20}$$

где $\tau_{o,o,d}$ – действительное время обнаружения пожара, мин; индекс d обозначает в этой зависимости и в дальнейших действительное значение рассматриваемого фактора.

Риск извещения о пожаре $\varepsilon_{изв}$ в пределах оптимального времени также подчиняется нормальному закону распределения. В этом случае имеем при $\tau_{изв,d}$, мин

$$u_p = \frac{\tau_{o,o,d} - 4}{1,3}; \quad \varepsilon_{изв} = 0,5 + \Phi(u_p) \tag{21}$$

Риск получения и обработки извещения о пожаре $\varepsilon_{n,o,u}$ в пределах нормативного времени подчиняется экспоненциальному закону и определяется (при $\tau_{n,o,u,d}$, мин) согласно зависимости

$$\varepsilon_{n,o,u} = 1 - \exp(-\tau_{n,o,u,d}) \tag{22}$$

Риск привлечения сил и средств гарнизона для тушения пожара $\varepsilon_{c,c}$ в пределах нормативного времени также подчиняется экспоненциальному закону и определяется (при $\tau_{c,c,d}$, мин) согласно зависимости

$$\varepsilon_{c,c} = 1 - \exp(-0,33\tau_{c,c,d}) \tag{23}$$

Риск сбора $\varepsilon_{об}$ личного состава при $\tau_{об,d}$, мин, которое не превышает нормативного

$$\varepsilon_{об} = 1 - \exp \tag{24}$$

Риск прибытия (следования) к месту вызова $\varepsilon_{сл}$ в пределах нормативного времени подчиняется распределению Вейбулла. В этом случае при действительном времени следования $\tau_{сл,d}$ в мин, имеем

$$\varepsilon_{сл} = 1 - \exp\left[\left(\frac{-\tau_{сл,d}}{T_{o,сл}}\right)^2\right] \tag{25}$$

где $T_{o,сл}$ – нормативное время следования пожарно-спасательных подразделений к месту вызова, мин. Согласно Постановлению Кабинета министров Украины от 27 ноября 2013 года нормативное время прибытия (после получения диспетчерской службой вызова) к месту вызова 15 мин. Нормативные времена на получение и обработку извещения о пожаре, на привлечение сил и средств гарнизона на тушение пожара и на сбор личного состава в общей сложности составляют 5 мин. Тогда $T_{o,сл} = 15 - 5 = 10$ мин.

Риск оперативного развертывания $\varepsilon_{раз}$ в пределах нормативного времени наилучшим образом подчиняется распределению Вейбулла. Тогда

$$\varepsilon_{раз} = 1 - \exp [-(0,1\tau_{раз,d})^2] \tag{26}$$

где действительное время оперативного развертывания $\tau_{раз,d}$ (мин) можно определить на основании математической обработки результатов полнофакторного эксперимента

$$\tau_{раз.д} = 1,2 + 0,6N_{от} + 0,1N_{ств} + 1,04N_z + 0,32z_{II} \quad (27)$$

$N_{от}$ – количество отделений, которое принимает участие в оперативном развертывании;

$N_{ств}$ – общее количество стволов, которое закреплено за отделениями для ликвидации пожара; N_z – количество пожарных гидрантов, которое используется в процессе ликвидации пожара; Z_{II} – этаж здания, на котором возник пожар.

Риск локализации очага пожара $\epsilon_{лок}$ в пределах оптимального времени подчиняется распределению Вейбулла. В этом случае имеем

$$\epsilon_{лок} = 1 - \exp[-(0,01\tau_{лок.д})^2] \quad (28)$$

где действительное время локализации пожара $\tau_{лок.д}$ (мин) для пожаров класса А можно определить с использованием зависимости [14]

$$\tau_{лок.д} = \frac{6,39S_{лок}^{0,893}}{2N_A + N_B} K_I K_d \quad (29)$$

$S_{лок}$ – площадь локализации очага пожара, м²; N_A – количество стволов А; N_B – количество стволов Б; $K_I = 1,62 - 3,04I_i^A$ – коэффициент, который учитывает интенсивность подачи огнетушащего вещества I_i^A (л/м²с); $K_d = 1,4983 - 0,0262d$ – коэффициент, который учитывает влияние диаметра насадки d (мм) на время локализации пожара.

Для определения площади локализации $S_{лок}$ необходимо рассчитать прогнозируемую площадь пожара S_{II} в м², используя зависимости:

- для кругового и углового пожара согласно зависимости (7);
- для прямоугольного пожара

$$S_{II} = a_n(\tau_{с.з} - 5)v_n \quad (30)$$

где a_n – ширина пламени пожара, м.

Определяем для кругового и углового пожара радиус R распространения пламени

$$R = \sqrt{\frac{2S_{II}}{\alpha}}$$

Площадь локализации $S_{лок}$ в м² зависит от глубины подачи гасящей струи h , м (обычно принимают $h = 5$ м). Тогда

- для кругового и углового пожара

$$S_{лок} = 0,5 \alpha [R^2 - (R-h)^2] \quad (31)$$

- для прямоугольного пожара

$$S_{лок} = n a_n h \quad (32)$$

где n – количество направлений локализации.

Риск тушения пожара $\epsilon_{туши}$ в пределах оптимального времени для конкретных условий при действительном времени тушения $\tau_{туши.д}$ (мин) будет

$$\epsilon_{туши} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\tau_{туши.д}}{T_{о.туши}}\right)^2\right] \quad (33)$$

Действительное время тушения пожара $\tau_{туши.д}$ (мин) можно определить с использованием зависимости

$$\tau_{туши.д} = \tau_{лок.д} \left(\frac{S_{II}}{S_{лок}}\right) - 1 \quad (34)$$

Значение $T_{о.туши} = 20$ мин для тушения пожаров класса А в жилых и административных помещениях; $T_{о.туши} = 60$ мин – в производственных помещениях [15].

Риск окончательного тушения $\epsilon_{о.т}$ (дотушивания) воспламеняющихся очагов пожара в пределах оптимального времени для конкретных условий при действительном времени окончательного тушения $\tau_{о.т.д} = 0,5(\tau_{лок.д} + \tau_{туши.д})$ (мин) будет

$$\epsilon_{о.т} = 1 - \exp[-0,01(\tau_{лок.д} + \tau_{туши.д})] \quad (35)$$

Рассмотрим результаты моделирования рисков на примере. На основании этих результатов анализа рассмотрим процесс управления программами и проектами по улучшению системы ликвидации пожаров.

Пример

На промышленном предприятии ОАО «Львовский автобусный завод» в сборочном цехе возник угловой (180°) пожар от короткого замыкания в электрощитовой, которая размещена в центральной части цеха. Цех оснащен пожарной сигнализацией, функционирующей от пожарных тепло-дымовых извещателей типа АРТОН СПД-3.5, а также системой управления эвакуацией.

Исходные данные для расчета: $\tau_{в.о.д} = 4$ мин; $\tau_{изв.д} = 3,5$ мин; $\tau_{н.о.и.д} = 0,8$ мин; $\tau_{с.с.д} = 2$ мин; $\tau_{сб.д} = 1$ мин; $\tau_{сл.д} = 12$ мин (не вложились в норматив); $\tau_{раз.д}$ при 2-х отделениях, 8 стволов Б, 1 гидрант, $z_{II} = 1$; $\tau_{лок.д}$ при $\tau_{с.з} = 28$ мин, $v_n = 0,7$ м/мин, $K_I = K_d = 1$.

Решение

1. Риск обнаружения пожара определяем, используя зависимости (18) и (16)

$$u_p = \frac{4-6}{2} = -1; \Phi(-1) = -\Phi(1) = -0,3415;$$

$$\epsilon_{о.л} = 0,5 + (-0,3415) = 0,1585$$

2. Риск извещения о пожаре определяем по аналогии с п. 1

$$u_p = \frac{3,5-4}{1,3} = -0,38;$$

$$\Phi(-0,38) = -\Phi(0,38) = -0,148;$$

$$\epsilon_{изв} = 0,5 + (-0,148) = 0,352$$

3. Риск получения и обрабатывания извещения о пожаре определяем, используя зависимость (22)

$$\epsilon_{н.о.и} = 1 - \exp(-0,8) = 0,55$$

4. Риск привлечения сил и средств определяем, используя зависимость (23)

$$\epsilon_{с.с} = 1 - \exp(-0,33 \cdot 2) = 0,48$$

5. Риск сбора – согласно зависимости (24)

$$\epsilon_{сб} = 1 - \exp(-1) = 0,632$$

6. Риск прибытия определяем, используя зависимость (25)

$$\varepsilon_{cl} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{12}{10}\right)^2\right] = 0,763$$

7. Риск оперативного развертывания - согласно зависимостям (27) и (26)

$$\tau_{раз.д} = 1,2 + 0,6 \cdot 2 + 0,1 \cdot 8 + 1,04 \cdot 1 + 0,32 \cdot 1 = 4,56 \text{ мин;}$$

$$\varepsilon_{раз} = 1 - \exp[-(0,1 \cdot 4,56)] = 0,366$$

8. Риск локализации, используя зависимости (7), (31), (29) и (28)

$$S_{П} = 0,5 \cdot 3,14(28-5)^2 \cdot 0,7^2 = 407 \text{ м}^2; R = \sqrt{\frac{2 \cdot 407}{3,14}} = 16,1 \text{ м;}$$

$$S_{лок} = 0,5 \cdot 3,14[16,1^2 - (16,1 \cdot 5)^2] = 214 \text{ м}^2;$$

$$\tau_{лок.д} = \frac{6,39 \cdot 214^{0,893}}{2 \cdot 0 + 8} \cdot 1,1 = 96,3 \text{ мин;}$$

$$\varepsilon_{лок} = 1 - \exp[-(0,01 \cdot 96,3)^2] = 0,6$$

9. Риск тушения пожара - согласно зависимостям (34) и (33)

$$\tau_{туш.д} = 96,3 \left(\frac{407}{214} - 1\right) = 87 \text{ мин; } \varepsilon_{туш} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{87}{60}\right)^2\right] = 0,877$$

10. Риск окончательного тушения, используя зависимость (35)

$$\varepsilon_{о.т} = 1 \exp[0,01(96,3 \cdot 87)] = 0,84$$

11. Определяем на основании зависимости (6) риск ликвидации пожара

$$\varepsilon_{л.п} = 0,1585 - 0,352 \cdot 0,55 - 0,48 - 0,632 \cdot 0,763 - 0,366 - 0,6 - 0,877 \cdot 0,84 = 0,001149 = 11,49 \cdot 10^{-4}.$$

Тогда действительная вероятность ликвидации пожара будет

$$P_{л.п} = 1 - \varepsilon_{л.п} = 1 - 11,49 \cdot 10^{-4} = 0,998851.$$

Анализируя полученный результат рассмотренного примера, можно сделать следующие выводы. Несмотря на тот факт, что вероятность ликвидации пожара $P_{л.п}$ имеет большое значение, однако риск ликвидации пожара превышает значение высокого (терпимого) риска в 2,3 раза, что является недопустимым для процесса ликвидации пожара. Очень большие значения рисков выполнения технологических операций оказались при следовании к месту вызова $\varepsilon_{cl} = 0,763$, а также при локализации ($\varepsilon_{лок} = 0,6$), тушении ($\varepsilon_{туш} = 0,877$) и дотушивании пожара ($\varepsilon_{о.т} = 0,84$). Это можно объяснить следующим образом. Для уменьшения времени следования необходимо для пожарно-спасательных подразделений, которые обслуживают соответствующие районы города, разработать проект выбора оптимальных путей следования до крайних границ района обслуживания с использованием информационных технологий. Это позволит уменьшить время следования на 30...35%. Для того, чтобы уменьшить риск локализации, тушения и дотушивания необходимо внедрять проекты с использованием автоматизированных систем расчета сил и средств ликвидации пожаров на основе учета прогнозированного времени свободного горения на пожаре. Внедрение этих мероприятий позволит обеспечить получение обоснованных расчетных

данных для необходимого количества сил и средств ликвидации пожара и как минимум обеспечит риск ликвидации пожара в пределах $\varepsilon_{л.п} = 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-5}$, который будет соответствовать среднему значению риска, установленного Всемирной организации здравоохранения.

4. Заключение

В результате выполненных исследований получены следующие результаты:

а) впервые разработан метод определения риска ликвидации пожара на основе математических моделей его составляющих с использованием основных положений теории надежности, что позволяет значительно уменьшить ущерб от возникшего пожара;

б) предлагаемый метод определения риска ликвидации пожара дает возможность на основании статистических данных по времени ликвидации пожаров выполнять анализ работы пожарно-спасательных подразделений и выявлять узкие места в их работе;

в) результаты анализа риска ликвидации пожара показывают, что основным узким местом в работе пожарно-спасательных подразделений есть время следования к месту вызова. Поэтому необходимо для существующих условий выбирать оптимальные пути следования за счет внедрения для каждой пожарно-спасательной части оперативных информационных технологий выбора оптимального пути следования в любое время суток, что позволит уменьшить время следования на 30...35%;

г) для уменьшения времени локализации, тушения и дотушивания пожара на месте вызова, как показали результаты расчета, необходимо направлять оптимальное количество пожарно-спасательных подразделений, что может быть обеспечено только после внедрения информационных технологий для расчета количества сил и средств ликвидации пожара;

д) необходима дальнейшая работа с целью усовершенствования и упрощения метода, который позволит прогнозировать риск ликвидации пожара за счет накопления и расширения банка данных по этой тематике.

Литература

- [1] Begun V.V., Naumenko I.M., *Bezpeka zhyttyedyial'nosti*, Kiev 2004, 328.
- [2] Decision of the Cabinet of Ukraine of February 29, 2012 No. 306, Kiev.
- [3] Brushlinskiy N.N., Korolchenko A.Ya., *Modelirovaniye pozharov i vzryvov*, Pozhnauka, Moscow 2000, 482.
- [4] Brushlinskiy N.N. (ed.), *Sovershenstvovaniye organizatsii i upravleniya pozharoy okhrany*, Stroyizdat, Moscow 1986, 152.
- [5] Brushlinskiy N.N., *Modelirovaniye operativnoy deyatelnosti pozharoy sluzhby*, Stroyizdat, Moscow 1981, 96.
- [6] Brushlinskiy N.N., Sobolev N.N., *Matematicheskaya model' dlya proyektirovaniya sistemy protivopozharoy zashchity goroda*, [in:] *Upravleniye bol'shim gorodom*, NPO ACU Moskwa, Moscow 1985, 79-81.
- [7] Carter G., Chaiken I., Ignall E., *Simulation model of fire department operation: design and preliminary results*, "IEEE Transportation System Science and Cybernetics", Issue 40, 1970, pp. 282-293.
- [8] Kholschevnikov V.V., *Design of still human streams*, [in:] *Design of fires and explosions*, Pozhnauka, Moscow 2000, 139-169.
- [9] But V.P. Kucischiy B.V., Bolibruch B.V., *Praktichniy posibnik z pozhezhoi taktiki*, SPOLOM, Lviv 2003, 133.
- [10] Normativi po pozhezho-stroyoviyipidgotovtsi, UDPO MVS of Ukraine, Kiev 1995, 14.
- [11] Reshetov D.N., Ivanov A.S., Fadeev V.Z., *Nadezhnost' mashin*,

- Higher school, Moscow 1988, 238.
- [12] Dillon B., Singkh Ch., *Inzhenernyye metody obespecheniya nedezhnosti system*, the World, Moscow 1984, 318.
- [13] Pronikov A.S., *Nadezhnost' mashin*, Mechanical Engineering, Moscow 1978, 592.
- [14] Movchan I.A., Hulida E.N., Voytovych D.P., *Determination of the projected time fighting a fire in the industry*, "Problems of Fire Safety", Vol. 23, 2008, pp. 241-247.
- [15] Ivannikov V.P., Klyus P.P., *Spravochnik rukovoditelya tusheniya pozhara*, Stroyizdat, Moscow 1987, 288.
- * * *

Васильев Никита Игоревич – адъюнкт Львовского государственного университета безопасности жизнедеятельности кафедры управления проектами, информационных технологий и телекоммуникаций. Область научных интересов: теоретические и экспериментальные исследования риска – менеджмента эффективного управления в проектах реинжиниринга систем ликвидации пожаров.

Мовчан Иван Александрович – проректор Львовского государственного университета безопасности жизнедеятельности, кандидат технических наук, доцент. Область научных интересов: исследование и управление рисками возникновения и ликвидации пожаров на различных объектах города, а также в области методологии проведения аудита пожарной безопасности этих объектов.