

ОЦЕНКА ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКИ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Ковалев А.П., Муха В.П., Спиваковский А.В.
Донецкий государственный технический университет.
pm@cld.dgtu.donetsk.ua

In a paper the problems of an evaluation of explosion safety of deadlock developments of collieries are considered. The technique of an evaluation of explosion safety and equivalent circuit permitting to give an evaluation for each separate development is offered.

Взрыв, который случайно появляется в тупиковой выработке – это сложное событие. Его можно рассматривать как случайный процесс совпадения в пространстве и времени конечного числа независимых простых случайных событий, имеющих различную частоту появления и длительность существования.

Взрыв, взятый как одно конкретное событие, предвидеть невозможно. Однако, наблюдение за событиями, формирующими это катастрофическое явление, позволяет получить зависимости, которые можно использовать, как для оценки существующего положения дел, так и для прогнозирования поведения изучаемого объекта в новых условиях. Это в свою очередь позволяет организовать деятельность людей в нужном и наиболее эффективном направлении.

Количественная оценка эффективности действия всех средств и мер обеспечения безопасности тупиковой выработки может быть дана по вероятности или интенсивности их возникновения и длительности существования.

Поврежденное электрооборудование, выносящее в окружающую среду опасные источники, будем называть опасным состоянием электрооборудования, а загазирование тупиковой выработки сверх нормы – опасным состоянием среды.

Под опасным состоянием автоматических средств защиты будем понимать такое их состояние, когда при случайном появлении опасного фактора в зоне их действия происходит их отказ в срабатывании.

В существующих нормативных документах регламентируется вероятность взрыва на технологических объектах. Производственные процессы должны разрабатываться так, чтобы вероятность возникновения взрыва на любом взрывоопасном технологическом объекте в течении года не превышала величины 10^{-6} . [1]

Величина 10^{-6} означает, что из миллиона однотипных технологических объектов, опасных в отношении взрыва статистически допускается один взрыв в год.

Все установленное в тупиковой выработке электрооборудование разобьем на три группы $i = \overline{1,3}$ [2].

1. Электрооборудование, нормально искрящие и не искрящие части которого заключены в отдельные взрывонепроницаемые оболочки или наделены любым другим видом взрывозащиты (автоматические выключатели, магнитные пускатели, переключатели машин и механизмов, сетевые световые приборы и др.).
2. Электрооборудование, имеющее только нормально не искрящие части, заключенные во взрывонепроницаемые оболочки (электродвигатели с короткозамкнутым ротором, шинные коробки во взрывобезопасном исполнении и др.).
3. Электрооборудование, в котором нет нормально искрящих частей, а не искрящие части не имеют взрывозащиты (кабели, кабельная арматура в нормальном исполнении и др.).

Из всего множества опасностей, которые могут привести к взрыву на взрывоопасном участке при эксплуатации электрооборудования выделим 13. Опасности, которые встречаются реже отобранных в 100 и более раз в учет не принимаются.

1. Отключаемое КЗ.
2. Не отключаемое КЗ без последующего горения изоляции.
3. Не отключаемое КЗ с последующим горением изоляции.
4. Отключаемое ОЗ.
5. Не отключаемое ОЗ.
6. Ослабленный искрящий или опасно нагретый контакт силовой цепи в оболочке с нормально неискрящими частями.
7. Коммутационное искрение или нагрев ослабленного контакта силовой цепи в оболочке с нормально искрящими частями.
8. Отказ взрывозащиты оболочки, в которой заключены элементы с неискрящими в нормальном режиме частями.
9. Отказ взрывозащиты оболочки, в которой заключены элементы с искрящими в нормальном режиме частями.
10. Отказ защитного заземления.

11. Появление взрывчатой концентрации метана.
12. Отказ в срабатывании аппаратуры контроля воздуха.
13. Отказ в срабатывании приборов автоматического контроля метана.

Разделение электрооборудования на три группы ($i = 3$), учет $k = 13$ видов опасности, позволило каждый элемент системы формирующий взрыв в тупиковой выработке представить в виде события $x_{i,j}$, которое характеризуется двумя параметрами: \bar{d}_k – среднее время появления k -го события и d_k – средняя длительность его существования. Если в $x_{i,j}$ вместо индекса i ставится "0", то это означает, что данное событие относится ко всем трем группам электрооборудования.

Дерево, описывающее формирование взрыва в тупиковой выработке и схема минимальных взрывоопасных совмещений, приведено на рис. 1.

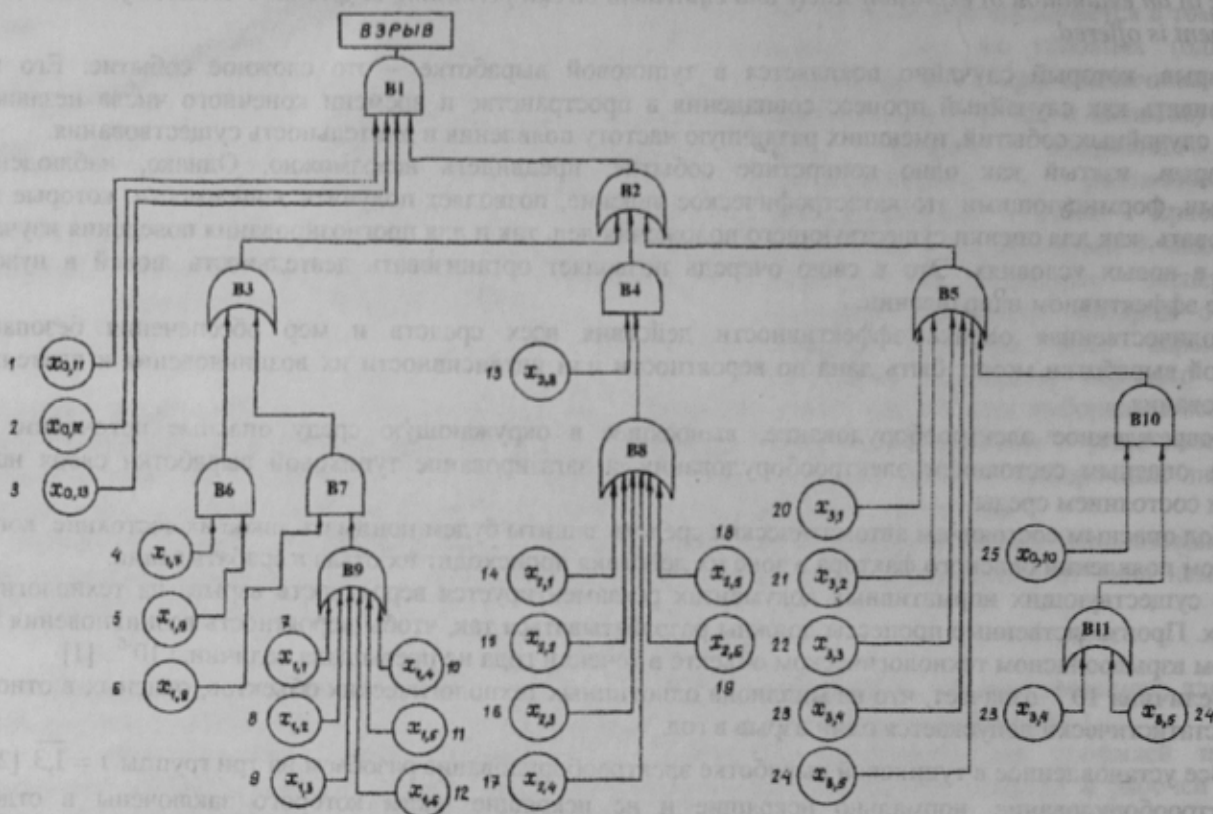


Рисунок 1 – Дерево формирования взрывов при эксплуатации всех групп электрооборудования в тупиковой выработке

Под минимальным взрывоопасным совмещением независимых аварийных событий технологического объекта будем понимать такой минимальный набор элементов, находящихся в опасном состоянии, восстановление безопасного состояния любого из которых выводит систему из взрывоопасного состояния [3].

Для каждого полученного минимального взрывоопасного совмещения опасностей (рис. 2) определяется интенсивность взрывов H_m , ($m = \overline{1,20}$). Сумма интенсивностей взрывов от каждого m -го минимального взрывоопасного совмещения и дает искомую величину H_0 .

$$H_0 = \sum_{m=1}^{20} H_m, \quad (1)$$

где H_0 – интенсивность взрывов в тупиковой выработке при ее эксплуатации.

H_m – интенсивность взрывов от каждого m -го минимального взрывоопасного совмещения опасностей.

Основные характеристики минимального взрывоопасного совмещения: среднее время до первого взрыва τ_1 , интенсивность взрывов H_1 , дисперсия σ_1^2 , функция распределения интервалов времени до первого взрыва $F_1(t)$, при условии, что в начальный момент времени все элементы, входящие в минимальное взрывоопасное совмещение, находятся в безопасном состоянии, находятся из следующих трех систем уравнений, записанных в матричной форме [3].

$$\tau = (\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1} \xi; \quad (2)$$

$$\sigma^2 = (2\mathbf{N} - \mathbf{I})\tau - \tau_{sq}; \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = \mathbf{P}(t) \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{I}); \quad (4)$$

где

I – единичная матрица; Q – матрица, полученная из матрицы интенсивностей переходов P с помощью исключения поглощающего состояния (строки из элементов $0, 0, \dots, 1$ и соответствующего столбца); $N = (I-Q)^{-1}$ – фундаментальная матрица, полученная в результате разности матриц интенсивностей переходов и единичной; ξ – вектор столбец, все элементы которого равны 1; $\tau = [\tau_i]_{i=1}^{2^n-1}$; $\sigma = [\sigma_i]_{i=1}^{2^n-1}$; $\tau_{sq} = [\tau_i^2]_{i=1}^{2^n-1}$ – вектор-столбцы. $\dot{P}(t) = [\dot{P}(t)_i]_{i=1}^{2^n}$; $P(t) = [P(t)_i]_{i=1}^{2^n}$ – вектор-строки; n – число элементов, входящих в минимальное аварийное совмещение.

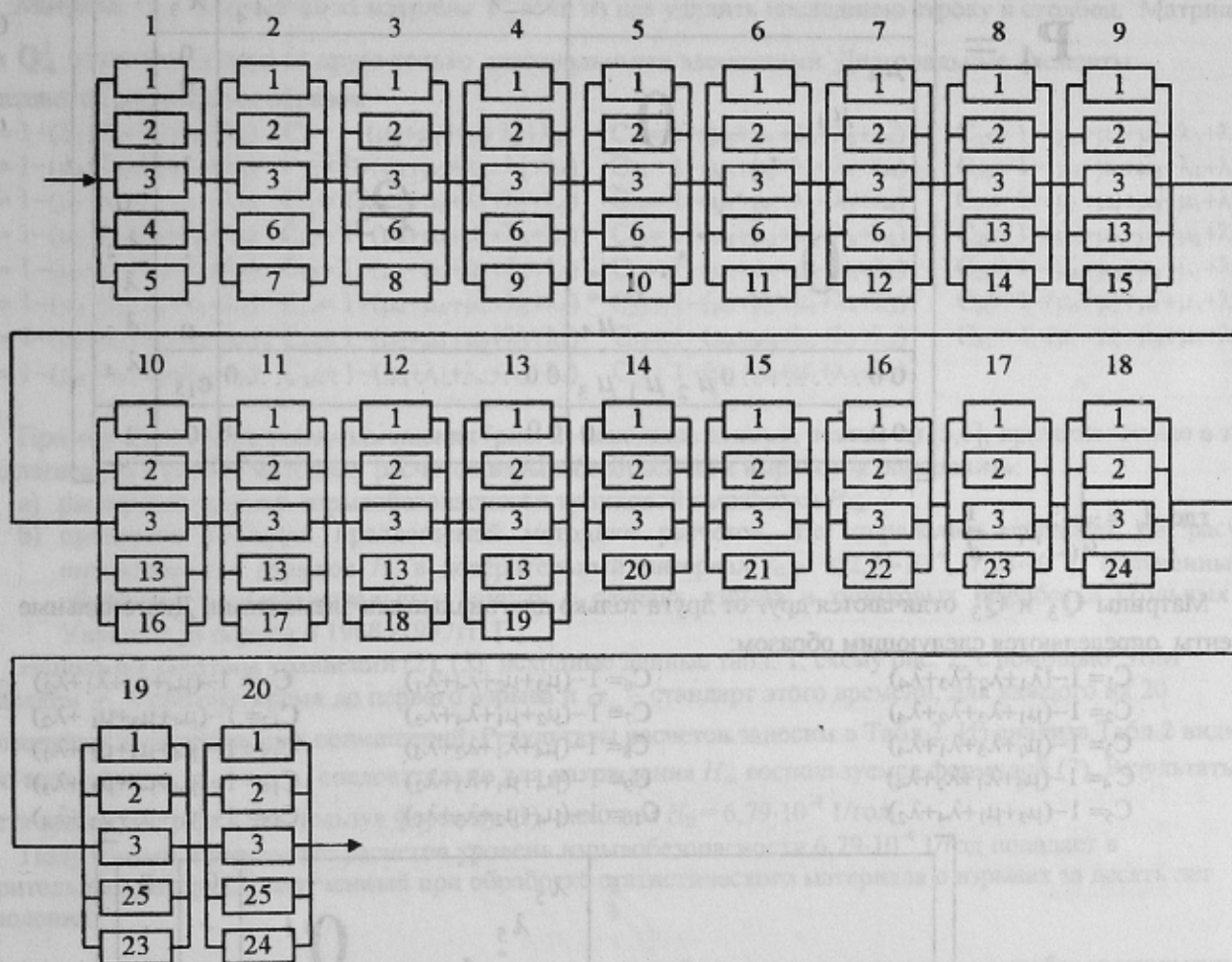


Рисунок 2. – Схема минимальных взрывоопасных совмещений, объясняющая формирование взрыва в тупиковой выработке при эксплуатации электрооборудования.

В том случае, если:

$$\tau_1 = \sigma_1, \quad (5)$$

тогда функция распределения времени до первого взрыва, определяется следующим образом:

$$F_1(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right); \quad (6)$$

$$H_1 = \frac{1}{\tau_1}. \quad (7)$$

В том случае, если условие (5) не выполняется, тогда:

$$F_1(t) = 1 - \sum_{j=1}^{2^n-1} p_j(t). \quad (8)$$

Величина $p_j(t)$ находится из решения системы уравнений (4) известными методами [4].

Из рассмотрения рис. 2 видно, что максимальное число элементов, формирующих взрыв в тупиковой выработке, равно 5, а минимальное – 4. Тогда матрицы интенсивностей взрывов для $n=4$ и $n=5$ имеют вид:

$$P_4 =$$

Q_3	λ_4 λ_4 0 \dots 0 \dots λ_4	0	0
μ_4 μ_4 0 \dots 0 \dots μ_4	0 Q_3^1	0	0
0 0 0 $\mu_2 \mu_1 \mu_3$	0 0 0	C_{15}	λ_2
0 0 0	0 0 0	0	1
		λ_1	λ_3
		λ_4	

(9)

где $\lambda_i = \frac{1}{d_i}$; $\mu_i = \frac{1}{d_i}$.

Матрицы Q_3 и Q_3^1 отличаются друг от друга только диагональными элементами. Диагональные элементы определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} C_1 &= 1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) \\ C_2 &= 1 - (\mu_1 + \lambda_3 + \lambda_2 + \lambda_4) \\ C_3 &= 1 - (\mu_2 + \lambda_3 + \lambda_1 + \lambda_4) \\ C_4 &= 1 - (\mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4) \\ C_5 &= 1 - (\mu_3 + \mu_1 + \lambda_4 + \lambda_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_6 &= 1 - (\mu_3 + \mu_2 + \lambda_4 + \lambda_1) \\ C_7 &= 1 - (\mu_2 + \mu_1 + \lambda_4 + \lambda_3) \\ C_8 &= 1 - (\mu_4 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \\ C_9 &= 1 - (\mu_4 + \mu_1 + \lambda_3 + \lambda_2) \\ C_{10} &= 1 - (\mu_4 + \mu_2 + \lambda_3 + \lambda_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{11} &= 1 - (\mu_4 + \mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2) \\ C_{12} &= 1 - (\mu_4 + \mu_3 + \mu_1 + \lambda_2) \\ C_{13} &= 1 - (\mu_4 + \mu_3 + \mu_2 + \lambda_1) \\ C_{14} &= 1 - (\mu_4 + \mu_2 + \mu_1 + \lambda_3) \\ C_{15} &= 1 - (\mu_2 + \mu_1 + \mu_3 + \lambda_4) \end{aligned}$$

$$P_5 =$$

Q_4	λ_5 λ_5 0 \dots 0 \dots λ_5	0	0
μ_5 μ_5 0 \dots 0 \dots μ_5	0 Q_4^1	0	0
0 0 0 $\mu_2 \mu_1 \mu_3 \mu_4$	0 0 0	C_{31}	λ_2
0 0 0	0 0 0	0	1
		λ_1	λ_3
		λ_4	λ_5

(10)

$$Q_3 = \begin{bmatrix} C_1^{(4)} & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 & C_2^{(4)} & 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & \lambda_2 \\ \mu_2 & 0 & C_3^{(4)} & 0 & 0 & \lambda_3 & \lambda_1 \\ \mu_3 & 0 & 0 & C_4^{(4)} & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & \mu_3 & 0 & \mu_1 & C_5^{(4)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 & \mu_2 & 0 & C_6^{(4)} & 0 \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & C_7^{(4)} \end{bmatrix}$$

Матрица Q_4 получается из матрицы P_4 если из нее удалить последнюю строку и столбец. Матрицы Q_4 и Q_4^1 отличаются друг от друга только диагональными элементами. Диагональные элементы определяются следующим образом.

$$\begin{aligned} C_1 &= 1 - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5) & C_9 &= 1 - (\mu_4 + \mu_1 + \lambda_3 + \lambda_2 + \lambda_5) & C_{17} &= 1 - (\mu_5 + \mu_1 + \lambda_3 + \lambda_2 + \lambda_4) & C_{25} &= 1 - (\mu_5 + \mu_4 + \mu_2 + \lambda_3 + \lambda_1) \\ C_2 &= 1 - (\mu_1 + \lambda_3 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5) & C_{10} &= 1 - (\mu_4 + \mu_2 + \lambda_3 + \lambda_1 + \lambda_5) & C_{18} &= 1 - (\mu_5 + \mu_2 + \lambda_3 + \lambda_1 + \lambda_4) & C_{26} &= 1 - (\mu_5 + \mu_4 + \mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2) \\ C_3 &= 1 - (\mu_2 + \lambda_3 + \lambda_1 + \lambda_4 + \lambda_5) & C_{11} &= 1 - (\mu_4 + \mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_5) & C_{19} &= 1 - (\mu_5 + \mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4) & C_{27} &= 1 - (\mu_5 + \mu_4 + \mu_3 + \mu_1 + \lambda_2) \\ C_4 &= 1 - (\mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5) & C_{12} &= 1 - (\mu_4 + \mu_3 + \mu_1 + \lambda_5 + \lambda_2) & C_{20} &= 1 - (\mu_5 + \mu_3 + \mu_1 + \lambda_4 + \lambda_2) & C_{28} &= 1 - (\mu_5 + \mu_4 + \mu_3 + \mu_2 + \lambda_1) \\ C_5 &= 1 - (\mu_3 + \mu_1 + \lambda_4 + \lambda_2 + \lambda_5) & C_{13} &= 1 - (\mu_4 + \mu_3 + \mu_2 + \lambda_5 + \lambda_1) & C_{21} &= 1 - (\mu_5 + \mu_3 + \mu_2 + \lambda_4 + \lambda_1) & C_{29} &= 1 - (\mu_5 + \mu_4 + \mu_2 + \mu_1 + \lambda_3) \\ C_6 &= 1 - (\mu_3 + \mu_2 + \lambda_4 + \lambda_1 + \lambda_5) & C_{14} &= 1 - (\mu_4 + \mu_2 + \mu_1 + \lambda_5 + \lambda_3) & C_{22} &= 1 - (\mu_5 + \mu_2 + \mu_1 + \lambda_4 + \lambda_3) & C_{30} &= 1 - (\mu_5 + \mu_2 + \mu_1 + \mu_3 + \lambda_4) \\ C_7 &= 1 - (\mu_2 + \mu_1 + \lambda_4 + \lambda_3 + \lambda_5) & C_{15} &= 1 - (\mu_2 + \mu_1 + \mu_3 + \lambda_5 + \lambda_4) & C_{23} &= 1 - (\mu_5 + \mu_4 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) & C_{31} &= 1 - (\mu_2 + \mu_1 + \mu_3 + \mu_4 + \lambda_5) \\ C_8 &= 1 - (\mu_4 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_5) & C_{16} &= 1 - (\mu_5 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) & C_{24} &= 1 - (\mu_5 + \mu_4 + \mu_1 + \lambda_3 + \lambda_2) \end{aligned}$$

Пример. Используя схему замещения (рис. 2) исходные данные, взятые из [5,6], представленные в табл. 1 и предлагаемую в работе методику расчетов взрывобезопасности выработок определить:

- расчетный уровень взрывобезопасности тупиковой выработки H_0 ;
- проверить точность предлагаемой методики расчетов, т.е. определить попадает ли расчетная интенсивность взрывов H_0 в доверительный интервал $I_{0,95} = [2,94 \cdot 10^{-4}; 7,74 \cdot 10^{-4}]$, полученный при обработке экспериментальных данных о случаях взрыва в тупиковых выработках угольных шахт Украины за период в 1988 - 1997 гг. [7].

Используя системы уравнений (2), (3), исходные данные табл. 1, схему рис. 2, с помощью ЭВМ определяем τ_m – среднее время до первого взрыва и σ_m – стандарт этого времени, для каждого из 20 минимальных взрывоопасных совмещений. Результаты расчетов заносим в Табл.2. Из анализа Табл.2 видно, что во всех случаях $\tau_m = \sigma_m$, следовательно для нахождения H_m воспользуемся формулой (7). Результаты расчета заносим в табл.2. Используя формулу (1), находим $H_0 = 6,79 \cdot 10^{-4}$ 1/год.

Полученный в результате расчетов уровень взрывобезопасности $6,79 \cdot 10^{-4}$ 1/год попадает в доверительный интервал, полученный при обработке статистического материала о взрывах за десять лет наблюдений.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета уровня взрывобезопасности тупиковых выработок угольных шахт.

Номер	Код опасного события	Параметр		Номер	Код опасного события	Параметр	
		\bar{d}_i	d_i			\bar{d}_i	d_i
1	$x_{0,11}$	341	1,1	13	$x_{2,8}$	340	6
2	$x_{0,12}$	305	6	14	$x_{2,1}$	326	$5,6 \cdot 10^{-5}$
3	$x_{0,13}$	210	6	15	$x_{2,2}$	2810	$2,8 \cdot 10^{-4}$
4	$x_{1,7}$	0,17	$2,8 \cdot 10^{-5}$	16	$x_{2,3}$	8250	0,017
5	$x_{1,9}$	350	6	17	$x_{2,4}$	136	$5,6 \cdot 10^{-5}$
6	$x_{1,8}$	168	6	18	$x_{2,5}$	810	6
7	$x_{1,1}$	475	$5,6 \cdot 10^{-5}$	19	$x_{2,6}$	178	6
8	$x_{1,2}$	738	$2,8 \cdot 10^{-4}$	20	$x_{3,1}$	325	$5,6 \cdot 10^{-5}$
9	$x_{1,3}$	5620	0,017	21	$x_{3,2}$	586	$2,8 \cdot 10^{-4}$
10	$x_{1,4}$	243	$5,6 \cdot 10^{-5}$	22	$x_{3,3}$	6200	0,017
11	$x_{1,5}$	536	6	23	$x_{3,4}$	171	$5,6 \cdot 10^{-5}$
12	$x_{1,6}$	1368	6	24	$x_{3,4}$	680	6
				25	$x_{0,10}$	238	6

Таблица 2 – Результат расчетов по минимальным взрывоопасным совмещениям

Номера минимальных взрывоопасных совмещений m	Результаты расчетов		
	τ , лет	σ , лет	H_0 , 1/год
1	$3,47 \cdot 10^3$	$3,47 \cdot 10^3$	$2,88 \cdot 10^{-4}$
2	$9,14 \cdot 10^5$	$9,14 \cdot 10^5$	$1,09 \cdot 10^{-6}$
3	$1,42 \cdot 10^6$	$1,42 \cdot 10^6$	$7,05 \cdot 10^{-7}$
4	$1,05 \cdot 10^7$	$1,05 \cdot 10^7$	$9,48 \cdot 10^{-8}$
5	$4,68 \cdot 10^5$	$4,68 \cdot 10^5$	$2,14 \cdot 10^{-6}$
6	$1,11 \cdot 10^5$	$1,11 \cdot 10^5$	$9,05 \cdot 10^{-6}$
7	$2,80 \cdot 10^5$	$2,80 \cdot 10^5$	$3,57 \cdot 10^{-6}$
8	$1,25 \cdot 10^6$	$1,25 \cdot 10^6$	$8,01 \cdot 10^{-7}$
9	$1,07 \cdot 10^7$	$1,07 \cdot 10^7$	$9,32 \cdot 10^{-8}$
10	$3,08 \cdot 10^7$	$3,08 \cdot 10^7$	$3,25 \cdot 10^{-8}$
11	$5,22 \cdot 10^5$	$5,22 \cdot 10^5$	$1,91 \cdot 10^{-6}$
12	$3,31 \cdot 10^5$	$3,31 \cdot 10^5$	$3,02 \cdot 10^{-6}$
13	$7,46 \cdot 10^4$	$7,46 \cdot 10^4$	$1,34 \cdot 10^{-5}$
14	$2,16 \cdot 10^4$	$2,16 \cdot 10^4$	$4,63 \cdot 10^{-5}$
15	$3,89 \cdot 10^4$	$3,89 \cdot 10^4$	$2,57 \cdot 10^{-5}$
16	$4,02 \cdot 10^5$	$4,02 \cdot 10^5$	$2,49 \cdot 10^{-6}$
17	$1,14 \cdot 10^4$	$1,14 \cdot 10^4$	$8,79 \cdot 10^{-5}$
18	$5,40 \cdot 10^3$	$5,40 \cdot 10^3$	$1,85 \cdot 10^{-4}$
19	$4,63 \cdot 10^5$	$4,63 \cdot 10^5$	$2,16 \cdot 10^{-6}$
20	$1,96 \cdot 10^5$	$1,96 \cdot 10^5$	$5,10 \cdot 10^{-6}$
Итого:	$1,47 \cdot 10^3$	–	$6,79 \cdot 10^{-4}$

Вывод.

1. Предложена методика оценки взрывобезопасности тупиковых выработок угольных шахт. Методика обладает необходимой точностью для прогнозирования взрывобезопасности выработок угольных шахт.
2. Предлагаемая методика может быть использована и для оценки взрывобезопасности любых технологических объектов, опасных в отношении взрыва: химические предприятия, атомные станции и др. При оценке взрывобезопасности других объектов методика не меняется, меняются лишь схемы замещения.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 12.1.010-76 Взрывобезопасность. Общие требования. – М.: Издательство стандартов. – 1976. – 6 с.
2. Ковалев П.Ф., Ковалев А.П., Сердюк Л.И. Методы расчета безопасности систем электроснабжения угольных шахт// Безопасность труда в промышленности 1980. - №2 - с. 47-48. – 1984. – №11. – с. 11-12.
3. Ковалев А.П. О проблемах оценки безопасности электротехнических объектов// Электричество, - 1991. - №8. - с. 50-55.
4. Г. Корн, Т. Корн Справочник по математике для научных работников и инженеров М., 1968г. 720 стр.
5. Ковалев П.Ф. Разработка и исследование средств и мер обеспечения безопасности применения электрической энергии в угольных шахтах: Доклад о содержании опубликованных работ и изобретений, представленных на соискание ученой степени доктора техн. наук. в соответствии с решением президиума ВАК. – М.: МГИ, 1974. – 86с.
6. Колесник Л.И. Взрывобезопасность эксплуатации электрооборудования добычных участков угольных шахт (математическая модель, методика расчетов, меры ее обеспечения) : Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. / МакНИИ. – Макеевка, 1988 – 19с.
7. В.П. Коптиков, А.П. Ковалев, А.В. Сливаковский Об уровне взрывобезопасности участков угольных шахт Украины. Взрывобезопасное электрооборудование: Сборник научных трудов УкрНИИВЭ. – Донецк 1998. с. 168-112.