

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 газовой 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  $W$ , ( $\text{м}^3$ ). Объем выделяемого в помещение га-

за (метана) из-за утечек в газопроводе, его арматуре либо из-за случайно открытых конфорок газовой плиты (медленное поступление газа в помещение) обозначим через  $q_1$ , ( $\text{м}^3/\text{мин}$ ). В результате естественной вентиляции в помещение поступает свежий воздух, расход которого  $q_2$ , ( $\text{м}^3/\text{мин}$ ). 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 газоздушная смесь; 1 – в помещении образовалась опасная метановоздушная смесь.

Характер изменения функции  $\xi_1(t)$  с течением времени следующий: существуют чередующиеся отрезки времени  $\xi_{11}^{(0)}, \xi_{12}^{(0)}, \dots, \xi_{1n}^{(0)}$  и  $\xi_{11}^{(1)}, \xi_{12}^{(1)}, \dots, \xi_{1n}^{(1)}$  для которых последовательно  $\xi_1(t)=0$  и  $\xi_1(t)=1$ , где  $\xi_{li}^{(0)}$ ,  $i = \overline{1, n}$  – случайные интервалы времени между появлением в помещении опасной концентрации метановоздушной смеси, а  $\xi_{li}^{(1)}$ ,  $i = \overline{1, n}$  – случайные отрезки времени нахождения в помещении газоздушной 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  $\xi_{21}^{(0)}, \xi_{22}^{(0)}, \dots, \xi_{2m}^{(0)}$  и  $\xi_{21}^{(1)}, \xi_{22}^{(1)}, \dots, \xi_{2m}^{(1)}$  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 вре-

мени  $\xi_{1n}^{(1)}$  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  $\Delta t$  равна  $\lambda_1 \Delta t + o(\Delta t)$ , где  $o(\Delta t)$  обозначает величину высшего порядка малости по сравнению с  $\Delta t$ . Вероятность того, что за время  $\Delta t$  опасная концентрация метановоздушной смеси в помещении станет не опасной, равна  $\mu_1 \Delta t + o(\Delta t)$ . Величины  $\lambda_1$  и  $\mu_1$  являются параметрами процесса  $\xi_1(t)$ .

Параметр  $\lambda_1$  характеризует интенсивность или скорость, с которой безопасная концентрация метана в помещении переходит в опасное состояние;  $\mu_1$  – интенсивность или скорость, с которой опасная концентрация газовой 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  $\Delta t$  равна  $\lambda_2 \Delta t + o(\Delta t)$ . Вероятность того, что за время  $\Delta t$  опасный источник поджигания перейдет в безопасное состояние будет равна  $\mu_2 \Delta t + o(\Delta t)$ . Величины  $\lambda_2$  и  $\mu_2$  являются параметрами процесса  $\xi_2(t)$ ,  $\lambda_2$  – характеризует интенсивность или скорость, с которой безопасные промежутки времени сменяются на опасные;  $\mu_2$  – 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 состояние 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  $W$ , ( $\text{м}^3$ ); приток в помещение свежего воздуха  $q_1$  ( $\text{м}^3/\text{мин}$ ) в результате естественной вентиляции; объем выделяемого в него газа (метана)  $q_2$ , ( $\text{м}^3/\text{мин}$ ) 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.  $\lambda_1$ ,  $\mu_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\mu_2$ , определить вероятность  $F_1(t)$  взрывов в помещении; среднее время до взрыва  $\tau_1$ , 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  $\zeta_k$ ,  $k = \overline{1,3}$  время пребывания процесса  $\chi(t)$  в состоянии  $e_k$ . Для регулярного однородного марковского процесса  $\chi(t)$  случайные величины  $\zeta_k$  имеют показательную функцию распределения вероятностей [6]:

$$F_{\zeta_k}(t) = P\{\zeta_k < t\} = 1 - \exp[-(\lambda_i t)], \quad (1)$$

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

Эти вероятности переходов определяются следующим образом [7]:

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

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

В формуле (3) величина  $\lambda_{ij}$  учитывает с точностью до членов второго порядка малости, что за время  $\Delta t$  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  $\Delta t$  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  $P(\Delta t) = [P_{ij}(\Delta t)]$ .

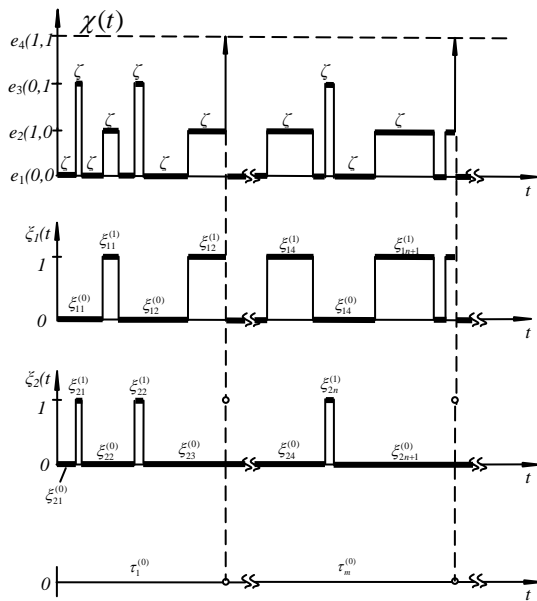


Рис. 1 – Возможная реализация регулярного однородного марковского случайного процесса с четырьмя дискретными состояниями и непрерывным временем, где:  $e_1(0,0), e_2(1,0), e_3(0,1), e_4(1,1)$  – состояния системы «среда-источник»;  $\zeta_k$  – время нахождения системы «среда-источник» в одном из  $k$  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  $\tau_1$ , 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);  $\xi$  – 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;  $P'(t) = [P'(t)]_{i=1}^{2^k-1}$  – вектор-строка;

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

$P(t) = [P_i(t)]_{i=1}^{2^k-1}$  – вектор-строка;  $N = (I - Q)^{-1}$  – фундаментальная матрица;  $A = (Q - I)$  – матрица, полученная в результате разности матрицы  $Q$  и единичной;  $\tau^2 = [\tau_i^2]_{i=1}^{2^k-1}$  – вектор-столбец;  $\lambda_i = 1/\bar{d}_i$ ;  $\bar{d}_i$  – 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:  $P_1(0) = 1; P_2(0) = 0; \dots P_\gamma(0) = 0$ , где  $\gamma = 2^k - 1$ .

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 газовой 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  $\Delta t$  для приведенной выше задачи определим следующим образом:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Матрицу  $N$  находят следующим образом [12, 13]:

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

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

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

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]:

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

где  $q_1$  – расход воздуха, м<sup>3</sup>/мин (в результате естественной вентиляции в помещение поступает свежий воздух);  $q_2$  – выделяемый в помещение газ, м<sup>3</sup>/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<sup>3</sup>.

Используя формулу (17), находим  $d_1$ :

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

Используя (17) и (18), находим:

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

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:

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

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

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

Систему уравнений (21) представим в виде:

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

Из системы уравнений (22) находим:

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

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

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

где  $\tau_1$  – среднее время до взрыва в помещении, если в начальный момент времени в нем отсутствуют опасная загазованность и в сети отсутствует электрический источник зажигания;  $\tau_2$  – 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;  $\tau_3$  – 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:

$$\lambda_1 \ll \mu_1, \lambda_2 \ll \mu_2, \mu_2 \gg \mu_1, \quad (26)$$

формула (23) примет вид:

$$\tau_1 = \frac{\mu_1}{\lambda_1 \lambda_2}. \quad (27)$$

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

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 + \lambda_2 & -\lambda_1 & -\lambda_2 \\ -\mu_1 & \mu_1 + \lambda_2 & 0 \\ -\mu_2 & 0 & \lambda_1 + \mu_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tau_1^2 \\ \tau_2^2 \\ \tau_3^2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Из системы уравнений (28) находим:

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

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

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

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  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_3$  находят с помощью формул (23), (24) и (25).

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

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

Во всех случаях, если при расчётах получим, что

$$\tau_1 \cong \sqrt{D_1}, \quad (33)$$

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

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

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

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

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

$$F_1(t) = 1 - [P_1(t) + P_2(t) + P_3(t)], \quad (36)$$

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:

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

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]:

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

тогда система линейных дифференциальных уравнений (37) примет вид:

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

Систему уравнений (39) преобразуем к виду:

$$\begin{bmatrix} P_1(S) \\ P_2(S) \\ P_3(S) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \left[ \begin{bmatrix} S + \lambda_1 + \lambda_2 & -\lambda_1 & -\lambda_2 \\ -\mu_1 & S + \mu_1 + \lambda_2 & 0 \\ -\mu_2 & 0 & S + \lambda_1 + \mu_2 \end{bmatrix} \right]^{-1} \quad (40)$$

Из системы уравнений (40) находим:

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

где

$$Z(S_k) = S^3 + aS^2 + bS + c. \quad (47)$$

Приравняв  $Z(S_k) = 0$ , 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:

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

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

*Пример.* В помещении объемом  $W = 27 \text{ м}^3$  в результате естественной вентиляции поступает свежий воздух с расходом  $q_1 = 1 \text{ м}^3/\text{мин}$ . При утечке газа в системе газоснабжения в помещение непрерывно поступает газ с расходом  $q_2 = 0,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ . 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  $\lambda_2 = 2,39 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ , а средняя длительность его существования  $d_2 = 0,2 \text{ с}$  – время срабатывания токовой отсечки автоматического выключателя ( $\mu_2 = 1/d_2 = 18000 \text{ ч}^{-1}$ ).

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

Используя формулу (20), определим  $\mu_1$ :

$$\mu_1 = \frac{1 + 0,5}{2 \cdot 27 \left\{ \ln \left[ 1 - \left( 1 + \frac{1}{0,5} \right) 0,05 \right] - \ln \left[ 1 - \left( 1 + \frac{1}{0,5} \right) 0,15 \right] \right\}} = 0,064 \text{ мин}^{-1} = 3,8 \text{ ч}^{-1}$$

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

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  $Q(8760) \leq 1 \cdot 10^{-6}$  [12] в 75 раз. Следовательно, необходимо разрабатывать организационные и технические

мероприяття, которые позволяют уменьшить параметры  $\lambda_1, \lambda_2$  и увеличивать  $\mu_1$ .

### Выводы

1. Изменение состояния газовой 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:  $\bar{d}_1$  – среднее время между появлением взрывоопасной концентрации метановоздушной смеси в помещении;  $d_1$  – средняя длительность существования опасной метановоздушной смеси;  $\bar{d}_2$  – 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:  $\lambda_1 \ll \mu_1, \lambda_2 \ll \mu_2$  и  $\mu_2 \gg \mu_1$  получена инженерная формула для определения вероятности возникновения взрыва в помещении с течением времени (34). Для конкретного газифицированного помещения с параметрами  $W = 27 \text{ м}^3, q_1 = 1 \text{ м}^3/\text{мин}, q_2 = 0,5 \text{ м}^3/\text{мин}$  с частотой опасной загазованности помещения  $\lambda_1 = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ , частотой появления опасного источника поджигания  $\lambda_2 = 2,38 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ , и средней длительности его существования  $d_2 = 0,2 \text{ с}$ . 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  $\lambda_1, \lambda_2$  и увеличению  $\mu_1$ .

**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.: БизнесПроект. – 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. – Saarbrücken: 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. Батурич, А. П. Теория выбора оптимального развития технического оснащения сети железных дорог [Текст]: диссертация доктора техн. наук / А. П. Батурич; М.: МИИТ. – 2000. – 336 с. 8. Тимчасова інструкція з організації швидкісного руху пасажирських поїздів. Вимоги до інфраструктури та рухомого складу [Текст] / Затв. нак. Укрзалізниця 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 объединенного ученого 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 zheleznykh dorog: monografiya. M.: FGOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 364. 4. Borodin, A. (2008). Eksploatatsionnaya rabota zheleznodorozhnykh napravleniy. Trudy VNIAS, 6, Kyiv: BiznesProekt, 307–314. 5. Zheleznov, D., Svetlakova, E. (2012). Optimizatsiya dvizheniya poezdov pri ogranicheniyah propusknoy sposobnosti «okna» dlya proizvodstva kapitalnogo remonta puti. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 120. 6. Zheleznov, D. (2013). Metodologiya usileniya provoznoy sposobnosti zheleznykh dorog Rossii v usloviyah reformy otrasli. dissertatsiya doktora tehn. Nauk. Mosk. gos. un-t putey soobsch. Moscow, 324. 7. Baturin, A. (2000). Teoriya vyibora optimalnogo razvitiya tehničeskogo osnascheniya seti zheleznykh dorog. dissertatsiya doktora tehn. Nauk, Moscow: MIIT, 336. 8. Nak. Ukrzaliznitsi vid 12.07.02 no 360-TS. (2002). Timchasova instruktziya z organizatsiyi shvidkissnogo ruhu pasazhirskih poyzdiv. Vimogi do infrastrukturi ta ruhomogo skladu. 9. Vinogradov, S. (2012). Predlozheniya po razrobotke i avtomatizatsii tehnologii otsenki vliyaniya parametrov perevozochnogo protsessna na propusknyie sposobnosti uchastkov zheleznykh dorog. Byulleten ob'edinyonogo uchyonogo soveta ОАО «RZhD», 3, 22–26. 10. Anisimov, P., Ivanov, A. (2011). Vysokoskorostnyie 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 zyoumu vantazhnih poizdiv pasazhirskimi v umovah shvidkissnogo ruhu. Shidno-Evropayskiy zhurnal peredovih tehnologiy, 2/3 (62), 51–55. 12. Papahov, O., Logvinova N. (2014). Obgruntuвання руху поїздів на напрямках за погодженими розкладами. Naukoviy zhurnal «Elektrifikatsiya 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 комплектування 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 цунами 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 ці-

льових 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  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  представляє номенклатуру АРТ. Кожен елемент множини  $X$  належить до одного із класів множини  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ , де  $k \ll n$ . Припустимо, що в комплект має входити об'єднання для кожного із  $\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$  класів,  $m < k$ , тобто необхідно вибрати по одному елементу із множин  $\{X_{i_1}^1, X_{i_2}^1, \dots, X_{i_m}^1\} \subset C_1, \dots, \{X_{i_1}^m, X_{i_2}^m, \dots, X_{i_m}^m\} \subset C_m$ . Кожному елементу множини  $X$  поставимо у відповідність сукупність значень