

УДК 622.8.314.6

**В. П. КОЛОСЮК, д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, проф.,  
Г. Л. ФЕДОРЕНКО, аспирант, МакНИИ, г. Макеевка**

## **УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ШАХТНЫХ ГОЛОВНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ С ЛИТИЙ-ИОННЫМИ АККУМУЛЯТОРАМИ**

*Обоснована методология оценки условий обеспечения взрывобезопасности шахтных головных аккумуляторных светильников уровня РО.*

**Ключевые слова:** взрывобезопасность, опасное событие, опасное состояние, вероятность события, интенсивность отказов, наработка на отказ.

В настоящее время перспективным является применение для шахтных головных аккумуляторных светильников (светильников) литий-ионных аккумуляторов с более высокой удельной емкостью по сравнению со щелочными аккумуляторами, что позволяет снизить массу аккумуляторной батареи и увеличить длительность работы светильников [1]. Такие аккумуляторы выпускаются зарубежными фирмами и поставляются украинским изготовителям светильников по экспорту без раскрытия особенностей конструкции аккумуляторов. Однако известно, что при применении таких аккумуляторов могут возникать режимы значительного повышения температуры корпуса [2], что опасно для воспламенения окружающей взрывчатой метановоздушной среды в шахтах, опасных по газу или пыли.

При создании современных светильников перспективным является обеспечение особовзрывобезопасного уровня его взрывозащиты (РО), что требует дополнительных мер безопасности по сравнению с традиционными уровнями взрывозащиты светильников РП или РВ. Этим объясняется актуальность работы по обеспечению взрывобезопасности светильников с новыми аккумуляторами.

Целью работы является оценка эффективности и достаточности применяемых мер по обеспечению взрывозащищенности светильников для обеспечения уровня РО.

В качестве исходных данных для исследований принято, что батарея светильника выполняется с видом взрывозащиты «Взрывонепроницаемая оболочка», в электрической схеме применяется электронный блок, обеспечивающий вид взрывозащиты в нормальном режиме работы светильника «Искробезопасная электрическая цепь», а для защиты от токов

короткого замыкания (т. к. з), например, при к. з. в кабеле – применяется плавкий предохранитель и быстродействующее отключение токов к. з. электронным блоком светильника.

В качестве дополнительных мер предложено следующее.

1. Введение по разработанной методике входного контроля аккумуляторов для исключения заводского брака.

2. Для исключения режима «теплового разгона» и предотвращения повышения температуры корпуса батареи предложены дополнительные методы контроля заряда аккумуляторов перед выдачей светильников шахтерам.

3. Для исключения опасности ослабления контактов в аккумуляторной батарее и опасного искрения на ослабленных контактах предложено в конструкции батареи реализовать принципы защиты вида «е», предотвращающие ослабление контактов и разгерметизацию корпуса батареи и доступ к токоведущим частям взрывоопасной смеси при загазировании выработок.

4. Снабдить всех горнорабочих светильниками, совмещенными с сигнализаторами метана, которые обеспечат каждому рабочему сигнализацию о необходимости выхода из загазированной выработки и принятия мер безопасности.

5. В электронном блоке предложено реализовать контроль изоляции гибкого кабеля и прекращение питания в случае повреждения изоляции и возможного искрения по этой причине.

Опасность взрыва окружающей взрывоопасной среды рассмотрена как возникновение аварийного случайного события «Взрыв газа», происходящего при совпадении (совмещении) во времени событий «нахождение светильника во взрывоопасной среде» и «появление источника поджигания» от светильника. При этом используются принципы логического описания сложных событий с составлением «дерева» формирования аварийного события, в котором совмещение (пересечение) событий формализуется как их умножение (логическая операция – конъюнкция («и-и»)), а объединения событий – как их сумма (логическая операция – дизъюнкция «или-или»). Количественно каждое из событий оценивается вероятностью его возникновения.

При построении «дерева» использованы следующие обозначения:

а) опасных событий:

$S_B$  – взрыв газа;

$S_C$  – образование взрывчатой смеси, в которой находится светильник;

$S_{II}$  – образование опасного источника поджигания от светильника, находящегося во взрывчатой смеси;

$S_M$  – накопление метана в выработке;

$S_t$  – нагрев светильника до опасной температуры;

$S_{и}$  – возникновение опасного искрения от светильника;

б) опасных состояний:

X1 – накопление метана из-за ненормальной работы системы вентиляции, осуществляемой вентиляторами главного проветривания шахты (ВГП);

X2 – накопление метана из-за ненормальной работы системы вентиляции тупиковых выработок вентиляторами местного проветривания (ВМП);

X3 – накопление метана из-за нарушения вентиляционных сооружений (двери, кроссинги и т.п.);

X4 – накопление метана, вызванное ГДЯ (суфляр, выброс);

X5 – отказ системы автоматического контроля метана (АКМ);

X6 – отказ системы индивидуального контроля метана прибором, совмещенным со светильником (СМС);

X7 – дисциплинарные нарушения человека (не выход из загазированной зоны);

X8 – нагрев корпуса светильника из-за теплового разгона;

X9 – «пропуск» системы заряда светильника;

X10 – нагрев из-за заводского брака светильника;

X11 – «пропуск» при входном контроле светильника;

X12 – возникновение высокой температуры из-за механического повреждения светильника;

X13 – искрение на контактах батареи (ослабление контактов);

X14 – разгерметизация корпуса батареи и поступление взрывчатой смеси извне через разгерметизацию крышки батареи;

X15 – «пропуск» в конструкции светильника;

X16 – искрение при повреждении во внешних цепях (в кабеле);

X17 – отказ системы защиты от т. к. з.;

X18 – искрение из-за повреждения изоляции;

X19 – отказ системы контроля изоляции.

Аварийное событие «Взрыв газа» возникает при одновременном формировании события «нахождение светильника во взрывчатой среде» и события «возникновение источника поджигания от светильника». Формирование этих событий в свою очередь зависит от ряда других событий – опасных состояний, указанных выше. Опасные состояния (события) можно рассматривать как независимые, в том смысле, что появление одного из них не влияет на появление или не появление другого. Поэтому для анализа возникновения аварийного события «Взрыв газа» применимы методы теории вероятностей и математической логики, когда каждое событие (или состояние) может быть оценено вероятностью его появления, а одновре-

менное их совмещение (пересечение событий) как логическая операция «и – и», наступление же альтернативных событий – как логическая операция «или – или». При этом математически операция «и – и» записывается как «конъюнкция», состоящая в умножении вероятностей, характеризующих совместное пересечение событий, а операция «или – или» - как «дизъюнкция», состоящая в объединении, т. е. суммировании вероятностей событий или опасных состояний.

При такой методологии событие «Взрыв газа» от светильника до введения мероприятий по повышению взрывобезопасности ( $S'_B$ ) может быть представлено в виде дерева формирования этого события (рис. 1), а при введении дополнительных мероприятий ( $S_B$ ) – в виде дерева (рис. 2).

В соответствии с рис. 1 логическая модель аварийного события «Взрыв газа» ( $S'_B$ ) согласно принципам алгебры логики будет:

$$S'_B = [(X1 \vee X2 \vee X3 \vee X4) \wedge (X5 \wedge X7)] \wedge [(X8 \vee X10 \vee X12) \vee (X13 \vee X14) \wedge (X16 \wedge X18)], \quad (1)$$

в соответствии с рис. 2 логическая модель аварийного события «Взрыв газа» при применении дополнительных мер по повышению взрывобезопасности ( $S_B$ ) имеет вид:

$$S_B = [X1 \vee X2 \vee X3 \vee X4) \wedge (X5 \wedge X6 \wedge X7)] \wedge \{ [(X8 \wedge X9) \vee (X10 \wedge X11) \vee [(X12) \vee [(X13 \wedge X14 \wedge X15) \vee (X16 \wedge X17) \wedge (X18 \wedge X19)]]], \quad (2)$$

где  $\wedge$  – конъюнкция – логическое умножение (пересечение событий);

$\vee$  – дизъюнкция – логическое суммирование (объединение событий).

Выражая каждое из событий вероятностью их наступления, получим математическую модель (вероятность) аварийного событий «Взрыв газа»:

1. В случае до введения дополнительных мероприятий по повышению взрывобезопасности

$$Q'_B = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) \times Q_5 \times Q_7 \times [(Q_8 + Q_{10} + Q_{12}) + Q_{13} \times Q_{14} + Q_{16} + Q_{18}] \quad (3)$$

2. В случае применения дополнительных мероприятий по повышению взрывобезопасности:

$$Q_B = [(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) \times Q_5 \times Q_6 \times Q_7] \times [Q_8 \times Q_9 + (Q_{10} \times Q_{11}) + Q_{12}] \times [(Q_{13} \times Q_{14} \times Q_{15}) + (Q_{16} \times Q_{17}) + (Q_{18} \times Q_{19})], \quad (4)$$

где  $Q_1 \div Q_{19}$  – вероятности событий  $X_1 \div X_{19}$

Рассматривая возникновение взрывов и опасных состояний как поток во времени случайных событий, можно показать, что такой поток является стационарным пуассоновским, как это доказано, например, в работе [5].

При таком подходе вероятность того, что на участке времени  $\Delta t$  появится какое-то событие, можно записать в виде выражения:

$$Q_{\Delta t} = 1 - e^{-\lambda \Delta t}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – интенсивность потока, определяемая как среднее число событий в единицу времени.

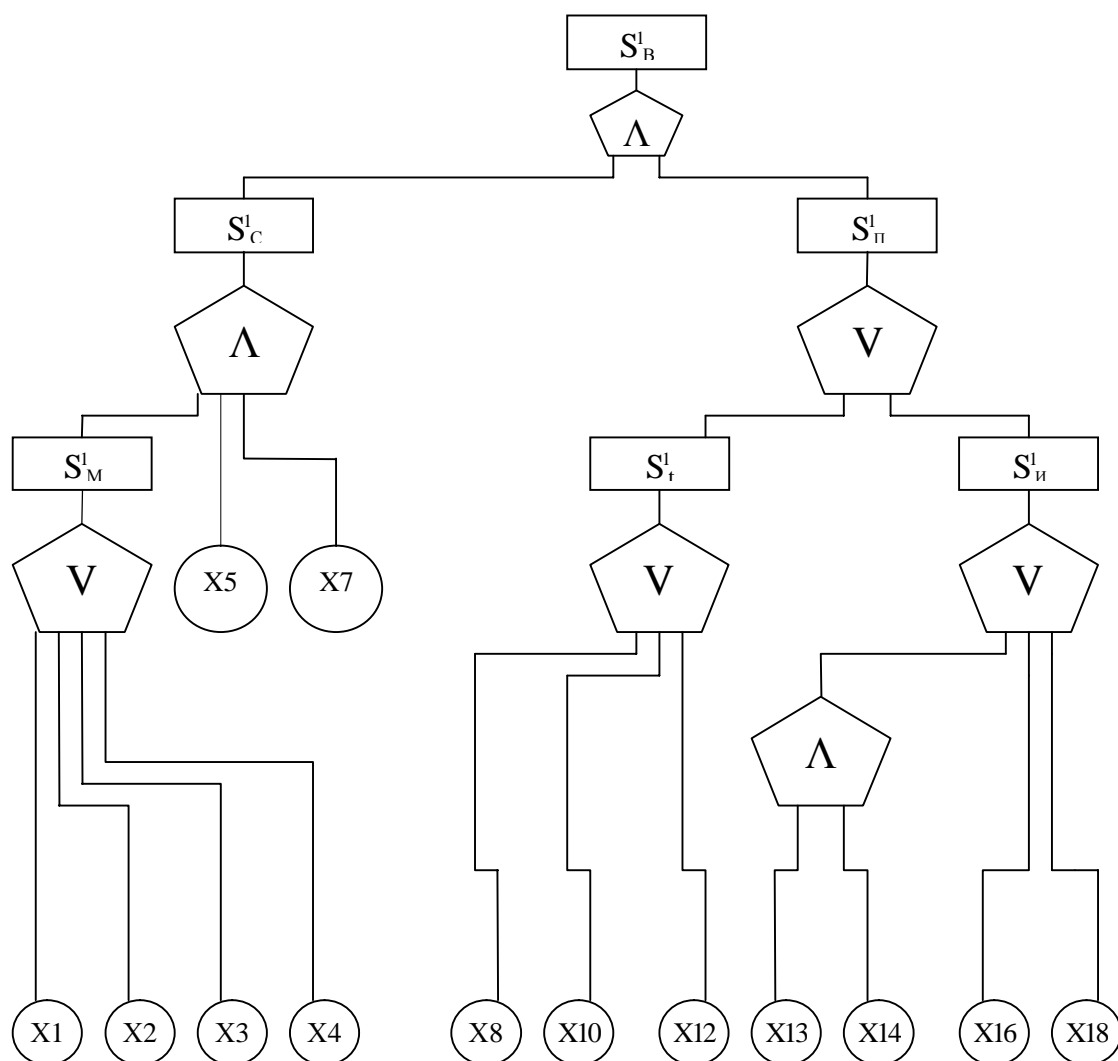


Рис. 1. Дерево формирования аварийного события «Взрыв газа»  
(до применения мероприятий по повышению взрывобезопасности)

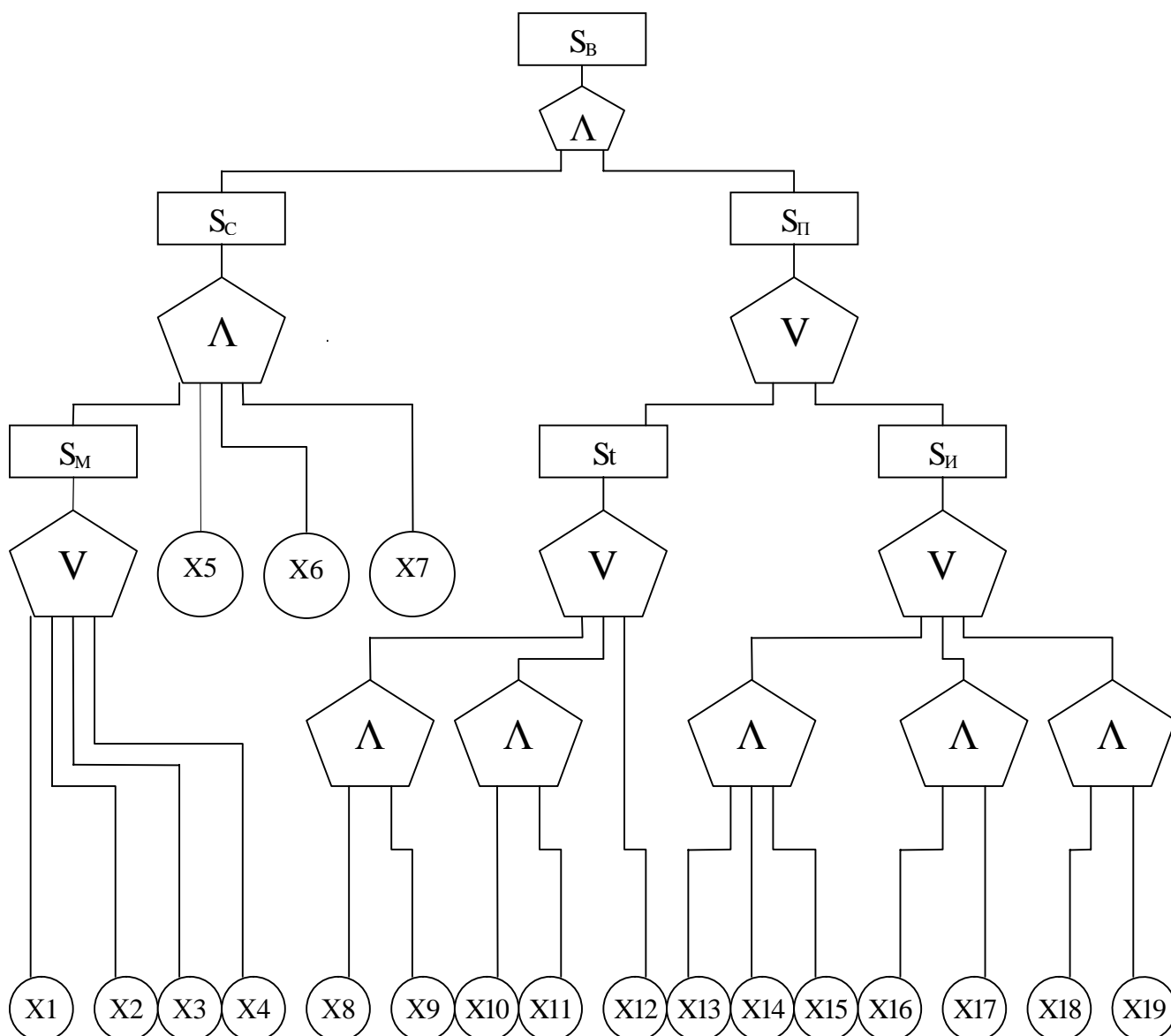


Рис. 2. Дерево формирования аварийного события «Взрыв газа»  
(при реализации рекомендованных мероприятий по повышению взрывобезопасности)

Для практического пользования при разложении в ряд  $e^{-\lambda\Delta t}$  величинами высшего порядка малости можно пренебречь, поэтому:

$$Q_{\Delta t} = \lambda\Delta t. \quad (6)$$

Вероятности событий в выражениях 3, 4 могут быть определены по формулам:

$$Q = \lambda \cdot \Delta t \text{ или } Q = \frac{\Delta t}{T}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – интенсивность потока опасного события или состояния, 1/ч;

$\Delta t$  – промежуток времени, на который определяется вероятность, ч;

$T$  – среднее время пребывания элемента (события) в безопасном состоянии или средняя наработка на отказ (технического средства), ч.

В настоящее время для определения вероятностей опасных состояний можно воспользоваться следующими данными:

1) Рекомендованными нормированными данными показателей опасных состояний, обоснованных с помощью ЭВМ методом перебора вариантов, для определения средних значений опасного и безопасного состояний. При этом вероятность взрыва в год на взрывоопасном участке будет не более нормированного ГОСТ значения  $10^{-6}$  [4].

2) Нормированными значениями наработки на отказ технических средств, согласно ГОСТ или ТУ на изделия.

3) Используя для определения вероятностей аналогию с известными подобными состояниями для опасных состояний, не указанных в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Нормированные данные опасных состояний [3, 4]

Наименование опасных состояний	Среднее время пребывания в безопасном состоянии (ч) в зависимости от условий эксплуатации				Среднее время пребывания в безопасном состоянии, принимаемое для расчета, ч
	очистной забой	тупиковая выработка	вентиляционная выработка	выработка со свежей струей воздуха	
1	2	3	4	5	6
Отключаемое к.з. в электрооборудовании	3500	5100	3100	2600	2600
Отключаемое однофазное к.з. в электрооборудовании	3500	20000	20000	15000	3500
Ослабление контактов и искрение на контактах	1400	2600	2600	2600	1400
Отказ взрывозащиты оболочки с неискрящими частями	2600	2600	2600	2600	2600
Оголение жил кабеля	2200	4400	4400	4400	4400

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
Появление взрывчатой концентрации	10000	1000	10000	10000	1000
Отказ системы автоматического контроля метана (АКМ)	10000	10000	10000	10000	10000

Таблица 2

Нормированная наработка на отказ аппаратуры по ГОСТ или ТУ

Наименование аппаратуры	Нормируемая наработка на отказ, ч	Источник данных
Аппаратура автоматического контроля метана (АКМ)	10000	ГОСТ 24032
Сигнализатор метана, совмещенный с шахтным головным аккумуляторным светильником (СМС)	14000	[4 ]
Аппаратура защиты от утечек тока	10000	ГОСТ 22929
Система защиты от т. к. з.	2352	[3 ]

Так для оценки показателей «пропуск» системы входного контроля (состояние X11), системы заряда светильника (состояние X9) и защиты вида «е» (состояние X15) по аналогии с «пропуском» электрического аппарата [5], вероятность этих состояний в течение месяца (т. е. 720 часов) оценивается на уровне вероятности «пропуска» электрических аппаратов. Для системы контроля изоляции (состояние X19) по аналогии с аппаратурой защиты от утечек тока (которая также осуществляет контроль изоляции) можно принять наработку на отказ на уровне 10000 часов.

Состояние X7 (функциональное нарушение дисциплины человека) можно определить следующим образом. В [6] приведены данные по вероятностям физиологического и психологического отказов человека, соответственно  $P_{\Phi}=0,208$  и  $P_{\Pi}=0,408$  в течение месяца. Рассматривая событие «отказ человека» как сумму указанных двух событий, вероятность события «отказ человека» будет  $Q_7 = 0,616$  на 720 часов.

Интенсивность отказов ( $\lambda$ ) или наработку на отказ (Т) человека (состояние X7) определяют из выражений (3):

$$\lambda = \frac{Q_7}{\Delta t} = \frac{0,616}{720} = 0,00086 \text{ 1/ч;}$$



$$T = \frac{\Delta t}{Q_7} = \frac{720}{0,616} = 1169 \text{ ч.}$$

С учетом вышеприведенных обоснований расчетные характеристики опасных состояний как событий, формирующих аварийное событие «взрыв газа», приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Характеристики опасных состояний как событий

Наименование опасных состояний	Параметры опасных состояний		
	Среднее время наступления опасного состояния (Т), ч	Вероятности наступления опасного состояния как события	
		на 720 часов	на 10 часов
1	2	3	4
Отказ системы АГК ( X5)	10000	0,072	0,001
Отказ системы СМС (X6)	14000	0,052	0,00072
Дисциплинарные нарушения человека (X7)	не определялось	0,616	0,0086
Нагрев корпуса светильника из-за теплового разгона (X8)	10000	0,072	0,001
«Пропуск» системы заряда светильника (X9)	не определялось	0,158	0,0022
Нагрев корпуса из-за заводского брака светильника (X10)	не определялось	0,072	0,001
«Пропуск» при входном контроле светильника (X11)	не определялось	0,158	0,0022
Высокая температура корпуса из-за механических повреждений (X12)	10000	0,072	0,001
Искрение на ослабленных контактах батареи (X13)	1400	0,514	0,00714
Разгерметизация корпуса батареи (X14)	2600	0,277	0,00385
«Пропуск» в конструкции защиты «е» (X15)		0,158	0,0022
Искрение при повреждении кабеля (X16)	4400	0,164	0,0023
Отказ системы защиты от т.к.з. светильника (X17)	2352	0,306	0,00425

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4
Искрение из-за повреждения изоляции (X18)	1500	0,48	0,0067
Отказ системы контроля изоляции (X19)	10000	0,072	0,001
Появление взрывчатой концентрации метана ( $S_M$ )	10000	0,072	0,001
Нагрев светильника до опасной температуры ( $S_t$ )	не определялось	0,094752	0,001316
Возникновение опасного искрения ( $S_{и}$ )	не определялось	0,2232	0,02232
Образование опасного источника ( $S_{п}$ )	не определялось	0,317952	0,0318
Взрыв газа ( $S_B$ )	не определялось	0,0229	0,00229

Если известна наработка на отказ или среднее время наступления опасного состояния, то вероятность события определяется по выражению (7).

Если известна вероятность опасного события на месяц (720 часов), то вероятность на другой промежуток времени пересчитывается по выражению:

$$Q = \frac{Q_{720}}{720} \cdot \Delta t, \quad (8)$$

где  $\Delta t$  – промежуток времени, на длительность которого пересчитывается вероятность, ч.

Как известно, при оценке надежности технических средств вероятность безотказной работы рассчитывается на 720 часов. При оценке вероятности события «Взрыв газа» от светильника вероятность этого события можно, кроме того, определять на период  $\Delta t = 10$  часов, что соответствует длительности времени использования светильника в шахте в течение суток.

Рассматривая рис. 1, 2 видно, что вероятность события  $S_M$  формируется одинаково как в случае, когда не применяются дополнительные меры по повышению взрывобезопасности, так и в случае, когда применены указанные меры безопасности. Однако вероятности опасных событий будут разными.

Поэтому вероятность этого события, т. е. вероятность образования опасной концентрации метана, будет выше для случая, когда не применяются дополнительные меры:

$$Q_M = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4. \quad (9)$$

Поскольку в данной работе не ставилась цель исследования вероятности загазирования, для сравнительной оценки примем  $Q_M = 0,348 \cdot 10^{-3}$  как вероятности загазирования подготовительных выработок по данным, приведенным в [3], а детальнее рассмотрим значимость и влияние вероятностей опасных состояний на формирование возможных источников поджигания взрывчатой смеси от светильника, в котором еще не применены дополнительные меры взрывобезопасности.

Вероятность формирования события  $S'_t$  – нагрева светильника до опасной температуры будет:

$$Q_t = Q_8 + Q_{10} + Q_{12} . \quad (10)$$

При подстановке вероятностей на отрезке времени  $\Delta t = 10$  ч  $Q_8 = 0,001$ ,  $Q_{10} = 0,001$ ,  $Q_{12} = 0,001$  получим  $Q'_t = 0,003$ .

Вероятность формирования события  $S'_И$  – опасного искрения в системе светильника будет:

$$Q_{И} = Q_{13} \cdot Q_{14} + Q_{16} \cdot Q_{17} . \quad (11)$$

С учетом величин вероятностей  $Q_{13} = 0,00714$ ,  $Q_{14} = 0,00385$ ,  $Q_{16} = 0,0023$  и  $Q_{17} = 0,00425$  получим  $Q'_{И} = 0,0000373$ .

Сравнение вероятностей  $Q'_t$  и  $Q'_{И}$  показывает, что вероятность нагрева светильника до опасной температуры, способной воспламенить взрывчатую метановоздушную смесь, на несколько порядков выше, чем вероятность опасного искрения.

Поэтому среди мер по повышению взрывобезопасности больший приоритет следует отдать мерам по снижению вероятности опасного нагрева светильника. Этот вопрос следует рассмотреть теоретически, исходя из физических основ функционирования аккумулятора и всей аккумуляторной батареи светильника.

При оценке уровня взрывобезопасности светильника для решения вопроса о возможности его допуска в шахту уполномоченной испытательной организацией можно предложить следующий критерий: оценочная вероятность возникновения воспламеняющего источника должна быть не выше  $10^{-6}$ .

Обоснованием этого может быть аналогия с испытанием искробезопасных цепей рудничного особовзрывобезопасного рудничного электрооборудования (РО). Искробезопасная цепь такого электрооборудования проверяется путем определения вероятности воспламенения искрения в заведомо созданной наиболее взрывчатой метановоздушной смеси, причем оценочная вероятность воспламенения должна в этом случае быть не выше  $10^{-6}$ .

Такое условие для светильника можно выразить следующим образом: вероятность возникновения источника поджигания от светильника с учетом всех дополнительных мероприятий ( $Q_{II}$ ) не должна превышать  $10^{-6}$ .

На этом основании можно записать:

$$Q_{II} = (Q_8 \cdot Q_9 + Q_{10} \cdot Q_{11} + Q_{12}) + (Q_{13} \cdot Q_{14} \cdot Q_{15} + Q_{16} \cdot Q_{17}) \leq 10^{-6}. \quad (12)$$

С другой стороны эффективность дополнительных мероприятий можно оценить по снижению при их реализации первоначальной вероятности  $Q'_{II}$ :

$$Q_{II} = \frac{Q'_{II}}{K}, \quad (13)$$

где  $K$  – коэффициент снижения вероятности возникновения поджигающего источника от светильника, показывающий во сколько раз необходимо уменьшить вероятность искрения, чтобы результирующая вероятность была не выше  $10^{-6}$ .

Величина коэффициента  $K$  определяется как отношение:

$$K \geq \frac{Q'_{II}}{10^{-6}}. \quad (14)$$

При существующем уровне техники (без дополнительных мероприятий) вероятность появления поджигающего источника от светильника будет:

$$Q'_{II} = (Q_8 + Q_{10} + Q_{12}) + (Q_{13} \cdot Q_{14} + Q_{16} \cdot Q_{17}). \quad (15)$$

При подстановке вероятностей из табл. 3 получим:

$$Q'_{II} = 0,001 + 0,001 + 0,001 + 0,00714 \cdot 0,00385 + 0,0023 \cdot 0,00425 = \\ = 0,0030373 = 3,0373 \cdot 10^{-3}$$

Отсюда следует, что в настоящее время вероятность поджигающего источника от светильника во много раз превышает величину  $10^{-6}$ , что свидетельствует об актуальности мер по снижению этой вероятности при новых разработках светильников.

Возможность этого обосновывается следующими дополнительными мерами:

1. Введение входного контроля аккумуляторов позволит исключить применение в светильнике дефектных аккумуляторов и, следовательно, опасность нагрева батареи из-за заводского брака. В этом случае появление события ( $X_{10}$ ) будет возможным только при «пропуске», т. е. отказе системы входного контроля – событие ( $X_{11}$ ). А вероятность такого события определяется пересечением событий ( $X_{10}$ ) и ( $X_{11}$ ), т. е. произведением их вероятностей ( $Q_{10}$ ) и ( $Q_{11}$ ).

2. Введение дополнительных мер в методику заряда аккумуляторной батареи направлено на предотвращение теплового разгона при использовании светильника в шахте. Поэтому аналогично нагрев батареи из-за теплового разгона (событие  $X_8$ ) возможен лишь в случае «пропуска», т. е. от-

каза системы заряда ( $X_9$ ) и вероятность опасного нагрева батареи определится как произведение вероятностей ( $Q_8$ ) и ( $Q_9$ ).

3. Введение дополнительных мер на основе принципов защиты вида «е» в соответствии с ГОСТ направлено на исключение искрения в системе светильника при нормальной его работе, что возможно путем совершенствования контактной системы батареи и присоединяемого к ней гибкого кабеля, чтобы исключить нарушение контакта и искрение на контакте, а также предотвращения разгерметизации батареи и доступа к токоведущим ее частям окружающей среды, которая при загазировании выработок может быть взрывоопасной. Это может быть реализовано также путем конструктивных мер герметизации, например, заливкой места соединения компаундом. А предотвращение механического повреждения аккумуляторной батареи при эксплуатации в шахте может быть предотвращено соответствующими мерами усиления конструкции методами защиты вида «е».

Поэтому вероятность появления источника от батареи будет определяться как произведение вероятности повреждения ( $Q_{12}$ ) и вероятности отказа конструктивных мер ( $Q_{13}$ ), т. е. защиты вида «е», а вероятность искрения как произведение вероятности нарушения герметизации батареи  $Q_{13}$  и вероятности отказа защиты вида «е» ( $Q_{15}$ ).

4. Важное значение приобретает оснащение всех горнорабочих сигнализаторами метана, функционально и конструктивно совмещенным со светильником, т. к. при появлении метана это позволит сигнализировать рабочему об опасности окружающей среды и будет побуждать рабочего выйти из опасной зоны на свежую струю и принять другие меры по предотвращению опасности взрыва. При этом можно считать, что нахождение светильника в опасной среде определяется как произведение вероятности загазирования и вероятности отказа системы предупреждения человеком.

5. Введение в электронном блоке искрозащиты функции контроля изоляции позволит заблаговременно отключить напряжение с кабеля и тем самым предотвращать искрение в случае повреждения изоляции кабеля, предупреждая к. з. и вызванное им искрообразование. При этом можно считать, что вероятность искрения будет определяться как произведение вероятности повреждения кабеля ( $Q_{17}$ ) и вероятности отказа защиты от к. з. ( $Q_{18}$ ) и электронного блока контроля изоляции ( $Q_{19}$ ).

Очевидно, что рассмотренные дополнительные мероприятия направлены на повышение взрывобезопасности светильника.

При реализации этих мероприятий обеспечивается снижение вероятности появления опасного источника поджигания взрывоопасной среды и в конечном счете – вероятности возникновения аварийного события «Взрыв метана от светильника».

Рассмотрим детальнее этот вопрос по аналогии с рассмотренным случаем, когда дополнительные меры еще не были введены.

В соответствии с рис. 2 вероятность формирования события  $S_t$  – нагрева светильника до опасной температуры при введении входного контроля аккумуляторных батарей, регламентирующих мероприятий по ее зарядке и усилении конструкции корпуса с использованием принципов защиты вида «е» будет:

$$Q_t = Q_8 \cdot Q_9 + Q_{10} \cdot Q_{11} + Q_{12} \cdot Q_{15}. \quad (16)$$

Подставляя значения вероятностей  $Q_8$ ,  $Q_{10}$  и  $Q_{15}$ , получим

$$Q_t = 0,001 \cdot 0,0022 + 0,001 \cdot 0,0022 + 0,001 \cdot 0,0022 = 0,0000066 = 6,6 \cdot 10^{-6}.$$

Это означает, что дополнительные мероприятия обеспечивают снижение вероятности опасной температуры на 3 порядка.

Вероятность формирования события  $S_{II}$  – опасного искрения в системе светильника при введении дополнительных мероприятий по предотвращению искрения на контактах батареи, предотвращению разгерметизации и доступа среды к таким контактам, введению функции контроля изоляции будет:

$$Q_{II} = Q_{13} \cdot Q_{14} \cdot Q_{15} + Q_{16} \cdot Q_{17} + Q_{18} \cdot Q_{19}. \quad (17)$$

Подставляя значения вероятностей из табл. 3 и произведя вычисления получим:

$$Q_{II} = 0,00714 \cdot 0,00385 \cdot 0,0022 = 0,6048 \cdot 10^{-7}.$$

Таким образом, при введении дополнительных мероприятий вероятность опасного искрения уменьшается на несколько порядков.

Определяя вероятность появления поджигающего источника как сумму вероятностей опасного нагрева и опасного искрения, получим:

$$Q_{II} = Q_t + Q_{II} = 6 \cdot 10^{-6} + 0,6 \cdot 10^{-7} = 6 \cdot 10^{-6}$$

Выполненный анализ показал, что при введении дополнительных мероприятий можно снизить вероятность появления опасного источника поджигания взрывоопасной смеси практически до уровня нормируемой вероятности взрыва  $10^{-6}$  на взрывоопасном участке шахты.

Реализация функции контроля концентрации метана путем введения в систему светильника сигнализатора метана и оснащение ими всех горнорабочих позволяет снизить вероятность нахождения светильника в опасной среде [6].

Вероятность этого события ( $S_C$ ) можно определить на основании рис. 2 по выражению:

$$Q_C = Q_M \cdot Q_5 \cdot Q_6 \cdot Q_7. \quad (18)$$

Подставляя вероятности, входящие в приведенное выражение, получим:

$$Q_C = 0,348 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 7,2 \cdot 10^{-3} \cdot 8,6 \cdot 10^{-3} = 21,55 \cdot 10^{-9} = 2,155 \cdot 10^{-8}.$$

Вероятность события «Взрыв газа» определяется как произведение вероятностей ( $Q_{\Pi}$ ) и ( $Q_C$ ), т. е.:

$$Q_B = Q_{\Pi} \cdot Q_C . \quad (19)$$

С учетом полученных значений ( $Q_{\Pi}$ ) и ( $Q_C$ ) можно видеть, что при введении рассмотренных выше мероприятий вероятность взрыва от одного светильника в течение 10 часов невелика и на много меньше, чем величина  $10^{-6}$ .

Однако при оценке реальной взрывобезопасности в шахте необходимо иметь в виду, что в шахте одновременно находится много рабочих и, следовательно, большое количество светильников, что приводит к увеличению вероятности и потенциальной опасности взрыва метана. Кроме этого необходимо учитывать, что нормируется вероятность взрыва ( $10^{-6}$ ) в течение года на одном любом взрывоопасном участке, причем интегрально от всех возможных источников и объектов. Поэтому необходимо считать оправданным всемерное снижение вероятности взрывов.

## ВЫВОДЫ

1. Обоснована методология оценки взрывобезопасности шахтных головных аккумуляторных светильников и предложены имитационные модели взрывоопасных событий, а также математические модели возникновения взрыва от светильников, включающие опасные состояния среды, опасного нагрева и искрения, а также психологического и физиологического отказа человека.

2. Доказано, что в формировании опасного источника поджигания взрывоопасной среды приоритетное значение имеют процессы, приводящие к опасному нагреву корпуса аккумуляторной батареи, поэтому для раскрытия и оценки их особенности необходимо проведение специальных исследований.

3. Дана оценка предложенным дополнительным мероприятиям по повышению взрывобезопасности светильников: входного контроля батарей, специального регламента их заряда, использования в конструкции светильника принципов защиты вида «е», введение в электронный блок искрозащиты функции контроля изоляции и оснащение светильника блоком сигнализатора метана, совмещенным со светильником, и показано, что эти меры позволяют снизить вероятность появления опасного источника и вероятность взрыва при эксплуатации в шахтах, опасных по газу, до практически приемлемого уровня риска.

4. Предложен и обоснован критерий оценки светильника по условиям взрывобезопасности, состоящий в том, что его конструкция и средства защиты должны обеспечивать снижение вероятности возникновения поджи-

гающего источника от температурного нагрева и возможного искрения при всех возможных нормальных и аварийных режимах не выше уровня  $10^{-6}$  в течение 10 часов работы в шахте.

5. Полученные результаты рекомендуются для использования организациям – разработчикам и лицам, занимающимся созданием, изготовлением и испытаниями шахтных головных аккумуляторных светильников с особовзрывобезопасным уровнем взрывозащиты (РО).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоренко Г. Л. Пределы температурной устойчивости аккумуляторных батарей в шахтных головных аккумуляторных светильниках / Г. Л. Федоренко, З. М. Йохельсон // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. /МакНИИ. – Макеевка: МакНИИ, 2008. – №2(22). – С. 126 – 131.
2. Галушкина Н. Н. Исследование процесса теплового разгона в никель-кадмиевых аккумуляторах / Н. Н. Галушкина, Н. Е. Галушкин. – М.: Электрохимическая энергетика, 2005. – № 1. – С. 40 – 42.
3. Ткачук С. П. Взрывопожаробезопасность горного оборудования / Ткачук С. П., Колосюк В. П., Ихно С. А. – К.: Основа, 2000. – 695 с.
4. Колесник Л. И. Взрывобезопасность эксплуатации электрооборудования добычных участков угольных шахт (математическая модель, методика расчета, меры ее обеспечения) : автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.26.01 «Техника безопасности и противопожарная техника (промышленность)» – / Л. И. Колесник. – Макеевка-Донбасс, 1988. – 19 с.
5. Колосюк В. П. Техника безопасности при эксплуатации рудничных электроустановок / В. П. Колосюк. – М. : Недра, 1987. – 407 с.
6. Брюханов А. М. Развитие теории и совершенствование практики предупреждения и локализации взрывов в глубоких шахтах : автореф. дис. на соискание учен. степени д-ра техн. наук : спец. 05.26.01 «Охрана труда» / А. М. Брюханов. – Днепропетровск, 2007. – 36 с.

Получено: 15.12.10 г.



*Обґрунтовано методологію оцінки умов по забезпеченню вибухобезпеки шахтних головних акумуляторних світильників рівня RO.*

**Ключові слова:** вибухобезпека, небезпечна подія, небезпечний стан, імовірність події, інтенсивність відмов, напрацювання на відмову.

*The methodology of conditions estimation of explosion maintenance safety mine leading storage fixtures of level RO is proved.*

**Key words:** explosion safety, threat, dangerous condition, probability of event, failure rate, mean-time-between-failures.