

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЗМА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПЛАМЯ

Предложен новый экологически чистый способ тушения возгораний электрической изоляции при помощи переменного электрического поля. Рассмотрены новые зависимости, позволяющие установить влияние параметров экспериментальной установки, воздействующей на пламя.

Пожары, возникающие на высоковольтном электрооборудовании, являются опасными авариями, приводящими как к значительным материальным убыткам и повреждениям оборудования, так и к гибели производственного персонала. Помимо этого, в некоторых случаях возгорание изоляции электрооборудования может послужить причиной взрыва окружающей взрывоопасной среды, что может повлечь за собой огромные разрушения и человеческие жертвы. Пожаровзрывоопасность электрооборудования обусловлена наличием в нем пожароопасных видов продукции, таких, как электропровода, кабели и т.д., изоляция которых может воспламениться в результате коротких замыканий, замыканий на землю, либо перегрузок в работе электроустановок.

По мере развития технического прогресса проблема пожаробезопасности электрооборудования только обостряется, поскольку растут производственные мощности, а вместе с ними и увеличивается мощность установок, обеспечивающих электроснабжение потребителей электрической энергией [1].

Существующие средства пожаротушения обладают рядом недостатков. Например, газовые средства пожаротушения громоздки и предназначены для тушения пожаров в большом объеме, порошковые – требуют регулярной перезарядки и при использовании могут привести в непригодность электрооборудование (косвенные затраты от пожара). Все существующие средства почти невозможно использовать в труднодоступных местах, а так же они не являются экологически чистыми.

В связи с этим возникает задача разработки принципиально нового способа предотвращения и тушения возгораний изоляции электрооборудования в начальной стадии их развития. Такой способ был предложен в Донецком национальном техническом университете. Этот способ основан на механизме воздействия электрического поля на пламя [2, 3].

Определим зависимости, позволяющие установить влияние параметров экспериментальной установки, воздействующей на пламя, которое может возникнуть при аварийных режимах работы электрооборудования. За источник пламени примем свечу, поскольку по площади пламени и теплотворной способности она будет имитировать возгорание изоляции. С двух сторон от свечи расположим иглообразные остро заточенные электроды. На эти электроды должно быть подано переменное напряжение, для возникновения между ними аэродинамического потока, который при определенном значении напряжения, должен погасить пламя (рис. 1). Измерения производились при температуре $T=295$ К, относительной влажности воздуха $\varphi=70$ % и атмосферном давлении $p=99300$ Па.

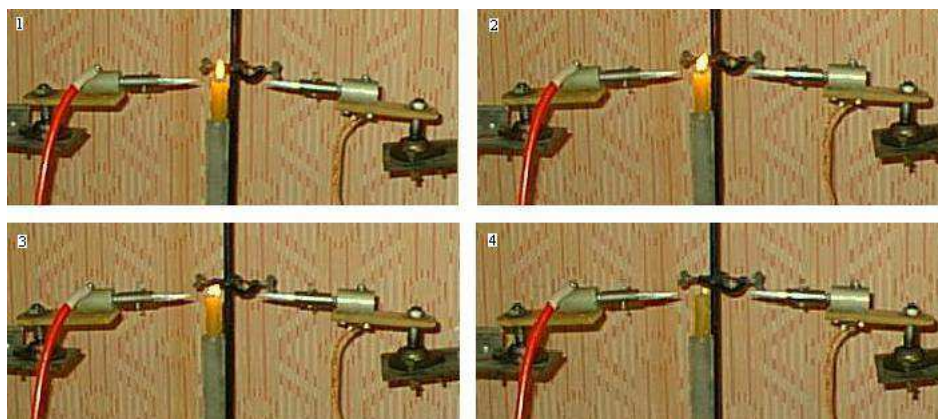


Рис. 1. Гашение пламени электрическим полем

Задача состоит в определении зависимости напряжения, при котором произойдет гашение пламени от расстояния между пламенем и электродами. Предполагается, что острые концы электродов и основание пламени свечи находятся в одной плоскости, а именно, в горизонтальной. Первый электрод обычный, второй заземленный.

Пользуясь [4], принимаем в качестве первого и второго факторов расстояние от пламени до электродов и обозначим их соответственно x_1 и x_2 . Предварительными экспериментами установлено, что целесообразно проводить исследования при расстоянии от пламени до электродов равном от 3 до 10 см. Кодированные значения нижних и верхних уровней факторов будут соответственно -1 и +1. Все возможные комбинации при варьировании факторов на двух уровнях в рассматриваемой модели определяются четырьмя опытами. План эксперимента изобразим в виде матрицы планирования для двух факторов на двух уровнях, приведенной в таблице 1. В матрице x_0 – фиктивный фактор. Он введен для удобства определения свободного члена уравнения регрессии.

По данным приведенного эксперимента можно определить коэффициенты линейного уравнения регрессии:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2,$$

где \hat{y} - расчетное значение параметра, кВ.

Таблица 1.

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта в матрице	Порядок реализации опыта	x_0	Расстояние до 1-го электрода		Расстояние до 2-го электрода		Значение напряжения-гашения, кВ	
			код	значение, см	код	значение, см	по опытам	среднее
1	4	+1	-1	3	-1	3	33	33
	12						34	
	2						31	
2	3	+1	+1	10	-1	3	54	54
	7						52	
	8						55	
3	9	+1	-1	3	+1	10	47	46
	1						44	
	11						46	
4	5	+1	+1	10	+1	10	65	64
	6						66	
	10						62	

Коэффициенты уравнения регрессии с учетом параллельных опытов определяются по формуле

$$b_i = \sum_{u=1}^n \bar{y}_u x_{iu} / n,$$

где n – число опытов,

u – номер опыта,

\bar{y}_u – математическое ожидание параметра в u -ом опыте,

x – значение определяющего фактора.

Тогда

$$b_0 = (33+44+46+64)/4 = 49,25 \text{ кВ},$$

$$b_1 = (-33+44-46+64)/4 = 9,75 \text{ кВ},$$

$$b_2 = (-33-44+46+64)/4 = 5,75 \text{ кВ}.$$

Воспроизводимость опытов оценивается в следующем порядке.
 Рассчитывается построчная дисперсия по выражению

$$S_n^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (y_{nu} - \bar{y}_n)^2}{m-1},$$

где m – число параллельных опытов,
 y_{nu} - значение выходного параметра в опыте u данной n строки.
 Получаем

$$S_1^2 = \frac{(33-33)^2 + (34-33)^2 + (31-33)^2}{3-1} = 2,5 \text{ кВ}^2,$$

$$S_2^2 = \frac{(54-54)^2 + (52-54)^2 + (55-54)^2}{3-1} = 2,5 \text{ кВ}^2,$$

$$S_3^2 = \frac{(47-46)^2 + (44-46)^2 + (46-46)^2}{3-1} = 2,5 \text{ кВ}^2,$$

$$S_4^2 = \frac{(65-64)^2 + (66-64)^2 + (62-64)^2}{3-1} = 4,5 \text{ кВ}^2.$$

Проверим однородность дисперсий, используя критерий Кохрена (G-критерий) по формуле

$$G = S_{\max}^2 / \sum_{i=1}^n S_i^2.$$

Поскольку $S_{\max}^2 = S_4^2$, получаем:

$$G = 4,5 / (2,5 + 2,5 + 2,5 + 4,5) = 0,375.$$

Для уровня значимости $\alpha=0,05$ при числе степеней свободы для дисперсий $f_1=2$ и числе дисперсий $n=4$ табличное значение G-критерия $G_T=0,9057$. Поскольку $G < G_T$, $0,375 < 0,9057$, то дисперсии однородны. Дисперсия воспроизводимости определяется по выражению

$$S_g^2 = S_{cg}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n S_i^2 f_{1i}}{\sum_{i=1}^n f_{1i}} = \frac{2,5 \cdot 2 + 2,5 \cdot 2 + 2,5 \cdot 2 + 4,5 \cdot 2}{2 + 2 + 2 + 2} = 3 \text{ кВ}^2.$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии проверяется в таком порядке. Определяют дисперсию коэффициентов по следующему выражению:

$$S_{e_i}^2 = S_g^2 / n = 3 / 4 = 0,75 \text{ кВ}^2.$$

Для значимости коэффициентов должно выполняться условие

$$|b_i| > t_\alpha S_{e_i},$$

где t_α - критерий, принимаемый из таблиц для соответствующего уровня значимости $\alpha=0,05$ и числа степеней свободы $f=n/(m-1)=4/(3-1)=8$ и составляющий 2,306.

$$|b_i| > 2,306 \cdot \sqrt{0,75} = 1,997 .$$

Поскольку выполняются условия:

$$|b_0| = 49,25 > 1,999$$

$$|b_1| = 9,75 > 1,999$$

$$|b_2| = 5,75 > 1,999 ,$$

то все коэффициенты значимы. Значит, уравнение регрессии будет иметь вид

$$\hat{y} = 49,25 + 9,75x_1 + 5,75x_2 .$$

Учитывая, что \hat{y} - значение напряжения, а x_1 и x_2 соответствующие расстояния от пламени до электродов, то перепишем полученное выражение в следующем виде:

$$U = 49,25 + 9,75L_1 + 5,75L_2 .$$

Полученное уравнение первой степени не достаточно точно описывает процесс. Поскольку даже при расстояниях L_1 и $L_2 = 1$ см значение напряжения будет превышать 50 кВ, что более чем вдвое превышает значения, полученные при лабораторных измерениях.

Рассчитаем искомую зависимость на персональном компьютере в среде MathCAD. Для этого выполним следующие вычисления.

Воспользуемся зависимостями, полученными в [5] при определении напряжения на электродах, при котором происходит гашение пламени. Схема эксперимента представлена на рис. 3. 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 пламени от расстояния между электродами представлены на рисунке 4. Здесь: линия 1 получена в результате непосредственных измерений; линия 2 – соответствующая ей линия тренда. Такой же опыт проводили с фиксированным правым электродом (второй опыт).

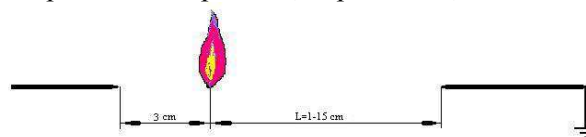


Рис. 3. Схема эксперимента



Рис. 4. Зависимость напряжения от расстояния до электродов

$$U = -0,1215 L^2 + 3,7017 L + 20,638,$$

$$U=0,1183 L^2+1,5572 L +24,801.$$

Как видим из рисунка 4, эти две кривые, уравнения которых представлены выше, имеют две точки пересечения. Решим систему из двух уравнений:

$$y= -0,1215 x^2+3,7017 x +20,638 \quad (1)$$

$$y=0,1183 x^2+1,5572 x +24,801, \quad (2)$$

а результаты представим в виде двух векторов А и В, где $A_0=2,849$, $A_1=30,197$, $B_0=6,094$, $B_1=38,648$:

$$A = \mathbf{■}$$

$$B := \begin{pmatrix} 6.094 \\ 38.684 \end{pmatrix}.$$

То есть при расстоянии от пламени до первого электрода $L_1=A_0=2,849$ см и расстоянии от пламени до второго электрода $L_2=3$ см, напряжения гашения пламени $U= A_1=30,197$ кВ. Это справедливо и если $L_1=3$ см, а $L_2=A_0=2,849$ см. При расстоянии от пламени до первого электрода $L_1=B_0=6,094$ см и расстоянии от пламени до второго электрода $L_2=3$ см, напряжения гашения пламени $U= B_1=38,684$ кВ. Это справедливо и если $L_1=3$ см, а $L_2= B_0=6,094$ см.

Предположим, что зависимость напряжения гашения пламени от расстояния L_1 до первого электрода и от расстояния L_2 до второго электрода будет иметь вид:

$$U=a+bL_1L_2+cL_1^2L_2+dL_1L_2^2 \quad (3)$$

Тогда при $L_1=A_0$ и $L_2=3$ см уравнение (3) примет вид

$$a+b \cdot A_0 \cdot 3+c \cdot (A_0)^2 \cdot 3+d \cdot A_0 \cdot 3^2=A_1 \quad (4)$$

а при $L_1=3$ см и $L_2= B_0$ уравнение (3) примет вид

$$a+b \cdot 3 \cdot B_0+c \cdot 3^2 \cdot B_0+d \cdot 3 \cdot (B_0)^2=B_1 \quad (5)$$

При $L_1=3$ см и любых значениях $L_2=x$, уравнение (3) будет тождественно (1)

$$a+b \cdot 3 \cdot x+c \cdot 3^2 \cdot x+d \cdot 3 \cdot x^2=-0.1215 \cdot x^2+3.7017 \cdot x+20.638 \quad (6)$$

При любых значениях $L_1=x$ и $L_2=3$ см, уравнение (3) будет тождественно (2)

$$a+b \cdot x \cdot 3+c \cdot x^2 \cdot 3+d \cdot x \cdot 3^2=0.1183 \cdot x^2+1.5572 \cdot x+24.801 \quad (7)$$

Решая систему уравнений (4), (5), (6) и (7), найдем коэффициенты а, b, с и d, которые представлены в виде вектора e

$$e = \mathbf{■}$$

Таким образом, уравнение (3) примет вид

$$U=20.746+1.248 \cdot L_1 \cdot L_2-0.008 \cdot L_1^2 \cdot L_2-0.04 \cdot L_1 \cdot L_2^2. \quad (3.8)$$

Графическое представление этой зависимости показано на рисунке 5.

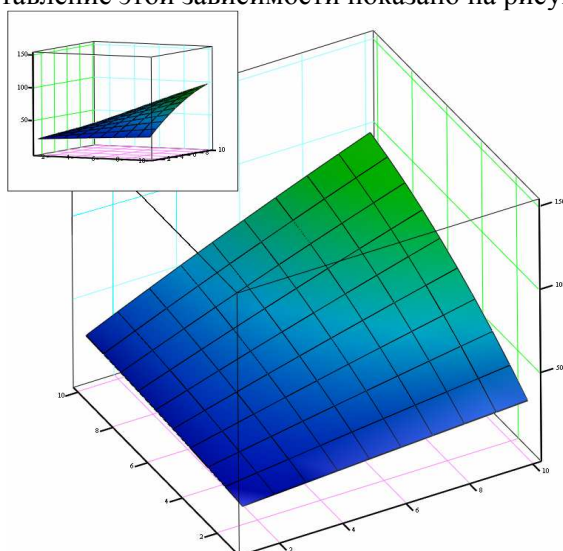


Рис. 5. Зависимость напряжения гашения пламени от расстояния между первым и вторым электродами и пламенем

Как видно из рисунка 5, расчетные значения напряжения, вычисленные по выражению (8) совпадают со значениями, полученными экспериментальным путем.

При проектировании установки для тушения возгораний, полученные значения напряжения не должны превышать величину пробивного напряжения. Величина этого напряжения зависит от таких физических параметров воздуха, как влажность воздуха и его относительная плотность [6]. Так повышение абсолютной влажности приводит к некоторому повышению электрической прочности воздушных промежутков за счет уменьшения коэффициента ударной ионизации электронами в результате их прилипания к электроотрицательным молекулам водяного пара. Следует отметить, что все экспериментальные измерения производились при температуре $T=295$ К, относительной влажности воздуха $\varphi=70$ % и атмосферном давлении $p=99300$ Па. Для воздушных промежутков длиной менее 1 м приведение экспериментальных значений пробивного напряжения к условиям абсолютной влажности воздуха $\nu=11$ г/м³, при температуре $T=293$ К и давлении $p=101300$ Па производится с помощью поправочного коэффициента k_v [7] и определяется из выражения

$$U_{np} = U_0 \frac{293p}{k_v p_0 (273 + t)},$$

где U_0 — разрядное напряжение при нормальных условиях;

p и p_0 – атмосферное давление в условиях опыта и нормальное атмосферное давление;

t – температура воздуха, °С;

k_v - поправочный коэффициент, определяемый по рисунку 6.

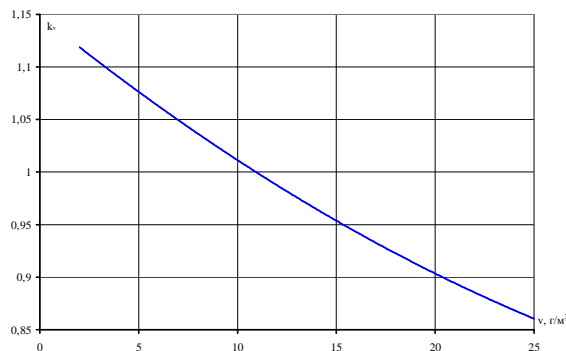


Рис. 6. Поправочный коэффициент на влажность для напряжений частотой 50 Гц

Развитие ионизационных процессов, приводящих к электрическому пробую газов, описывается с помощью коэффициента ударной ионизации нейтральных частиц газа электронами [6]

$$\alpha = Ap \cdot \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right), \quad (9)$$

где A, B — постоянные, зависящие от вида газа и величины $\frac{E}{p}$;

p — давление газа, Па;

E — напряженность электрического поля в изоляционном промежутке, В/см.

Для воздуха

$$\alpha = \sqrt[3]{0.257 p \left(\frac{E}{p}\right)} \exp\left(-\frac{29700}{\frac{E}{p}}\right). \quad (10)$$

Как видно из (10), интенсивность ударной ионизации нейтральных частиц газа зависит от соотношения E/p , а при постоянной напряженности электрического поля полностью определяется давлением газа. Электрический пробой газового промежутка произойдет, если величина α достигнет значения, при котором выполняется условие самостоятельности разряда

$$\gamma \left[\exp\left(\int_0^d \alpha(x) dx\right) - 1 \right] \geq 1, \quad (11)$$

где γ — коэффициент вторичной эмиссии электронов из катода;

d — расстояние между электродами.

Величина γ зависит от материала катода. При повышенных давлениях газа влияние прикатодных процессов на пробой газового промежутка становится несущественным и γ приобретает смысл коэффициента объемной фотоионизации.

В однородном электрическом поле коэффициент α не изменяется вдоль межэлектродного промежутка, и условие самостоятельности разряда записывается в виде

$$\gamma [\exp(\alpha d) - 1] \geq 1. \quad (12)$$

Подстановка (9) в (12) позволяет получить выражение для определения пробивного напряжения газового промежутка в однородном электрическом поле (закон Пашена).

$$U_{np} = \frac{Apd}{\ln \frac{1}{\gamma + 1}}. \quad (13)$$

Из выражения (13) следует, что в однородном электрическом поле при постоянной температуре пробивное напряжение газа является однозначной функцией произведения pd (рис. 7), и кривая закона Пашена может быть получена при варьировании одного из параметров: давления газа, расстояния между электродами или их произведения pd . Если при фиксированном d уменьшать давление газа (правая ветвь кривой Пашена), то пробивное напряжение промежутка уменьшается за счет возрастания эффективности процессов ударной ионизации. Формально это описывается возрастанием величины коэффициента ударной ионизации α (9), (10) при уменьшении p . Физически указанный эффект объясняется увеличением энергии, которую приобретает электрон во внешнем электрическом поле, пролетая значительный путь без столкновений с нейтральными частицами. При дальнейшем уменьшении

давления газа (левая ветвь кривой Пашена) пробивное напряжение возрастает, так длина свободного пробега все большего количества электронов становится соизмеримой с длиной межэлектродного промежутка и количество ионизирующих столкновений электронов с нейтральными частицами уменьшается. В этом случае коэффициент α уменьшается, так как в формулах (9), (10) основное влияние на величину α оказывает предэкспоненциальный множитель, зависящий от p .

При pd около 1000 Па·см и более в определенных пределах по давлению, различному для различных газов, можно пользоваться расчетной формулой

$$U_{np} = a_0 \frac{p}{p_0} d + b_0 \sqrt{\frac{pd}{p_0}},$$

где p_0 – давление при нормальных условиях ($p_0=101300$ Па, $T_0=293$ К). Значения постоянных a_0 и b_0 для воздуха принимаются соответственно равными 2,45 МВ/м и $0,064$ МВ/м^{1/2}.

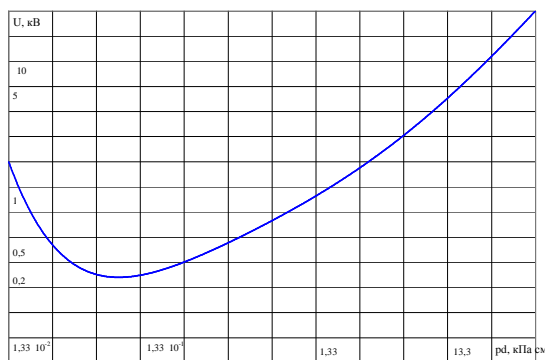


Рис. 7. Зависимость пробивного напряжения воздушного промежутка от произведения pd в однородном электрическом поле

При отклонении температуры от нормальной, пробивное напряжение можно определить по формуле

$$U_{np} = a_0 d \delta + b_0 \sqrt{d \delta},$$

где δ - относительная плотность воздуха определяется по выражению

$$\delta = pT_0 / p_0T,$$

где p_0, T_0 – соответственно давление и температура воздуха при нормальных условиях ($p_0=101300$ Па, $T_0=293$ К);

p, T – соответственно давление и температура воздуха в условиях эксперимента.

При постоянном давлении газа уменьшение расстояния между электродами (правая ветвь кривой Пашена) приводит к уменьшению пробивного напряжения промежутка, так как при этом величина напряженности электрического поля, необходимая для выполнения условия самостоятельности разряда (12), достигается при меньших значениях приложенного к изоляционному промежутку напряжения. Дальнейшее уменьшение межэлектродного расстояния (левая ветвь кривой Пашена) должно вызывать увеличение пробивного напряжения вследствие соизмеримости длины свободного пробега электронов с расстоянием между электродами, что приводит к уменьшению эффективности ударной ионизации в промежутке. Однако при давлении газа выше определенной величины пробивное напряжение промежутка при малых d оказывается ниже рассчитанного по (13). Это отклонение от закона Пашена вызвано влиянием микронеоднородностей на поверхности электродов на характер распределения электрического поля в промежутке. При малых d электрическое поле в промежутке искажается микровыступами и становится неоднородным. Если длина свободного пробега электронов меньше d , то пробой промежутка развивается, как в неоднородном поле, и закон Пашена не выполняется. В целях снижения эффекта от микровыступов

на поверхности электродов и проводящих микрочастиц иногда применяют покрытие электродов изоляционными пленками, что дает повышение пробивного напряжения на 20-30 %.

В воздухе при небольших его давлениях в сильнонеоднородном поле рост пробивного напряжения с увеличением давления довольно значительный. Однако потом наблюдается сильный разброс пробивных напряжений, а затем они снижаются до коронного (рис. 8). Пробивные напряжения в электродных устройствах с сильнонеоднородным электрическим полем существенно меньше, чем в устройствах с однородным или слабонеоднородным полем, даже при давлениях, в которых наблюдается повышенное пробивное напряжение за счет стабилизации разряда в результате коронирования и выравнивания тем самым поля.

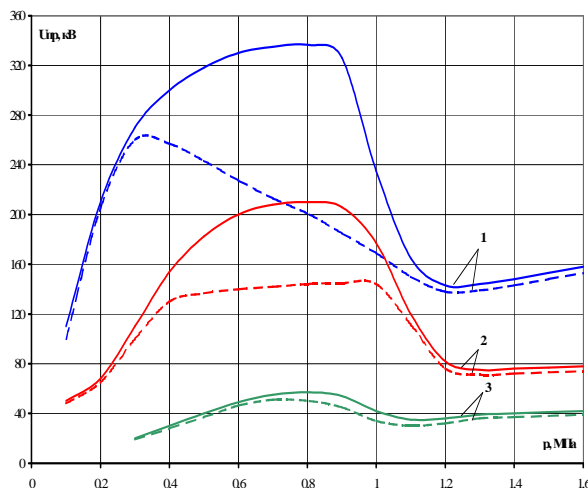


Рис. 8. Зависимость пробивного напряжения от давления воздуха для электродов острие-плоскость при 50 Гц:

————— — максимальные значения;
 - - - - - — минимальные значения;

1, 2, 3 – соответственно расстояния между электродами 24, 6 и 1 см.

Экспериментально установлено, что значение напряжения гашения пламени пропорционально квадрату расстояния между пламенем и электродом. Эффективность гашения пламени зависит от того, насколько точно направлены электроды на основание пламени. Гашение будет тем эффективнее (потребуется меньшее значение напряжения), чем ближе находятся электроды к источнику пламени. Данный способ позволяет без применения химических веществ и больших затрат электрической энергии (так как нет активной нагрузки на электродах), обеспечить гашение воспламенившейся изоляции в начальной стадии горения и тем самым является экологически чистым. Его использование будет более выгодно на объектах, где есть источники высокого напряжения.

Библиографический список

1. Чернов И.Я., Ландкоф Л.Б. Энергообеспечение основных шахтных механизмов. /Уголь. – 2004. №12. – с.13-16.
2. Булгаков Ю.Ф., Кавера А.Л., Бершадский И.А. Разработка нового способа предотвращения возгораний шахтного высоковольтного оборудования // Вісті Донецького гірничого інституту, 2004. №1.
3. Булгаков Ю.Ф., Кавера А.Л., Гаврилова М.И. Новый способ обеспечения пожаробезопасности электроустановок // Вісті Донецького гірничого інституту, 2005. №1.
4. Тимошенко Г.М., Зима П.Ф. Теория инженерного эксперимента: Учеб. Пособие. – К.: УМК ВО, 1991. – 124 с.
5. Булгаков Ю.Ф., Кавера А.Л., Мазаненко В.П. Исследование влияния электрического поля на пламя // Горноспасательное дело, №42, 2005 г., С. 90-96
6. Техника высоких напряжений: Лабораторный практикум / Под ред. М.Е. Иерусалимова. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 216 с.
7. Справочник по электротехническим материалам Т.1 / Под ред. Ю.В. Корицкого и др.- 3-е изд., перераб. - М.: Энергоатомиздат, 1986.