

**К ОЦЕНКЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА  
ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ АППАРАТУРЫ МОБИЛЬНЫХ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМНЫХ  
КОМПЛЕКСОВ**

Викладено питання оцінювання чинників, що впливають на вибухонебезпечність апаратури мобільних інформаційно-вимірювальних системних комплексів в умовах газонасиченості гірського масиву на підставі останніх наукових досягнень та вимог безпеки.

**TO THE EVALUATION FACTORS OF EXPLOSION HAZARD OF  
EQUIPMENT OF MOBILE INFORMATION-AND- MEASURING  
SYSTEMS COMPLEXES**

The article is dedicated to the evaluation factors of explosion hazard of equipment of mobile information-and-measuring systems complexes, when coal mining in gas-saturated rock mass on the base of the last scientific achievements and safety requirements.

В настоящее время уже ни у кого не вызывает сомнения, что наиболее эффективным и экономически оправданным видом взрывозащиты является искробезопасное исполнение, основанное на том, что электрические разряды малой энергии оказываются неспособными воспламенить взрывчатую смесь. Однако, несмотря на успешное решение ряда актуальных практических вопросов, связанных с искробезопасностью в угольной промышленности, до настоящего времени не создана однозначная и ясная теория и математическая модель процесса зажигания взрывоопасной смеси, которая позволила бы на стадии проектирования взрывобезопасного мобильного информационно-измерительного системного комплекса (МИИСК) выявить, какие факторы существенно влияют на формирование очага воспламенения взрывоопасной шахтной смеси (ВШС). Процесс воспламенения ВШС от электрической энергии весьма сложен. Электрический разряд (ток) является как высокотемпературным источником нагревания, так и ионизатором среды. Существует две теории воспламенения ВШС: тепловая и ионная. В нормальных шахтных условиях при атмосферном давлении преобладает тепловое действие электрического разряда, а ионизация является следствием. На практике случай теплового воспламенения ВШС в рудничной атмосфере угольной шахты наиболее распространен.

Тепловая модель воспламенения ВШС от электрического разряда впервые была сделана Тейлор-Джонсом и Морганом [1, 2] на основе анализа распространения температурной волны от некоторого источника тепла в инертной среде. Электрический разряд в этой модели считается нагретым телом, температура которого значительно превышает температуру воспламенения ВШС. Как известно, температура воспламенения метано-воздушной смеси равна 650-750°C, а температура электрических разрядов превышает 5000°C. Это позволило исключить из рассмотрения температуру источника воспламенения и принимать во внимание энергию электрического разряда и длительность его подвода к

ВШС. Температура в точке пространства в этой модели определяется из классического уравнения нестационарной теплопроводности (уравнение Фурье).

Тепловая модель воспламенения ВШС не учитывает цепного характера отдельных актов химического взаимодействия и энергии активизации молекул при образовании активных центров. Она основана на постулировании некоторого суммарного условия воспламенения во всей массе взрывчатой смеси при нагревании ее электрическим разрядом [2]. Несмотря на вышеуказанные недостатки, модель позволяет установить связь граничных параметров электрического разряда (его энергии и длительности) с фактором воспламенения.

Неучет теплотворной способности нагреваемой среды и условий распространения пламени не дает возможности оценить величину минимальной энергии, достаточной для воспламенения, даже в простейшем случае ее передачи ВШС. Для непрерывного горения необходимо, чтобы на единице поверхности "сферы пламени" [2] производилось количество тепла, достаточное для нагревания следующего слоя определенной толщины до температуры, при которой значительно возрастает скорость реакции. При уменьшении радиуса удельное количество тепла, необходимое для поддержания горения, возрастает. Ясно, что только начиная с некоторого размера пламени внутренняя теплота реакции позволяет ему распространяться самостоятельно. До этих минимально достаточных размеров пламя может поддерживаться только за счет дополнительных поступлений электрической энергии. Поэтому модель дает только сравнительную оценку воспламеняющей способности источников.

Удачную наглядную тепловую модель, учитывающую условия перехода от развивающегося к стационарному пламени, простым и оригинальным приемом разработал Я.Б. Зельдович [3]. Решение Я.Б. Зельдовичем задачи воспламенения ВШС от точечного электрического разряда достигнуто ценой упрощений, которые не привели к искажению физического содержания процесса и в основном сохранили количественную его сторону. При распространении "ламинарного пламени" [2] химическая реакция протекает в узкой зоне температур вблизи температуры горения. Я.Б. Зельдович из логических рассуждений определил примерную величину минимального ядра пламени, способного к распространению.

Существующие на сегодняшний день теории и модели процесса поджига ВШС решают задачи в узкой постановке и не могут быть использованы для общего шахтного случая. Например, решение задачи отыскания минимальной энергии воспламеняющего источника требует учета теплотворной способности ВШС и скорости протекания химической реакции в зависимости от температуры и ряда других факторов, т. е. представляет серьезную научную проблему. Эта задача до сих пор не имеет точного решения. Попытку получить приближенное решение этой задачи делали, в частности, Я.Б. Зельдович [3], Б. Льюс и Г. Эльбе [4] и многие другие, указавшие на большие трудности точного решения, связанные с незнанием параметров, определяющих распространения волны горения. Радиус сферического объема ВШС, первоначально нагреваемого электрическим разрядом до температуры горения, должен быть большим, чем ширина фронта ламинарного пламени для данной ВШС, - в этом случае горение

в локальном объеме перерастает во взрыв. Основываясь на тепловой теории распространения ламинарного пламени, Я.Б. Зельдович нашел условия поджигания ВШС от электрического разряда в зависимости от комплекса физико-химических свойств ВШС, находящих свое отражение в коэффициенте температуропроводности и нормальной скорости распространения пламени. Отношение этих величин определяет другую характерную для каждой среды величину – ширину фронта ламинарного пламени, способного к самораспространению. Отсюда вытекает, что для воспламенения ВШС электрическим разрядом необходимо, чтобы выделенное разрядом тепло нагревало до температуры горения сферический объем, равный минимальному "ядру пламени" [2], способному к самораспространению. Этот вывод справедлив для разрядов любой длительности при отсутствии теплоотводящего действия электродов, между которыми этот разряд возникает. Из этого приведенного выше положения вытекает **энергетическая концепция оценки воспламеняющей способности электрических разрядов**, ставшая основой современной теории искробезопасности электрических цепей.

В теоретических исследованиях [5, 6], рассматривая задачу о размыкании электродов искрообразующего механизма, столб разряда предполагают в виде цилиндрической трубки. При этом пренебрегают механической инерцией плазмы в радиальном направлении.

В последних исследованиях МакНИИ [10] учитываются параметры искрообразующего механизма и объемная удельная мощность искрового разряда, однако упрощается задача, полагая, что столб электрического разряда - цилиндрическая трубка имеющая ось и плоскость симметрии, перпендикулярную этой оси, т.е. задача ограничивается одним квадрантом плоскости моделирования. Используя для разработки модели классическое дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат, и учитывая симметрию, можно получить двумерную задачу. Её решают, используя «экономичную» локально-одномерную схему с расщеплением по отдельным направлениям с применением нелинейной разностной схемы [8]. Однако, как известно, в процессе развития пламени изменяется температура ВШС. Поэтому для упрощения решения поставленной задачи ВШС рассматривают как идеальный газ, т.е. для которого отношение произведения давления и объема к температуре есть величина постоянная. Чтобы несколько увеличить точность расчетов, вводится, согласно работе [9], «относительная объемная концентрация» одного из реагирующих компонентов. Температуру пламени, характеризующую опасный и безопасный процессы искрообразования, просчитывают с использованием рассмотренных моделей. Начальные размеры очага воспламенения и его температуру определяют по методике, приведенной в работе [10], на основе модифицированного метода «источников». При оценке изменения агрессивности электрического разряда под действием электродов рассматривалось влияние их диаметра и длины межконтактного промежутка на энергию зажигания. Потенциальная опасность заданных параметров разряда наглядно иллюстрировалась характером возникновения устойчивого фронта пламени или разрушением очага воспламенения.

Величина минимальной тепловой энергии мгновенного разряда [2], необходимая для воспламенения ВШС, определится как энергия, потребная для нагрева критического объема газа до температуры горения:

$$Q_{min} = 4/3 \pi R^3 C_p \rho (T_2 - T_H),$$

где  $Q_{min}$  – минимальная тепловая энергия мгновенного разряда, необходимая для воспламенения ВШС, Дж;  $R$  – радиус эквивалентного сферического пламени, способного к самораспространению, м;  $C_p$  – теплоемкость ВШС при постоянном давлении, кал/(кг  $\times$   $^{\circ}$ C);  $\rho$  – плотность ВШС при постоянном давлении, кг/м<sup>3</sup>;  $T_2$  – температура горения ВШС в сферическом объеме пламени,  $^{\circ}$ C;  $T_H$  – начальная температура ВШС для нагреваемого объема,  $^{\circ}$ C.

Из сказанного можно сделать вывод, что критерием воспламеняющей способности ВШС электрическим разрядом является его тепловая энергия, и переход от тепловой доли энергии электрического разряда к полной электрической может осуществляться согласно классической теории электротехники:

$$A_{min} = 4,2 \times 4/3 \pi R^3 C_p \rho (T_2 - T_H)$$

Опыт показывает, что разряды малой мощности при любой величине общей энергии могут оказаться не воспламеняющими ВШС. Поэтому следует учитывать две формы передачи энергии в ВШС или два типа электрического разряда: мгновенный разряд и разряд с определенной длительностью.

Для мгновенного электрического разряда, критерием воспламеняющей способности является энергия разряда.

Для длительного разряда, критерием воспламеняющей способности является энергия создание ядра пламени, способного к самораспространению, но она вносится не мгновенно, а во времени со скоростью, равной мощности источника электрической энергии.

**Выводы.** Анализ теоретических исследований показывает, что все они изучали зависимость минимальной энергии и мощности электрического разряда как функции его длительности. Цель исследований – дать ответ, в каком случае критерием воспламеняющей способности является только энергия электрического разряда, а при каких длительностях необходимо оценивать его опасность по мощности. Изучение влияния длительности электрического разряда на величину его способности воспламенения ВШС имеет не только научное, но и большое практическое значение для решения насущных и актуальных задач:

1. Дальнейшее усовершенствование используемого искрообразующего устройства, применяемого при камерной оценке искробезопасности электрических цепей МИИСК.
2. Определение реального времени формирования минимального ядра пламени ВШС – одного из основных параметров, определяющих бескамерную оценку искробезопасности оборудования МИИСК.

Полученные аналитические взаимосвязи факторов, обуславливающих воспламенение ВШС электрической искрой, позволяют приблизительно оценить

искробезопасность МИИСК и разработать ориентировочную не всегда достаточную для практики методику оценки искробезопасности МИИСК. Расчетный метод оценки может в некоторых частных случаях использоваться как основной при оценке искробезопасности электрических цепей. Например, в России расчетный метод включен в ГОСТ Р 51330.10 -99 Введ. с 01.01.01. [11]. Однако, согласно ГОСТ 22782.5 – 78 «Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты „искробезопасная электрическая цепь”. Технические требования и методы испытаний». – Введ. с 01.07 82. [12], в таком случае необходимо использовать экспериментальный метод для подтверждения или проверки полученных расчетным путем результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морган Д. Принципы зажигания. М.: Машгиз., 1947.- 86с.
2. Методы оценки искробезопасности электрических цепей// Трембицкий А.Л., Ерыгин А.Т., Яковлев В.П. - М.: Наука, 1987.- 148с.
3. Вопросы теории искрового воспламенения взрывчатых газовых смесей // Зельдович Я.Б., Воеводский В.В., Симонов Н.Н. - Физ. хим.,- 1955.-Т. XXIX, Вып. 21, с. 1432 – 1449.
4. Горение, пламя и взрывы в газах // Льюис Б., Эльбе Г. . М.: Мир, 1968. 254с.
5. Крижанский С.М. К теории вольт-амперной характеристики столба нестационарного дугового разряда высокого давления // Журнал технической физики. – 1965. – Вып.10. – Т.35. С. 98 –113.
6. Таев И.С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения.– М.: Энергия, 1973. 76с.
7. Диденко В.П. Современные подходы к оценке и обеспечению искробезопасности электрических цепей // Уголь Украины. - 2007.- № 9. -С. 39-42
8. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена // Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.Г. – М.: Высш. шк.,1990.- 124с.
9. Коган А.Г. Электроизмерительная и расчетная оценка искробезопасности индуктивных электрических цепей на основе математической модели очагового зажигания рудничных газов: Автореф.дис. канд. техн. наук: 05.26.01. –Макеевка, 1988. 167с.
10. Сферическая модель воспламенения электрической искровой газовой смеси для оценки искробезопасности электрических цепей рудничного электрооборудования // Бершанский И.А., Иохельсон З.М., Клименко М.С. - Наукові праці ДонНТУ. Сер. Електротехніка і енергетика. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. –Вип. 112.- С.41-45.
11. ГОСТ Р 51330.10 -99 Электрооборудование взрывозащищенное. Ч. 2. Искробезопасная электрическая цепь „i”. – Введ. с 01.01.01. М.: Госстандарт России, 2000.
12. ГОСТ 22782.5 – 78 Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты „искробезопасная электрическая цепь”. Технические требования и методы испытаний. – Введ. с 01.07 82. – М.: Стандартиздат, 1982.