УДК 614.838.001.18

А. П. КОВАЛЕВ, И. И. МОСКВИНА

О ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВЗРЫВОВ В ПОМЕЩЕНИЯХ, ГДЕ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ БЫТОВОЙ ГАЗ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ 0,4/0,22 КВ

На основе регулярных однородных марковских процессов с дискретным числом состояний и непрерывным временем, предложена математическая модель, с помощью которой возможно оценить взрывобезопасность помещений, в которых используется бытовой газ и сети 0,4/0,22 кВ с учетом: частоты появления взрывоопасной концентрации; длительности её существования; объема помещения; выделяемого объема газа; расхода воздуха в результате естественной вентиляции; изменения концентрации метана в течении времени; а также от частоты появления электрического источника поджигания и длительности его существования.

Ключевые слова: взрыв газа, метановоздушная смесь, взрывобезопасность, опасный электрический источник, марковские процессы.

Введение. Аварии с «тяжкими» последствиями, которые ежегодно происходят в различных странах мира, привели к тому, что Организация Объединенных наций 17 августа 1990 года создала рабочую группу для разработки документа «Конвенция о трансграничном воздействии промышленных аварий», который был принят ООН в 1992 году [1]. В статье 14 этого документа говорится о том, что государства, которые входят в ЕЭС, по мере необходимости выступают с предложениями о сотрудничестве в области проведения исследований и разработки методов и технологий, способных предотвратить аварии техногенного характера, обеспечить готовность к ним и ликвидацию их последствий.

Поэтому работы, направленные на прогнозирование и оценку уровня взрывобезопасности технологических и бытовых объектов при их эксплуатации являются весьма актуальными.

Анализ статистических данных и постановка проблемы. Государственная служба горного надзора и промышленной безопасности Украины сообщила, что в 2010 году при использовании газа в быту пострадало 284 человека, при этом погибло 115. В России с 2008 по 2013 года при использовании бытового газа в жилом секторе погибло 305 человек.

Приведенные данные о гибели людей в Украине и России в помещениях, где используется бытовой газ и эксплуатируются низковольтные сети 0,4/0,22 кВ свидетельствуют о том, что проблема по обеспечению взрывобезопасности этих объектов полностью на сегодняшний день не решена.

Цель и постановка задачи исследования. Разработка математической модели процесса формирования взрывов в помещениях, где используется бытовой газ и электрические сети 0,4/0,22 кВ.

Предположим, что взрыв в помещении происходит при совпадении в пространстве и времени двух случайных событий: появления взрывоопасной метановоздушной смеси и опасного источника зажигания [2].

Под опасным состоянием газовоздушной смеси будем понимать случайную загазованность помещения с течением времени до взрывоопасной концентрации. Под опасным источником зажигания будем понимать: электрическую искру (дугу), мощность и длительность которой достаточна для воспламенения взрывоопасной концентрации метановоздушной смеси в помещении.

Пусть имеется газифицированное помещение объемом W, (м^3). Объем выделяемого в помещение газа (метана) из-за утечек в газопроводе, его арматуре либо из-за случайно открытых конфорок газовой плиты (медленное поступление газа в помещение) обозначим через q_1, (м^3/мин). В результате естественной вентиляции в помещение поступает свежий воздух, расход которого q_2, (м^3/мин). С течением времени t изменяется концентрация метана $C(t)$, (в % об.) в помещении. В помещении эксплуатируется электрическая сеть 0,4/0,22 кВ.

Представим изменение состояния атмосферы в газифицированном помещении с помощью случайной функции $\xi_1(t)$, которая может принимать два значения: 0 – в помещении отсутствует опасная газовоздушная смесь; 1 – в помещении образовалась опасная метановоздушная смесь.

Характер изменения функции $\xi_1(t)$ с течением времени следующий: существуют чередующиеся отрезки времени $\xi_{11}^{(0)}$, $\xi_{12}^{(0)}$, … , $\xi_{1n}^{(0)}$ и $\xi_{11}^{(1)}$, $\xi_{12}^{(1)}$, … , $\xi_{1n}^{(1)}$ для которых последовательно $\xi_1(t)=0$ и $\xi_1(t)=1$, где $\xi_{1i}^{(0)}$, $i=\overline{1,n}$ – случайные интервалы времени между появлением в помещении опасной концентрации метановоздушной смеси, а $\xi_{1i}^{(1)}$, $i=\overline{1,n}$ – случайные отрезки времени нахождения в помещении газовоздушной смеси в опасном состоянии.

Появление в помещении опасного электрического источника можно представить в виде случайной функции $\xi_2(t)$, характер изменения которой с течением времени следующий: существуют чередующиеся интервалы времени $\xi_{21}^{(0)}$, $\xi_{22}^{(0)}$, … , $\xi_{2m}^{(0)}$ и $\xi_{21}^{(1)}$, $\xi_{22}^{(1)}$, … , $\xi_{2m}^{(1)}$ для которых последовательно $\xi_2(t)=0$ и $\xi_2(t)=1$, где промежутки $\xi_{2j}^{(0)}$, $j=\overline{1,m}$ – интервалы времени между появлением в сети опасного источника (короткое замыкание в сети, дугообразование на силовых контактах и т.д.), а $\xi_{2j}^{(1)}$, $j=\overline{1,m}$ – длительность существования в сети опасного источника зажигания.

В этом описании взрыв в помещении произойдет в момент наложения промежутков времени $\xi_{1n}^{(1)}$ и $\xi_{2m}^{(1)}$. Возникновение взрыва в помещении не зависит от длины общей части наложившихся промежутков времени $\xi_{1n}^{(1)}$ и $\xi_{2m}^{(1)}$, а зависит только от того, соприкоснулись они или нет.

О статистической природе функции $\xi_1(t)$ предположим следующее: вероятность загазованности помещения до взрывоопасной концентрации за промежуток времени Δt равна $\lambda_1\Delta t + o(\Delta t)$, где $o(\Delta t)$ обозначает величину высшего порядка малости по сравнению с Δt. Вероятность того, что за время Δt опасная концентрация метановоздушной смеси в помещении станет не опасной, равна $\mu_1\Delta t + o(\Delta t)$. Величины λ_1 и μ_1 являются параметрами процесса $\xi_1(t)$.

Параметр λ_1 характеризует интенсивность или скорость, с которой безопасная концентрация метана в помещении переходит в опасное состояние; μ_1 – интенсивность или скорость, с которой опасная концентрация газовоздушной смеси в помещении переходит в безопасное состояние.

Аналогична природа и функции $\xi_2(t)$. Предположим, что вероятность появления опасного источника зажигания в сети за промежуток времени Δt равна $\lambda_2\Delta t + o(\Delta t)$. Вероятность того, что за время Δt опасный источник поджигания перейдет в безопасное состояние будет равна $\mu_2\Delta t + o(\Delta t)$. Величины λ_2 и μ_2 являются параметрами процесса $\xi_2(t)$, λ_2 – характеризует интенсивность или скорость, с которой безопасные промежутки времени сменяются на опасные; μ_2 – интенсивность или скорость, с которой опасные промежутки времени существования источника поджигания сменяются на безопасные.

Принятые допущения означают, что $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$ можно рассматривать как два независимых регулярных однородных марковских процесса с дискретным числом состояний и непрерывным временем [3].

Взрыв в газифицированном помещении произойдет в момент случайного попадания процессов в состоянии 1, т.е. когда $\xi_1(t)=1$ и $\xi_2(t)=1$.

Будем считать, что в начальный момент времени $\xi_1(t)=0$ и $\xi_2(t)=0$.

Задача состоит в следующем: зная размер помещения *W*, (м^3); приток в помещение свежего воздуха q_1 (м^3/мин) в результате естественной вентиляции; объем выделяемого в него газа (метана) q_2, (м^3/мин) из-за утечек в газопроводе либо газового оборудования; время *t(C)*, по истечению которого концентрация газа в помещении достигнет некоторой заданной величины *C*, (в % об.); параметры процессов $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$, т.е. λ_1, μ_1, λ_2, μ_2, определить вероятность $F_1(t)$ взрывов в помещении; среднее время до взрыва τ_1, дисперсию D_1.

Решение поставленной задачи. Совокупность процессов $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$ рассмотрим как один регулярный однородный марковский процесс с четырьмя дискретными состояниями и непрерывным временем.

В любой момент времени система «среда-источник» может находиться в одном из четырех возможных состояний: $E\{e_1(0,0), e_2(1,0) e_3(0,1) e_4(1,1)\}$, где $e_1(0,0)$ – в помещении отсутствует опасная метановоздушная смесь и опасный электрический источник зажигания; $e_2(1,0)$ – в помещении образовалась опасная метановоздушная смесь и отсутствует опасный источник зажигания; $e_3(0,1)$ – в помещении отсутствует опасная метановоздушная смесь и появился опасный электрический источник зажигания; $e_4(1,1)$ – в помещении образовалась опасная метановоздушная смесь и появился электрический источник зажигания.

При случайном попадании процесса в поглощающее состояние $e_4(1,1)$ происходит взрыв метановоздушной смеси в рассматриваемом помещении. Возможная реализация регулярного однородного марковского процесса с четырьмя дискретными состояниями и непрерывным временем показана на рисунке.

Обозначим через ζ_k, $k=\overline{1,3}$ время пребывания процесса $\chi(t)$ в состоянии e_k. Для регулярного однородного марковского процесса $\chi(t)$ случайные величины ζ_k имеют показательную функцию распределения вероятностей [6]:

$$F_{\zeta_k}(t) = P\{\zeta_k < t\} = 1 - \exp\left[-(\lambda_{ii} t)\right], \qquad (1)$$

Обозначим через $P_{ii}(\Delta t)$ вероятность того, что система за малый промежуток времени Δt останется в состоянии e_i, $i=\overline{1,4}$ и через $P_{ij}(\Delta t)$ – вероятность того, что система за время Δt перейдет из состояния e_i в состояние e_j, $j=\overline{1,4}$.

Эти вероятности переходов определяются следующим образом [7]:

$$\begin{aligned} P_{ii}(\Delta t) &= P\left[\chi(t+\Delta t)=e_i \,/\, \chi(t)=e_i\right] = \\ &= P\left\{e_i \xrightarrow{\Delta t} e_i\right\} = 1-\lambda_{ii}\Delta t + o(\Delta t) \end{aligned}, \qquad (2)$$

$$\begin{aligned} P_{ij}(\Delta t) &= P\left[\chi(t+\Delta t)=e_j \,/\, \chi(t)=e_i\right] = \\ &= P\left\{e_i \xrightarrow{\Delta t} e_j\right\} = 1-\lambda_{ij}\Delta t + o(\Delta t) \end{aligned}. \qquad (3)$$

В формуле (3) величина λ_{ij} учитывает с точностью до членов второго порядка малости, что за время Δt произойдет переход системы из состояния e_i в другое состояние e_j. В формуле (2) величина $1-\lambda_{ii}\Delta t$ учитывает с точностью до членов второго порядка малости, что за время Δt не произойдет переход системы из состояния e_i в другое состояние, т.е. процесс останется в состоянии e_i.

Следовательно, регулярный однородный марковский процесс можно задать с помощью показательного распределения вида (1) и матрицы вероятностей переходов $P(\Delta t) = \left[P_{ij}(\Delta t)\right]$.

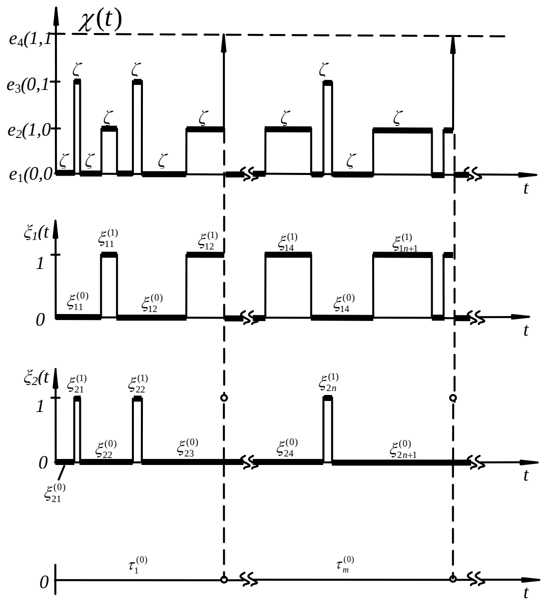

Рис. 1 – Возможная реализация регулярного однородного марковского случайного процесса с четырьмя дискретными состояниями и непрерывным временем, где: $e_1(0,0)$, $e_2(1,0)$, $e_3(0,1)$, $e_4(1,1)$ – состояния системы «среда-источник»; ζ_k – время нахождения системы «среда-источник» в одном из k возможных состояний $k=\overline{1,3}$; $\chi(t)$; $\xi_1(t)$; $\xi_2(t)$ – регулярные однородные марковские случайные процессы; $\xi_{1i}^{(0)}$; $\xi_{1i}^{(1)}$ – интервал времени между появлением в помещении опасной метановоздушной смеси и длительность нахождения её в этом состоянии соответственно; $\xi_{2j}^{(0)}$; $\xi_{2j}^{(1)}$ – интервал времени между появлением в сети опасного источника зажигания и длительность его существования соответственно; $\tau_1^{(0)}$; $\tau_m^{(0)}$ – время до взрыва метановоздушной смеси в помещении

Среднее время до взрывов в газифицированном помещении τ_1, дисперсию D_1 и функцию распределения интервалов времени между взрывами $F_1(t)$ можно определить из систем уравнений, записанных в матричной форме [8, 9]:

$$\tau = N\xi ; \tag{4}$$

$$D = (2N - I)\tau - \tau^2 ; \tag{5}$$

$$P'(t) = P(t)A , \tag{6}$$

где I – единичная матрица; Q – матрица, полученная из матрицы интенсивностей переходов P_k путем исключения поглощающего состояния (строки, состоящей из элементов 0,0, …. ,1 и соответствующего столбца); ξ – вектор-столбец, все элементы которого равны 1; $\tau = [\tau_i]_{i=1}^{2^k-1}$ – вектор-столбец, k – число независимых процессов, участвующих в формировании аварии; $P'(t) = \left[P'(t)\right]_{i=1}^{2^k-1}$ – вектор-строка; $P(t) = \left[P_i(t)\right]_{i=1}^{2^k-1}$ – вектор-строка; $N = (I-Q)^{-1}$ – фундаментальная матрица; $A = (Q - I)$ – матрица, полученная в результате разности матрицы Q и единичной; $\tau^2 = \left[\tau_i^2\right]_{i=1}^{2^k-1}$ – вектор-столбец; $\lambda_i = 1/\overline{d}_i$; $\overline{d}_i$ – средний интервал времени нахождения элемента системы в безопасном состоянии; $\mu_i = 1/d_i$; d_i – средняя длительность нахождения элемента системы в опасном состоянии.

Система линейных дифференциальных уравнений (6) решается при следующих начальных условиях: $P_1(0)=1$; $P_2(0)=0$; ... $P_\gamma(0)=0$, где $\gamma = 2^\kappa - 1$.

Функцию распределения интервалов времени между взрывами в помещении находим следующим образом:

$$F_1(t) = 1 - \sum_{i=1}^{2^k-1} P_i(t) . \tag{7}$$

В том случае, если соблюдается условие

$$\tau_1 \cong \sqrt{D_1} , \tag{8}$$

тогда вероятность взрывов опасной газовоздушной смеси в помещении можно определять с помощью формулы:

$$F_1(t) = 1 - e^{H_1 \cdot t} , \tag{9}$$

где $H_1 = 1/\tau_1$.

Используя формулы (2) и (3), вероятности переходов за время Δt для приведенной выше задачи определим следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{11}(\Delta t) &= P\left[\chi(t+\Delta t) = e_1(0,0) / \chi(t) = e_1(0,0)\right] = \\ &= P\left\{e_1(0,0) \xrightarrow{\Delta t} e_1(0,0)\right\} = P_1(0 \xrightarrow{\Delta t} 0) P_2(0 \xrightarrow{\Delta t} 0) \\ &= e^{-\lambda_1 \cdot \Delta t} e^{-\lambda_2 \cdot \Delta t} = \left[1 - \lambda_1 \Delta t + o(\Delta t)\right]\left[1 - \lambda_2 \Delta t + o(\Delta t)\right] = \\ &= 1 - (\lambda_1 + \lambda_2)\Delta t + o(\Delta t) \end{aligned} ; \tag{10}$$

$$\begin{aligned} P_{12}(\Delta t) &= P\left[\chi(t+\Delta t) = e_2(1,0) / \chi(t) = e_1(0,0)\right] = \\ &= P\left\{e_1(0,0) \xrightarrow{\Delta t} e_2(1,0)\right\} = P_1(0 \xrightarrow{\Delta t} 1) P_2(0 \xrightarrow{\Delta t} 0) \\ &= (1 - e^{-\lambda_1 \cdot \Delta t}) e^{-\lambda_2 \cdot \Delta t} = \\ &= \left[\lambda_1 \Delta t + o(\Delta t)\right]\left[1 - \lambda_2 \Delta t + o(\Delta t)\right] = \\ &= \lambda_1 \Delta t + o(\Delta t) \end{aligned} .$$

Для приведенной выше задачи состояние $e_4(1,1)$ является поглощающим [7], где $o(\Delta t)$ означает, что за время Δt маловероятно осуществить два перехода из одного состояния в другое [8]:

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{o(\Delta t)}{\Delta t} = 0 .$$

Используя полученные вероятности переходов (10), матрица вероятностей переходов примет вид:

$$P(\Delta t) = \begin{pmatrix} 1 - (\lambda_1 + \lambda_2)\Delta t + o(\Delta t) & \lambda_1 \Delta t + o(\Delta t) & \lambda_2 \Delta t + o(\Delta t) & o(\Delta t) \\ \mu_1 \Delta t + o(\Delta t) & 1 - (\mu_1 + \lambda_2)\Delta t + o(\Delta t) & o(\Delta t) & \lambda_2 \Delta t + o(\Delta t) \\ \mu_2 \Delta t + o(\Delta t) & o(\Delta t) & 1 - (\lambda_1 + \mu_2)\Delta t + o(\Delta t) & \lambda_1 \Delta t + o(\Delta t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{11}$$

Матрица $Q(\Delta t)$ получается из матрицы $P(\Delta t)$ путем исключения поглощающего состояния (строки, состоящей из элементов 0, 0, … 1 и соответствующего столбца):

$$Q(\Delta t)=\begin{pmatrix} 1-(\lambda_1+\lambda_2)\Delta t+o(\Delta t) & \lambda_1\Delta t+o(\Delta t) & \lambda_2\Delta t+o(\Delta t) \\ \mu_1\Delta t+o(\Delta t) & 1-(\mu_1+\lambda_2)\Delta t+o(\Delta t) & o(\Delta t) \\ \mu_2\Delta t+o(\Delta t) & o(\Delta t) & 1-(\lambda_1+\mu_2)\Delta t+o(\Delta t) \end{pmatrix}. \qquad (12)$$

Используя матрицу $Q(\Delta t)$, определим матрицу A [8]:

$$A=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{Q(\Delta t)-I}{\Delta t}. \qquad (13)$$

Подставляя матрицу (12) в формулу (13), получим:

$$A=\begin{pmatrix} -(\lambda_1+\lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 \\ \mu_1 & -(\mu_1+\lambda_2) & 0 \\ \mu_2 & 0 & -(\lambda_1+\mu_2) \end{pmatrix}. \qquad (14)$$

Матрицу N находят следующим образом [12, 13]:

$$N=\left\{\lim_{\Delta t\to 0}\left(\frac{I-Q(\Delta t)}{\Delta t}\right)\right\}^{-1}, \qquad (15)$$

тогда, подставив (12) в (15), получим:

$$N=\begin{pmatrix} \lambda_1+\lambda_2 & -\lambda_1 & -\lambda_2 \\ -\mu_1 & \mu_1+\lambda_2 & 0 \\ -\mu_2 & 0 & \lambda_1+\mu_2 \end{pmatrix}^{-1}, \qquad (16)$$

где $\lambda_1=\frac{a_1}{lt}$; $\lambda_2=\frac{a_2}{lt}$; $\mu_1=1/d_1$; $\mu_2=1/d_2$; a_1 – число выявленных случаев опасной загазованности помещений в течение заданного отрезка времени; a_2 – число выявленных случаев появления опасных источников зажигания за время наблюдения; l – число однотипных помещений; t – время наблюдения; d_1 – средняя длительность нахождения взрывоопасной смеси в помещении (содержание метана в атмосфере 5–15%); d_2 – средняя длительность существования в сети опасного источника зажигания.

Время, по истечении которого средняя концентрация газа в помещении объемом W достигнет некоторой заданной величины C, находим пользуясь формулой [9]:

$$t(C)=-\frac{T}{1+q_2/q_1}\ln\left[1-\left(1+\frac{q_1}{q_2}\right)C\right], \qquad (17)$$

где q_1 – расход воздуха, м^3/мин (в результате естественной вентиляции в помещение поступает свежий воздух); q_2 – выделяемый в помещение газ, м^3/мин (при утечках газа в системе газоснабжения помещения и т.д.); C – концентрация газа, %; $T=W/q_1$ – период однократного обмена воздуха в помещении, мин; W – объем помещения, м^3.

Используя формулу (17), находим d_1:

$$d_1=t(C_2)-t(C_1), \qquad (18)$$

Используя (17) и (18), находим:

$$d_1=\frac{kW}{q_1+q_2}\left\{\ln\left[1-\left(1+\frac{q_1}{q_2}\right)C_1\right]-\ln\left[1-\left(1+\frac{q_1}{q_2}\right)C_2\right]\right\}, \qquad (19)$$

где C_1, C_2 – нижний и верхний пределы взрываемости метановоздушной смеси соответственно; $k\geq 1$ – коэффициент, который зависит от времени снижения концентрации взрывоопасной смеси в помещении для области воспламенения метана.

Если время нарастания концентрации метановоздушной смеси от нижнего предела взрываемости к верхнему будет равно времени снижения концентрации взрывоопасного газа от верхнего к нижнему пределу, тогда $k=2$.

Если предположить, что длительность нахождения взрывоопасной метановоздушной смеси в помещении в пределах 5-15% метана в воздухе не противоречит экспоненциальной функции распределения вероятностей, тогда:

$$\mu_1=\frac{q_1+q_2}{kW\left\{\ln\left[1-\left(1+\frac{q_1}{q_2}\right)C_1\right]-\ln\left[1-\left(1+\frac{q_1}{q_2}\right)C_2\right]\right\}}. \qquad (20)$$

Подставив матрицу (16) в систему уравнений (4), получим:

$$\begin{pmatrix}\tau_1\\ \tau_2\\ \tau_3\end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \lambda_1+\lambda_2 & -\lambda_1 & -\lambda_2 \\ -\mu_1 & \mu_1+\lambda_2 & 0 \\ -\mu_2 & 0 & \lambda_1+\mu_2 \end{pmatrix}^{-1}\begin{pmatrix}1\\1\\1\end{pmatrix}. \qquad (21)$$

Систему уравнений (21) представим в виде:

$$\begin{pmatrix}\tau_1\\ \tau_2\\ \tau_3\end{pmatrix}=\frac{1}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1+\mu_2)}\begin{pmatrix} (\mu_1+\lambda_2)(\lambda_1+\mu_2) & \lambda_1(\lambda_1+\mu_2) & \lambda_2(\mu_1+\lambda_2) \\ \mu_1(\lambda_1+\mu_2) & \lambda_1(\lambda_1+\mu_2+\lambda_2) & \lambda_2\mu_1 \\ \mu_2(\mu_1+\lambda_2) & \lambda_1\lambda_2 & \lambda_2(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1) \end{pmatrix}\begin{pmatrix}1\\1\\1\end{pmatrix} \qquad (22)$$

Из системы уравнений (22) находим:

$$\tau_1=\frac{(\mu_1+\lambda_2)(\lambda_1+\mu_2)+\lambda_1(\lambda_1+\mu_2)+\lambda_2(\mu_1+\lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1+\mu_2)}; \qquad (23)$$

$$\tau_2=\frac{\mu_1(\lambda_1+\mu_2)+\lambda_1(\lambda_1+\mu_2+\lambda_2)+\lambda_2\mu_1}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1+\mu_2)}; \qquad (24)$$

$$\tau_3=\frac{\mu_2(\mu_1+\lambda_2)+\lambda_1\mu_2+\lambda_2(\lambda_1+\mu_1+\lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1+\mu_2)}, \qquad (25)$$

где τ_1 – среднее время до взрыва в помещении, если в начальный момент времени в нем отсутствуют опасная загазованность и в сети отсутствует электрический источник зажигания; τ_2 – среднее время до взрыва в помещении, если в начальный момент времени в нем образовалась опасная концентрация метановоздушной смеси и отсутствует в сети опасный электрический источник зажигания; τ_3 – среднее время до взрыва в помещении, если в начальный момент времени отсутствует опасная загазованность помещения и в сети появился электрический источник зажигания.

В том случае, когда выполняются условия:

$$\lambda_1 << \mu_1,\ \lambda_2 << \mu_2,\ \mu_2 >> \mu_1, \tag{26}$$

формула (23) примет вид:

$$\tau_1 = \frac{\mu_1}{\lambda_1 \lambda_2}. \tag{27}$$

Дисперсию времени до наступления взрыва в помещении находим, пользуясь системой уравнений (5) и матрицей (16).

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \left[2\begin{pmatrix} \lambda_1+\lambda_2 & -\lambda_1 & -\lambda_2 \\ -\mu_1 & \mu_1+\lambda_2 & 0 \\ -\mu_2 & 0 & \lambda_1+\mu_2 \end{pmatrix}^{-1} - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \tau_1^2 \\ \tau_2^2 \\ \tau_3^2 \end{pmatrix} \tag{28}$$

Из системы уравнений (28) находим:

$$D_1 = \left[\frac{2(\mu_1+\lambda_2)(\lambda_1+\mu_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1+\mu_2)} - 1 \right]\tau_1 + \left[\frac{2(\lambda_1+\mu_2)}{\lambda_2(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1+\mu_2)} - 1 \right]\tau_2 + \left[\frac{2(\mu_1+\lambda_2)}{\lambda_1(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1+\mu_2)} - 1 \right]\tau_3 - \tau_1^2; \tag{29}$$

$$D_2 = \left[\frac{2\mu_1(\lambda_1+\mu_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1+\mu_2)} - 1 \right]\tau_1 + \left[\frac{2(\lambda_1+\mu_2+\lambda_2)}{\lambda_2(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1+\mu_2)} - 1 \right]\tau_2 + \left[\frac{2\mu_1}{\lambda_1(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1+\mu_2)} - 1 \right]\tau_3 - \tau_2^2; \tag{30}$$

$$D_3 = \left[\frac{2\mu_2(\mu_1+\lambda_2)}{\lambda_1\lambda_2(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1+\mu_2)} - 1 \right]\tau_1 + \left[\frac{2\mu_2}{\lambda_2(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1+\mu_2)} - 1 \right]\tau_2 + \left[\frac{2(\lambda_1+\mu_1+\lambda_2)}{\lambda_1(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1+\mu_2)} - 1 \right]\tau_3 - \tau_3^2, \tag{31}$$

где D_1 – дисперсия времени до взрыва в помещении, если в начальный момент времени в нем отсутствует взрывоопасная смесь и в сети отсутствует опасный электрический источник зажигания; D_2 – дисперсия времени до взрыва в помещении, если в начальный момент времени в нем образовалась опасная концентрация метановоздушной смеси, а в сети отсутствует электрический источник зажигания; D_3 – дисперсия времени до взрыва в помещении, если в начальный момент времени отсутствует взрывоопасная газовоздушная смесь и в сети появился опасный электрический источник зажигания.

В формулах (29), (30) и (31) значения τ_1, τ_2 и τ_3 находят с помощью формул (23), (24) и (25).

В том случае, если выполняются условия $\lambda_1 << \mu_1$, $\lambda_2 << \mu_2$, то:

$$D_1 \cong \frac{\mu_1^2 \mu_2^2}{\lambda_1^2 \lambda_2^2 (\mu_1 + \mu_2)^2}. \tag{32}$$

Во всех случаях, если при расчётах получим, что

$$\tau_1 \cong \sqrt{D_1}, \tag{33}$$

тогда вероятность взрывов в помещении за время t можно определить с помощью формулы:

$$F_1(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{1}{\tau_1} \right) t \right]. \tag{34}$$

Используя формулы (27) и (20), получим:

$$\tau_1 = \frac{q_1 + q_2}{\lambda_1\lambda_2 kW \left\{ \ln\left[1 - \left(1 + \frac{q_1}{q_2} \right) C_1 \right] - \ln\left[1 - \left(1 + \frac{q_1}{q_2} \right) C_2 \right] \right\}}. \tag{35}$$

Если условие (33) не выполняется, тогда $F_1(t)$ находим следующим образом, используя формулу (7):

$$F_1(t) = 1 - \left[P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) \right], \tag{36}$$

где $P_1(t)$ – вероятность того, что в помещении в момент времени t отсутствует взрывоопасная смесь и опасный электрический источник зажигания; $P_2(t)$ – вероятность того, что в помещении в момент времени t образовалась взрывоопасная метановоздушная смесь, и в сети отсутствует электрический источник зажигания; $P_3(t)$ – вероятность того, что в помещении в момент времени t отсутствует взрывоопасная метановоздушная смесь и появился в сети электрический источник зажигания.

Используя систему линейных дифференциальных уравнений (6) и матрицу (14), получим:

$$\begin{bmatrix} P'_1(t) \\ P'_2(t) \\ P'_3(t) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{bmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} -(\lambda_1+\lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 \\ \mu_1 & -(\mu_1+\lambda_2) & 0 \\ \mu_2 & 0 & -(\lambda_1+\mu_2) \end{pmatrix} \tag{37}$$

Система линейных дифференциальных уравнений (37) решается при начальных условиях: $P_1(0) = 1$; $P_2(0) = 0$; $P_3(0) = 0$.

Систему уравнений (37) с помощью преобразования Лапласа приводим к линейной системе алгебраических уравнений вида [10]:

$$P(S) = AP(0)\left[SI - \quad\right]^{-1}, \tag{38}$$

тогда система линейных дифференциальных уравнений (37) примет вид:

$$\begin{bmatrix} P_1(S) \\ P_2(S) \\ P_3(S) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \left[\begin{pmatrix} S & 0 & 0 \\ 0 & S & 0 \\ 0 & 0 & S \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -(\lambda_1+\lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 \\ \mu_1 & -(\mu_1+\lambda_2) & 0 \\ \mu_2 & 0 & -(\lambda_1+\mu_2) \end{pmatrix} \right]^{-1} . \tag{39}$$

Систему уравнений (39) преобразуем к виду:

$$\begin{bmatrix} P_1(S) \\ P_2(S) \\ P_3(S) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{pmatrix} S+\lambda_1+\lambda_2 & -\lambda_1 & -\lambda_2 \\ -\mu_1 & S+\mu_1+\lambda_2 & 0 \\ -\mu_2 & 0 & S+\lambda_1+\mu_2 \end{pmatrix}^{-1} . \tag{40}$$

Из системы уравнений (40) находим:

$$P_1(S) = \frac{(S+\lambda_1+\mu_2)(S+\mu_1+\lambda_2)}{S^3+aS^2+bS+c}; \tag{41}$$

$$P_2(S) = \frac{(S+\lambda_1+\mu_2)(S+\mu_1+\lambda_2)}{S^3+aS^2+bS+c}; \tag{42}$$

$$P_3(S) = \frac{\lambda_2(S+\mu_1+\lambda_2)}{S^3+aS^2+bS+c}, \tag{43}$$

где

$a = 2\lambda_1 + \mu_1 + 2\lambda_2 + \mu_2;$

$b = \lambda_1\lambda_2 + (\lambda_1+\lambda_2+\mu_1)(\lambda_1+\lambda_2+\mu_2);$

$c = \lambda_1\lambda_2(\lambda_1+\lambda_2+\mu_1+\mu_2).$

Используя выражение (36), вероятность взрывов в помещении найдем следующим образом:

$$F_1(t) = 1 - \left\{ L^{-1}\left[P_1(S)+P_2(S)+P_3(S)\right] \right\}. \tag{44}$$

Для получения обратного преобразования Лапласа, воспользуемся формулой [15]:

$$R(t) = \sum_{k=1}^{n} \frac{G(S_k)}{Z^{'}(S_k)} e^{S_k \cdot t}, \tag{45}$$

где S_k – корни уравнения $\mathrm{Z}(S_k) = 0$. Используя формулы (41)-(45), получим:

$$F_1(t) = 1 - \left[\frac{G(S_1)}{Z^{'}(S_1)} e^{S_1 \cdot t} + \frac{G(S_2)}{Z^{'}(S_2)} e^{S_2 \cdot t} + \frac{G(S_3)}{Z^{'}(S_3)} e^{S_3 \cdot t} \right], \tag{46}$$

где

$$\mathrm{Z}(S_k) = S^3 + aS^2 + bS + c. \tag{47}$$

Приравняв $\mathrm{Z}(S_k) = 0$, найдем корни уравнения S_1 , S_2 , S_3 известными методами [10].

Находим $Z'(S_k)$, $k = 1,2,3$:

$Z'(S_k) = (S_k^3 + aS_k^2 + bS_k + C)' = 3S_k^2 + 2aS_k + b$,

где $Z'(S_1) = 3S_1^2 + 2aS_1 + b$; $Z'(S_2) = 3S_2^2 + 2aS_2 + b$; $Z'(S_3) = 3S_3 + 2aS_3 + b$.

Подставив полученные значения: $Z'(S_1)$, $Z'(S_2)$, $Z'(S_3)$ и $G(S_1)$, $G(S_2)$, $G(S_3)$ в формулу (46), получим:

$$\begin{aligned} F_1(t) = 1 - \frac{S_1^2 + aS_1 + b_1}{3S_1^2 + 2aS_1 + b} e^{S_1 t} - \\ - \frac{S_2^2 + aS_2 + b_1}{3S_2^2 + 2aS_2 + b} e^{S_2 t} - \frac{S_3^2 + aS_3 + b_1}{3S_3^2 + 2aS_3 + b} e^{S_3 t} \end{aligned} . \tag{48}$$

Формула (48) позволяет оценить взрывобезопасность газифицированного помещения при заданных исходных данных.

Пример. В помещении объемом W = 27 м^3 в результате естественной вентиляции поступает свежий воздух с расходом q_1 = 1 м^3/мин. При утечке газа в системе газоснабжения в помещение непрерывно поступает газ с расходом q_2 = 0,5 м^3/мин. За время наблюдения за этим помещением t = 5 лет было зафиксировано a_1 = 6 случаев опасной загазованности помещения, $C_1 = 0,05$, $C_2 = 0,015$ – нижний и верхний пределы взрываемости метановоздушной смеси соответственно.

Будем предполагать, что среднее время нарастания концентрации метановоздушной смеси в помещении от нижнего предела взрываемости к верхнему будет равно среднему времени снижения концентрации взрывоопасного газа от верхнего предела взрываемости к нижнему, т.е. $k = 2$; частота появления в сети опасного источника зажигания (короткое замыкание в сети) в этом помещении $\lambda_2 = 2,39 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$, а средняя длительность его существования $d_2 = 0,2$ с – время срабатывания токовой отсечки автоматического выключателя ($\mu_2 = 1/d_2 = 18000$ ч$^{-1}$).

Определить вероятность взрывов в помещении в течение t_1 = 1 год.

Используя формулу (20), определим μ_1:

$$\mu_1 = \frac{1+0,5}{2 \cdot 27 \left\{ \ln\left[1 - \left(1 + \frac{1}{0,5}\right)0,05\right] - \ln\left[1 - \left(1 + \frac{1}{0,5}\right)0,15\right] \right\}} =$$

$$= 0,064\,\text{мин}^{-1} = 3,8\,\text{ч}^{-1}$$

Находим $\lambda_1 = \frac{a_1}{t} = \frac{6}{5 \cdot 8760} = 1,37 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$.

Из условия задачи видно, что условие (26) соблюдается. Тогда, используя формулы (27) и (34), находим вероятность появления взрывов в исследуемом помещении в течение года, т.е. *F(8760)*:

$$F(8760) = 1 - \exp\left[-\frac{1,37 \cdot 2,38 \cdot 10^{-8}}{3,8} \cdot 8760 \right] = 7,5 \cdot 10^{-5},$$

Из приведенного расчета видно, что с вероятностью $7,5 \cdot 10^{-5}$ в исследуемом помещении в течение года произойдет взрыв.

Полученное значение вероятности взрывов в исследуемом помещении в течение года $F(8760) = 7,5 \cdot 10^{-5}$ больше нормируемого значения $Q(8760) \le 1 \cdot 10^{-6}$ [12] в 75 раз. Следовательно, необходимо разрабатывать организационные и технические мероприятия, которые позволяют уменьшить параметры λ_1, λ_2 и увеличивать μ_1.

Выводы

1. Изменение состояния газовоздушной смеси в исследуемом помещении и появление источника зажигания, мощность и длительность которого достаточны для воспламенения взрывоопасной метановоздушной смеси, целесообразно представить в виде двух независимых регулярных однородных марковских процессов $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$ с двумя дискретными состояниями («*0*» – безопасное состояние, «*1*» – опасное) и непрерывным временем.

2. Каждый из процессов $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$ характеризуется двумя параметрами: $\overline{d}_1$ – среднее время между появлением взрывоопасной концентрации метановоздушной смеси в помещении; d_1 – средняя длительность существования опасной метановоздушной смеси; $\overline{d}_2$ – средний интервал времени между появлением опасного источника зажигания; d_2 – средняя длительность существования опасного источника.

3. Получены новые формулы: (23)-(25), (27), (29)-(31), (34)-(35), (48), которые отличаются от известных тем, что кроме частоты появления событий и длительности их существования, учитывают объем помещения, расход воздуха в результате естественной вентиляции, а также изменение концентрации метановоздушной смеси в помещении.

4. При выполнении условия: $\lambda_1 << \mu_1$, $\lambda_2 << \cdot\mu_2$ и $\mu_2 >> \mu_1$ получена инженерная формула для определения вероятности возникновения взрыва в помещении с течением времени (34).Для конкретного газифицированного помещения с параметрами W = 27 м^3, q_1 = 1 м^3/мин, q_2 = 0,5 м^3/мин с частотой опасной загазованности помещения $\lambda_1 = 1,37 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$, частотой появления опасного источника поджигания $\lambda_2 = 2,38 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$, и средней длительности его существования $d_2 = 0,2$ с. Установлено, что в этом помещении с вероятностью $7,5 \cdot 10^{-5}$ в течение года произойдет взрыв метановоздушной смеси. Полученное значение больше нормируемого в 75 раз. Следовательно, для обеспечения нормируемого уровня взрывобезопасности помещения необходимо разрабатывать организационные и технические мероприятия, направленные на уменьшение параметров λ_1, λ_2 и увеличению μ_1.

Список литературы: **1.** Статут залізниць України [Текст] / Затв. постановою кабінету міністрів України від 6.04.1998 р № 457. **2.** Организация движения на железнодорожном транспорте [Текст] / *Под ред. Ф. П. Кочнева*. – М.: Транспорт, 1979. – 568 с. **3.** *Левин, Д. Ю.* Расчет и использование пропускной способности железных дорог: монография [Текст] / *Д. Ю. Левин, В. Л. Павлов*. – М.: ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. – 364 с. **4.** *Бородин, А. Ф.* Эксплуатационная работа железнодорожных направлений [Текст] / *А. Ф. Бородин* // Труды ВНИИАС. Вып. 6. – М: БизнесПроэкт. – 2008. – С. 307–314. **5.** *Железнов, Д. В.* Оптимизация движения поездов при ограничениях пропускной способности «окна» для производства капитального ремонта пути [Текст] / *Д. В. Железнов, Е. Н. Светлакова*. – Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2012. – 120 с. **6.** *Железнов, Д. В.* Методология усиления провозной способности железных дорог России в условиях реформы отрасли [Текст]: диссертация доктора техн. наук / *Д. В. Железнов*; Моск. гос. ун-т путей сообщ. – М., 2013. – 324 с. **7.** *Батурин, А. П.* Теория выбора оптимального развития технического оснащения сети железных дорог [Текст]: диссертация доктора техн. наук / *А. П. Батурин*; М: МИИТ. – 2000. – 336 с. **8.** Тимчасова інструкція з організації швидкісного руху пасажирських поїздів. Вимоги до інфраструктури та рухомого складу [Текст] / Затв. нак. Укрзалізниці від 12.07.02 № 360-Ц. **9.** *Виноградов, С. А.* Предложения по разработке и автоматизации технологии оценки влияния параметров перевозочного процесса на пропускные способности участков железных дорог [Текст] / *С. А. Виноградов* // Бюллетень объединённого учёного совета ОАО «РЖД». – 2012. – № 3. – С. 22–26. **10.** *Анисимов, П. С.* Высокоскоростные железнодорожные магистрали и пассажирские поезда: монография [Текст] / *П. С. Анисимов, А. А. Иванов*. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. – 542 с. **12.** *Папахов, О. Ю.* Обгрунтування руху поїздів на напрямках за погодженими розкладами [Текст] / *О. Ю. Папахов, Н. О. Логвінова* // Науковий журнал «Електрифікація транспорту». – 2014. – № 8. – С. 110 – 116.

Bibliography (transliterated): **1.** Postanovoyu kabinetu ministriv Ukraini No 457/ (1998). Statut zaliznits Ukraini. **2.** *Kochnev, F.* (1979). Organizatsiya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte, 568. **3.** *Levin, D., Pavlov, V.* (2111). Raschet i ispolzovanie propusknoy sposobnosti zheleznyih dorog: monografiya. M.: FGOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 364. **4.** Borodin, A. (2008). Ekspluatatsionnaya rabota zheleznodorozhnyih napravleniy. Trudyi VNIIAS, 6, Kyiv: BiznesProekt, 307–314.**5.** *Zheleznov, D., Svetlakova, E.* (2012). Optimizatsiya dvizheniya poezdov pri ogranicheniyah propusknoy sposobnosti «okna» dlya proizvodstva kapitalnogo remonta puti. Saarbryukken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 120. **6.** *Zheleznov, D.* (2013). Metodologiya usileniya provoznoy sposobnosti zheleznyih dorog Rossii v usloviyah reformyi otrasli. dissertatsiya doktora tehn. Nauk. Mosk. gos. un-t putey soobsch, Moscow, 324. **7.** *Baturin, A.* (2000). Teoriya vyibora optimalnogo razvitiya tehnicheskogo osnascheniya seti zheleznyih dorog. dissertatsiya doktora tehn. Nauk, Moscow: MIIT, 336. **8.** Nak. Ukrzaliznitsi vid 12.07.02 no 360-TS. (2002). Timchasova instruktsiya z organizatsiyi shvidkisnogo ruhu pasazhirskih poyizdiv. Vimogi do infrastrukturi ta ruhomogo skladu. **9.** *Vinogradov, S.* (2012). Predlozheniya po razrabotke i avtomatizatsii tehnologii otsenki vliyaniya parametrov perevozochnogo protsessa na propusknyie sposobnosti uchastkov zheleznyih dorog. Byulleten ob'edinyonnogo uchyonogo soveta OAO «RZhD», 3, 22–26. **10.** *Anisimov, P., Ivanov, A.* (2011). Vyisokoskorostnyie zheleznodorozhnyie magistrali i passazhirskie poezda: monografiya. – GOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 542. **11.** *Vernigora, R., Papahov, O., Logvinova, N.* (2013). Analitichniy rozrahunok koefitsientiv zyomu vantazhnih poizdiv pasazhirskimi v umovah shvidkisnogo ruhu. Shidno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnologiy, 2/3 (62), 51–55. **12.** *Papahov, O., Logvinova N.* (2014). Obgruntuvannya ruhu poyizdiv na napryamkah za pogodzhenimi rozkladami. Naukoviy zhurnal «ElektrifikatsIiya transportu», 8, 110 – 116.

Поступила (received) .15.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковальов Олександр Петрович – доктор технічних наук, Донецький національний технічний університет, професор кафедри "Електропостачання промислових підприємств та міст"; вул. Артема, 58, м. Донецьк, Україна, 83000; тел.: 095-003-57-47; e-mail: Kovalev_Alex@gmail.com.

Ковалев Александр Петрович – доктор технических наук, Донецкий национальный технический университет, профессор кафедры "Электроснабжение промышленных предприятий и городов"; ул. Артема, 58, г. Донецк, Украина, 83000; тел.: 095-003-57-47; e-mail: Kovalev_Alex@gmail.com.

Kovalev Alexander – Doctor of Engineering, Donetsk National Technical University, Professor of "Electrical supply of industrial enterprises and cities"; st. Artem, 58, Donetsk, Ukraine, 83000; tel .: 095-003-57-47; e-mail: Kovalev_Alex@gmail.com.

Москвіна Ірина Ігорівна – кандидат технічних наук, Бердянський державний педагогічний університет, доцент кафедри "Методики викладання фізико-математичних дисциплін та інформаційних технологій у навчанні"; вул. Шмідта 4, м. Бердянськ, Україна; тел.: 095-003-57-47; e-mail: iriwka-gt@inbox.ru.

Москвина Ирина Игоревна – кандидат технических наук, Бердянский государственный педагогический университет, доцент кафедры "Методики преподавания физико-математических дисциплин и информационных технологий в образовании"; ул. Шмидта 4, г. Бердянск, Украина; тел .: 095-003-57-47;

Moskvina Irina – Ph.D., Berdyansk State Pedagogical University, Associate Professor of "Teaching methods of physical and mathematical sciences and information technologies in education"; st. Schmidt 4, m. Berdyansk, Ukraine; tel .: 095-003-57-47; e-mail: ***iriwka-gt@inbox.ru.***

УДК 004.89:614.841.4

В. М. КРИШТАЛЬ, А. В. СЕРГЄЄВ, В. Є. СНИТЮК

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРІАНТУ КОМПЛЕКТАЦІЇ АВАРІЙНО-РЯТУВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКИХ ВИСНОВКІВ

Виконано аналіз аспектів розв'язання задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки. Розроблено метод визначення оптимального варіанту комплектування як елемента технології проведення нечіткої багатокритеріальної оптимізації з використанням методу аналізу ієрархій та побудови функцій належності на основі попарних порівнянь пріоритетності цільових функцій. Визначено обмеження на процес і розв'язок задачі, що дозволяють на етапі попереднього аналізу відсіяти неперспективні альтернативи, а також розглянуто можливості застосування інших еволюційних технологій. Наведено приклад експериментального розрахунку варіанту комплектації аварійно-рятувальної техніки.

Ключові слова: аварійно-рятувальна техніка, комплектування, нечіткі висновки, аналіз ієрархій, функція належності.

Вступ. До особливостей сучасного світу належать безперервні природні катаклізми. Це цунамі та урагани, землетруси і тайфуни, посухи, повені та пожежі. Такі природні явища супроводжуються техногенними, екологічними катастрофами, які обумовлені ще і зростанням промислового виробництва, а також загрозами, що виходять від окремих суб'єктів, або викликані іншими, можливо випадковими факторами. У розвинених країнах світу створені спеціальні служби, які надають допомогу людям, постраждалим у вищевказаних ситуаціях. В Україні такі функції покладені на підрозділи Державної служби з надзвичайних ситуацій. Певний універсалізм функцій, що виконують його співробітники, є причиною існування проблеми забезпечення та комплектування таких підрозділів технічними засобами. У більшості випадків їх носієм є пожежний або спеціальний автомобіль і у цьому випадку існує протиріччя між необхідністю забезпечення універсальності аварійно-рятувальної техніки (АРТ) і обмеженістю його носія. Необхідно розв'язувати задачу оптимального комплектування АРТ.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Така задача має спільні особливості з відомими задачами, зокрема, із задачею про упаковку в контейнери за вагою або за вартістю [1] і задачею про ранець [2]. Відомими методами їх розв'язання є динамічне програмування [3], метод гілок і границь [4], метод повного перебору [5], генетичні алгоритми [6], алгоритми мурашиної колонії [7], «жадібні» алгоритми [8] тощо.

Особливостями таких задач і відповідних методів їх розв'язання є чітко задані параметри об'єктів і одно- або двокритеріальність. На відміну від них задача комплектування АРТ є багатокритеріальною задачею з нечітко заданими перевагами на множині цільових функцій. Крім того, вона є певним аналогом задачі упаковки в контейнери, тобто тривимірною. При цьому кількість контейнерів вважається заданою, а кількість елементів АРТ є змінною. Вирішення проблеми комплектування АРТ та розробка методики визначення оптимальної альтернативи комплектування становить важливу науково-технічну проблему.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення оптимального варіанту комплектування аварійно-рятувальної техніки на основі нечітких експертних висновків.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні задачі:

1. Виконати формалізацію задачі комплектування аварійно-рятувальної техніки як задачі багатокритеріальної оптимізації подібної до задачі тривимірної упаковки в контейнери з декількома цільовими функціями.

2. Розробити метод визначення оптимального варіанту комплектування АРТ на основі висновків багатьох експертів, методу аналізу ієрархій та елементів теорії нечітких множин.

Постановка задачі комплектування АРТ виконана раніше в [9]. Наведемо її основні елементи. Нехай множина $X=\{X_1,X_2,...,X_n\}$ представляє номенклатуру АРТ. Кожен елемент множини X належить до одного із класів множини $C=\{C_1,C_2,...,C_k\}$, де $k<<n.$ Припустимо, що в комплект має входити обладнання для кожного із $\{C_1,C_2,...,C_m\}$ класів, $m<k,$ тобто необхідно вибрати по одному елементу із множин $\{X^1_{i_1},X^1_{i_2},...,X^1_{i_{jm}}\}\subset C_1,...,\{X^m_{i_1},X^m_{i_2},...,X^m_{i_{jm}}\}\subset C_m.$ Кожному елементу множини X поставимо у відповідність сукупність значень