

УДК 614.841

Ю.Ф. Булгаков, д-р техн. наук, проф., А.Л. Кавера, аспирант Донецкого национального технического университета, В.П. Мазаненко, директор ООО «Технология для жизни», Донецк

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПЛАМЯ

Исследовано влияние переменного электрического поля на пламя, возможность применения эффекта гашения пламени электрическим полем для разработки принципиально нового способа тушения возгораний на шахтном оборудовании.

За 25-летний период шахтное электрооборудование стало причиной 50 взрывов газа и пыли (46,3 %), а за период с 1992 по 2002 г. из-за него произошло 9 взрывов, 16 вспышек метана и один подземный пожар с групповыми несчастными случаями, в результате которых погибло 266 человек. Аварии, причиной которых стали пожары, составляют около 19 % от общего количества аварий, а количество смертельно пострадавших составляет 1,8 %. Возгорание конвейерной ленты составило 17,8 % всех причин экзогенных пожаров, оболочки кабеля – 29,3 %, оболочки в электрических машинах – 2,9 % [2].

Имеющиеся на шахтах средства противопожарной защиты не обеспечивают надлежащего уровня пожаробезопасности. Использование огнетушителей экономически невыгодно, поскольку они нуждаются в периодической заправке и замене. Кроме того, не существует универсального средства тушения пожаров всех классов. Возникла необходимость разработки нового способа тушения возгораний. Способ заключается в использовании электрического поля для предотвращения и тушения возгораний.

Теоретические исследования в этой области начались в начале XX века и проводились профессором А.Э.Малиновским [3], но практического распространения и применения они не получили.

Для изучения влияния электрического поля на пламя в ДонНТУ разработана и испытана установка, представляющая собой два электрода, между которыми находится источник горения. На электроды подается высокое напряжение (порядка нескольких десятков киловольт) и изучается поведение пламени в возникшем электрическом поле, а именно: фиксируется факт гашения пламени и напряжение, при котором было достигнуто гашение.

На первом этапе исследований изучалось влияние вида электрического поля (постоянное или переменное), материала и формы электродов на эффективность гашения пламени [1]. Для опытов было изготовлено три вида электродов:

иглообразный остро заточенный электрод;
 круглая плоская пластина;

пластина из диэлектрического материала с набором шипов, каждый из которых подключается отдельным проводом.

Как показали эксперименты, материал, из которого изготовлены электроды, не оказывает существенного влияния на значение напряжения, при котором происходит гашение пламени. Поэтому в дальнейшем, из соображений использования данной установки в шахтных условиях, применялись медные электроды. Форма электрического поля (постоянное или переменное), так же как и материал электродов, не стала определяющим фактором. Поэтому для упрощения конструкции установки применили переменное электрическое поле. Решающее значение сыграла форма электродов. В дальнейшем было испытано больше 10 различных конфигураций электродов. Как показали опыты, наиболее эффективными комбинациями являются: два иглообразных электрода и комбинация, когда первый электрод – иглообразный, а второй – пластина, расположенная под источником пламени.

Следующий этап исследований был направлен на определение напряжения на электродах, при котором происходит гашение пламени. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Исходное положение (для первого опыта), когда источник пламени находится между иглообразными электродами на расстоянии 3 см от левого и 1 см от правого. После каждого измерения напряжения, подаваемого на электроды в момент гашения пламени, заземленный электрод перемещали на 1 см дальше и делали следующее измерение. Полученные зависимости напряжения гашения от расстояния между электродами представлены на рис. 2. Здесь линия 1 получена в результате непосредственных измерений; линия 2 – соответствующая ей линия тренда. Такой же опыт проводили с фиксированным правым электродом (второй опыт).

Аппроксимирующее уравнение линии тренда для первого опыта имеет вид

$$U = -0,1266 L^2 + 3,8112 L + 19,895,$$

а для второго

$$U = 0,1274 L^2 + 1,508 L + 24,343,$$

где L – расстояние от пламени до электродов, см.

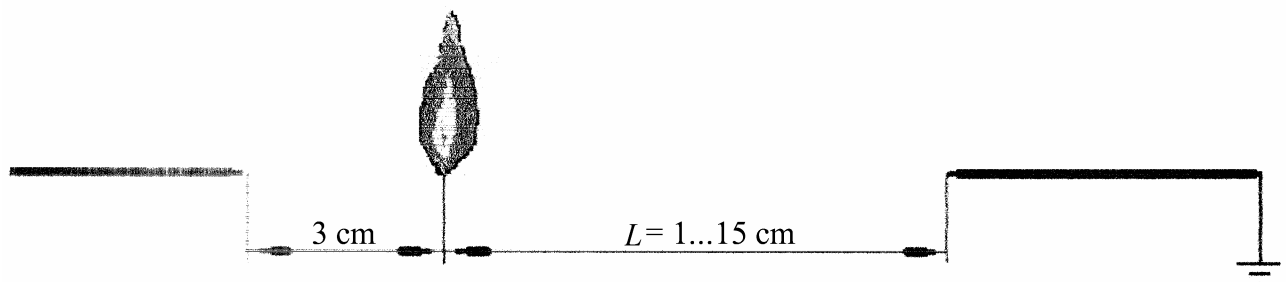


Рис. 1. Схема эксперимента

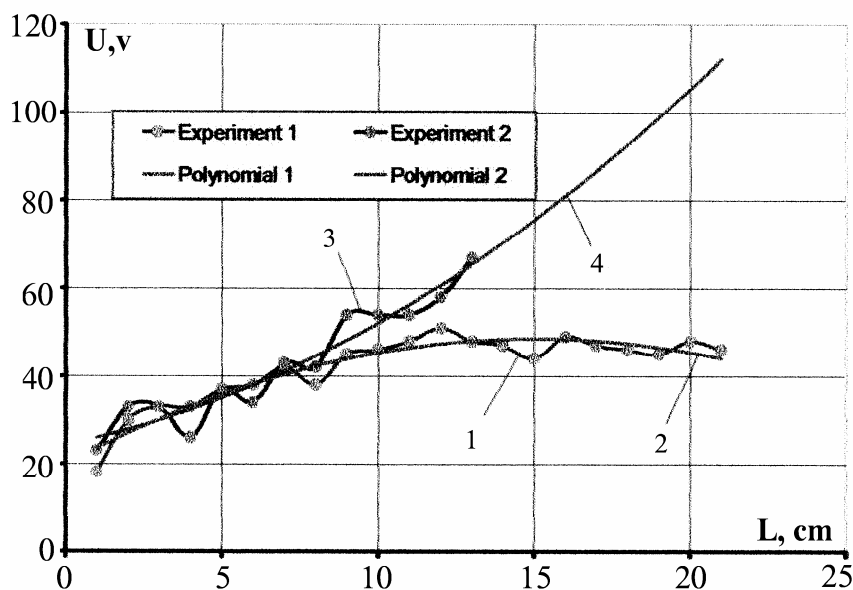


Рис. 2. Зависимость напряжения от расстояния до электродов

Если во втором опыте принимать минимальное расстояние до заземленного электрода меньше 3 см, то в момент гашения пламя может коснуться заземленного электрода и произойдет отключение подачи напряжения на электроды в результате срабатывания системы защиты. Как видно из рис. 2, для первого опыта (линия 1 и 2) увеличение расстояния в интервале от 11 до 21 см не приводит к необходимости увеличения напряжения на электродах. Возможно, это объясняется формой и свойствами электрического поля.

Наблюдаемое явление гашения пламени можно объяснить аэродинамическим воздействием потока ионов в пламени, так называемого «ионного ветра». Одним из эффектов «ионного ветра» является уменьшение температуры пламени за счет увлечения частиц потоком. Процессы образования ионов, происходящие в зоне горения, очень сложно исследовать.

Как известно, электрическое поле изменяет скорость и направление «теплого» движения ионов во время каждого свободного пробега так, что компонента скорости в направлении поля возрастает. Дополнительное количество движения, приобретаемое ионом, равно $Ee\tau$, где E – напряженность приложенного внешнего поля, В/м; e – значение заряда иона, τ – время свободного пробега иона между двумя столкновениями, с. Это дополнительное количество движения в направлении поля приводит к появлению объемной силы, действующей на газовую пламенную среду. Эта сила, отнесенная к единице объема, может быть записана в виде

$$F = Ee(n_+ - n_-), \quad (1)$$

где n_+ , n_- – количество положительных и отрицательных носителей заряда.

При достаточно больших напряженностях поля, когда силы становятся значительными (но до появления вторичной ионизации), положительные и отрицательные носители заряда существуют совместно фактически только в очень узкой реакционной зоне горения во фронте пламени, где они и образуются. В приэлектродных областях, где заряды не образуются, дрейфуют ионы только одной полярности. В таком случае выражение (1) может быть переписано в виде

$$\pm F = E e n_{\pm}. \quad (2)$$

В этих условиях движение среды всецело зависит от распределения давления, возникающего в униполярных приэлектродных областях под действием объемных сил, определяемых уравнением (2).

Тогда плотность тока в этих зонах будет определяться выражением

$$j = E e n_{\pm} \mu_{\pm}, \quad (3)$$

где $\mu_{\pm} = \frac{V_{\pm}}{E}$ – подвижность ионов, $\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{В})$; V_{\pm} – скорость движения ионов, $\text{м}/\text{с}$. Подставляя уравнение (3) в (2), получаем

$$F = \pm \frac{j}{\mu_{\pm}}.$$

Эти соображения справедливы до тех пор, пока напряженность поля значительно меньше значения E_6 , при котором начинается вторичная ионизация:

$$E \ll E_6.$$

Когда энергия, приобретаемая ионами на средней длине свободного пробега, становится достаточно большой и могут происходить столкновения, приводящие к ионизации, вторичные заряды, возникающие при этих столкновениях в межэлектродном пространстве, быстро ослабляют суммарные объемные силы. Как только в области положительного пространственного заряда появляются электроны, они становятся основными носителями тока и эффективная подвижность резко возрастает, а объемная сила исчезает.

Распределение статистического давления рассчитывается следующим образом. Разность давлений между двумя точками x_1 и x_2 будет равна

$$\pm \int_{P_1}^{P_2} dP = \int_{x_1}^{x_2} \frac{j}{\mu_{\pm}} dx. \quad (4)$$

Если принять для ионов постоянную подвижности $m=\text{const}$, то из выражения (4) получим

$$\pm P_2 = \frac{j}{M_{\pm}}(x_2 - x_1) + P_1,$$

а избыточное давление на положительных электродах

$$DP = j \left(\frac{L_+}{M_+} - \frac{L_-}{M_-} \right),$$

где L_+ и L_- – расстояния от пламени до положительного и отрицательного электродов соответственно. В простейшем случае одномерного невязкого течения при отсутствии подъемной силы, когда газу не оказывается никакого сопротивления, поток количества движения на расстоянии x от источника ионов равен cV_x^2 , его приращение в элементе объема толщины S_x и единичного поперечного сечения будет равно

$$c \frac{\partial V_x}{\partial x} S_x = \frac{j}{M} S_x - \frac{\partial P}{\partial x} S_x, \quad (5)$$

где ρ – плотность газовой смеси, кг/м³.

Если градиент давления отсутствует, то, интегрируя (5), получаем

$$(V_x^2 - V_0^2) = \int_{x_0}^x \frac{j}{\rho M} dx = \frac{j}{\rho M} (x - x_0).$$

Если при $x=0$ $V_0=0$, то в случае симметричного расположения электродов относительно пламени $\left(\frac{L_+}{M_+} = \frac{L_-}{M_-} \right)$ имеем скорость «ионного ветра»

$$V = \pm \left(\frac{jL_{\pm}}{cM_{\pm}} \right)^{-2}.$$

Максимально достижимые значения величин, связанных с «ионным ветром», лимитируются появлением вторичной ионизации газовой среды и соответственно возможным пробоем. Значения максимальной объемной силы статистического давления и скорости «ионного ветра» между электродами определяются по следующим формулам:

$$F_{\max} = \frac{E^2}{8\rho L}; \quad DP_{\max} = \frac{E^2}{8\rho}; \quad V_{\max} = \frac{E}{2\sqrt{2\rho c}}.$$

При нормальных условиях для пробивной напряженности $E=3000$ кВ/м (чистый воздух и чистые гладкие электроды) эти значения равны соответственно 8 кН/м³, 40 Па, 11 м/с.

Поскольку процесс гашения пламени «ионным ветром» в разных источниках объясняется по-разному, например как ионно-электронное рассасывание очага воспламенения или аэромеханический срыв пламени, была предпринята попытка определить концентрацию кислорода в непосредственной близости от источника горения. Для этих целей использовали прибор MSI-150-EURO, разработанный немецкой фирмой Dräger (рис. 3). Концентрацию ионов кислорода этот прибор не определяет.



Рис. 3. Внешний вид прибора MSI-150-EURO

В момент измерения зонд прибора располагался в непосредственной близости к пламени со стороны заземленного электрода, то есть со стороны, в которую наклоняется пламя (рис.4). Следует отметить, что пламя всегда отклоняется в сторону заземленного электрода.

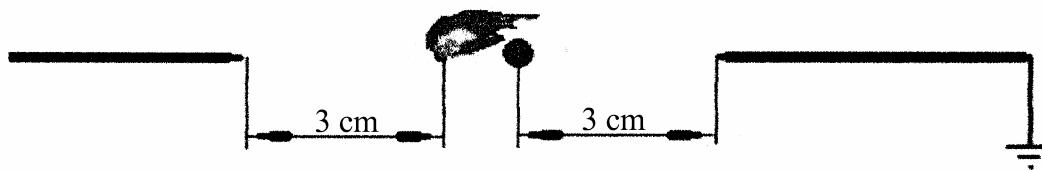


Рис. 4. Схема расположения зонда прибора MSI-150-EURO

В результате измерений было установлено, что доля кислорода в измеряемой зоне почти не изменялась при увеличении интенсивности электрического поля и составляла в среднем 20,9 % (см. таблицу).

Результаты измерений кислорода

Напряжение, кВ	Доля кислорода, %
0	20,9
20	21
30	20,6
40	20,9

В результате экспериментов была определена оптимальная форма электродов для пламегасящей установки, построена зависимость напряжения, при котором происходит гашение пламени, от расстояния между электродами. Разрабатываемый способ гашения пламени при помощи электрического поля предполагается исследовать и в дальнейшем с целью применения для предотвращения возгораний конвейерной ленты и электрооборудования.

Список литературы

1. Булгаков Ю.Ф., Кавера А.Л., Бершадский И.А. Разработка нового способа предотвращения возгораний шахтного высоковольтного оборудования // Изв. Донецкого горн. ин-та. – 2004. – №1. – С.60–63.
2. Лёвкин Н.Б. Предотвращение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины. – Макеевка: МакНИИ, 2002. – 392 с.
3. Малиновский А.Э. Роль заряженных частиц в процессах горения и взрыва // Социалистическая реконструкция и наука. –1934. – №7. – С.24–37.

Получено 23.05.2005