

УДК 622:621.31

В.П. Диденко (канд. техн. наук, ст. науч.сотр.)

Государственный Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности

ЗАВИСИМОСТИ МИНИМАЛЬНОЙ ВОСПЛАМЕНЯЮЩЕЙ ЭНЕРГИИ РАЗРЯДА ОТ ЕГО ДЛИТЕЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ КОММУТАЦИИ

Разработан метод и определены зависимости минимальной воспламеняющей энергии от длительности разряда и скорости коммутации для испытательных смесей групп I (активизированная 47 % водородно-воздушная смесь) и II, позволяющие проводить расчетную оценку искробезопасности электрических цепей. Дана сравнительная оценка минимальных воспламеняющих токов омической цепи по группе I.

Ключевые слова: искробезопасность, электрическая цепь, воспламеняющая энергия, длительность разряда, скорость коммутации, испытательная смесь.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

В настоящее время применяются экспериментальный и расчетный методы оценки искробезопасности электрических цепей. Экспериментальный метод является основным, достаточно простым в большей части испытываемых искробезопасных цепей, и, ввиду широкого применения, хорошо изученным. Однако этот метод дает только качественную оценку – разряды в цепи воспламеняют используемую газовую смесь или нет. Количественная оценка, представляющая интерес как в научном, так и практическом плане, а также анализ цепей на стадии проектирования, когда реальные цепи еще отсутствуют, доступны только для расчетных методов.

Анализ исследований и публикаций. Получивший развитие в последнее время расчетный метод оценки искробезопасности электрических цепей предполагает использование значений минимальной воспламеняющей энергии $W_{в}$ при различной длительности разряда T_r и скорости коммутации v . Для контрольной смеси группы I (8,3% метано-воздушная смесь) они могут быть определены по формулам [1]

$$\left. \begin{aligned} k &= 0,814 - 0,15 \cdot \ln(v); \\ b &= 0,7 \cdot v^{-1,142} \cdot e^{-0,12 \cdot (\ln(v))^2}; \\ Tr &= 0,332 \cdot 10^{-3} \cdot v^{-0,83}; \\ We &= \begin{cases} b \cdot Tr^k & \text{при } Tr / 2,5 \leq Tr \leq Tr; \\ b \cdot Tr^k & \text{при } Tr < Tr \leq 3 \cdot Tr. \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Однако наиболее часто для испытаний на искробезопасность электрических цепей по группе I используется активизированная 47% водородно-воздушная смесь. Это удобно тем, что согласно [2] данная смесь обеспечивает необходимый коэффициент запаса (не менее 1,5) без увеличения тока или напряжения испытываемой цепи. Кроме того, для оценки искробезопасности электрических цепей по группе II используются смеси, также более агрессивные, чем 8,3% метано-воздушная.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является получить зависимости минимальной воспламеняющей энергии разряда от его длительности и скорости коммутации для активизированной смеси по группе I и контрольных смесей подгрупп ПА, ПВ и ПС.

Изложение материала и результаты. Ясно, что если определить энергии и длительности разрядов при наиболее опасных скоростях коммутации для цепей, взятых из характеристик минимального воспламеняющего тока по указанным подгруппам, то эти пары значений энергии и длительности будут принадлежать искомым зависимостям минимальной воспламеняющей энергии.

Воспользуемся значениями минимальных воспламеняющих токов для омической цепи напряжением 24 В (табл. 1). Выбор такого напряжения обоснован достаточной его распространенностью в искробезопасных цепях горношахтного и нефтехимического оборудования и можно рассчитывать на то, что минимальные воспламеняющие токи определены для этого напряжения достаточно точно.

В табл. 1 приведены значения длительности и энергии разряда, определенные с учетом модели разряда [3] при минимальной и наиболее опасной скорости коммутации 0,046 м/с. В строках 4 и 5 табл. 1 соответственно даны отношения длительности Tr^* и энергии Wr^* разряда к таковым для контрольной смеси группы I.

Табл. 1. Данные для определения зависимости минимальной воспламеняющей энергии разряда от его длительности и скорости коммутации

	Смеси для группы I		Контрольные смеси для группы II		
	контрольная	активизированная 47 %	IIA	IIB	IIC
Ток, мА	1100	450	863	655	240
T_p , мс	2,94	1,746	2,59	2,213	1,11
W_p , мДж	7,096	1,92	5,042	3,377	0,378
T_p^*	1	0,594	0,881	0,753	0,378
W_p^*	1	0,271	0,711	0,476	0,1006

Из полученных отношений длительностей и энергий разрядов видно, что с уменьшением тока цепи энергия снижается в большей степени, чем длительность. Так, для 47 и 20% водородно-воздушных смесей длительность разряда уменьшается соответственно в 1,68 и 2,65 раза, а энергия разряда – в 3,69 и 9,94 раза.

В работе [4] приведены графики зависимостей минимальной воспламеняющей энергии от длительности разряда и скорости коммутации для пропано-воздушной смеси (подгруппа IIA) и для этилено-воздушной смеси (подгруппа IIB). Из них следует, что общий характер зависимостей такой же, как и для метано-воздушной смеси. Поэтому уравнение минимальной воспламеняющей энергии $W = b \cdot T^k$ будет справедливо для всех рассматриваемых газовых смесей.

Рассмотрим значения коэффициента k для различных газовых смесей. На рис. 1 показаны зависимости коэффициентов k от скорости размыкания контактов цепи для подгрупп IIA, IIB и расчетные значения согласно формуле $k = 0,814 - 0,15 \cdot \ln v$. Исходные данные (зависимости минимальной воспламеняющей энергии разряда от его длительности и скорости коммутации) взяты из [4].

Как следует из рис. 1, общий характер зависимости коэффициента k от скорости коммутации сохраняется. Разброс значений коэффициента k , определенных по экспериментальным данным, по отношению к расчетным k_r вызван, вероятно, погрешностью эксперимента и можно принять, что для рассматриваемых газовых смесей зависимость коэффициента k от скорости коммутации такая же, как и для 8,3% метано-воздушной смеси.

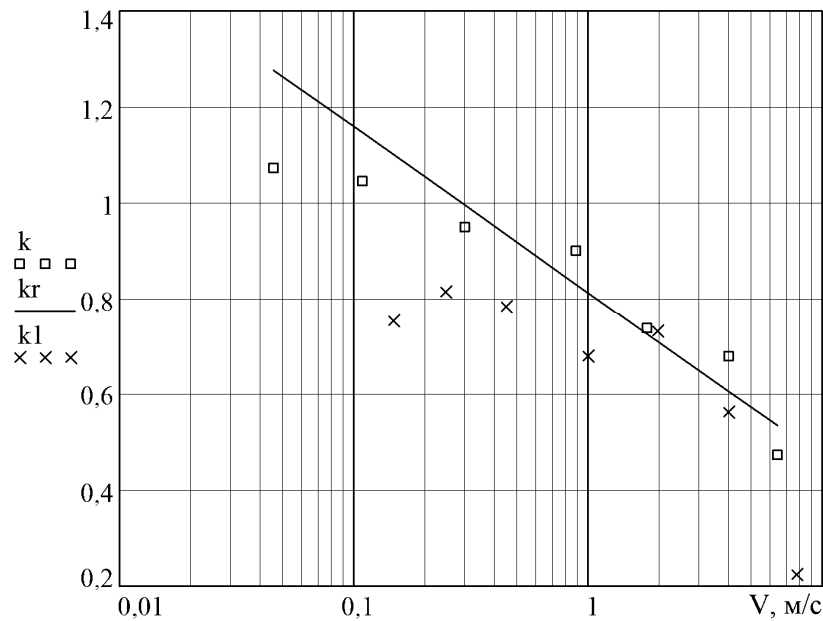


Рис. 1. Зависимости коэффициентов k от скорости размыкания контактов цепи: k – значения для подгруппы ПА; kr – расчетные значения; kl – значения для подгруппы ПВ.

Таким образом, поскольку зависимости минимальной воспламеняющей энергии от длительности разряда и скорости коммутации определяются только воспламеняющими свойствами газовой смеси, и задаются зависимостью времени перегиба графика и наклона наклонной части от скорости коммутации, то следует предположить, что по линии перегиба поверхности минимальной воспламеняющей энергии длительность и энергия разряда изменятся пропорционально уменьшению этих параметров разряда в цепи, связанных со снижением минимального воспламеняющего тока этой цепи. При переходе от 8,3% метано-воздушной до 47% водородно-воздушной смеси в цепи напряжением 24 В минимальный воспламеняющий ток уменьшается с 1100 до 450 мА. При этом длительность и энергия наиболее опасных разрядов уменьшаются соответственно в 1,68 и 3,69 раза. Так же должны измениться длительность и энергия разряда в точках перегиба графика минимальной воспламеняющей энергии при сравнении упомянутых выше газовых смесей.

Если для газовой смеси, отличной от 8,3% метано-воздушной, зависимость минимальной воспламеняющей энергии имеет вид $WI = b1 \cdot T1^k$, то можно записать по отношению к 8,3% метано-воздушной

$$\text{смеси} \quad \frac{WI}{W} = \frac{b1}{b} \cdot \frac{T1^k}{T^k}.$$

Откуда, заменив $Wp^* = WI/W$ и $Tr^* = TI/T$, найдем

$$bI = b \cdot \frac{Wp^*}{(Tr^*)^k}.$$

Подставив значения $b = 0,7 \cdot v^{-1,142} \cdot e^{-0,12 \cdot (\ln(v))^2}$ и $k = 0,814 - 0,15 \cdot \ln v$, а также Tr^* и Wp^* из табл. 1, после упрощения получим значения коэффициента b для:

$$47\% \text{ водородно-воздушной смеси} - b_{v47} = 0,29 \cdot v^{-1,22} \cdot e^{-0,12 \cdot (\ln(v))^2};$$

$$\text{подгруппы ПА} - b_{2A} = 0,552 \cdot v^{-1,161} \cdot e^{-0,12 \cdot (\ln(v))^2};$$

$$\text{подгруппы ПБ} - b_{2B} = 0,42 \cdot v^{-1,185} \cdot e^{-0,12 \cdot (\ln(v))^2};$$

$$\text{подгруппы ПС} - b_{2C} = 0,155 \cdot v^{-1,288} \cdot e^{-0,12 \cdot (\ln(v))^2}.$$

Учитывая $Tr_1 = Tr \cdot Tr^*$, получим значения времени перегиба для:

$$47\% \text{ водородно-воздушной смеси} - Tr_{v47} = 0,198 \cdot 10^{-3} \cdot v^{-0,83};$$

$$\text{подгруппы ПА} - Tr_{2A} = 0,292 \cdot 10^{-3} \cdot v^{-0,83};$$

$$\text{подгруппы ПБ} - Tr_{2B} = 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot v^{-0,83};$$

$$\text{подгруппы ПС} - Tr_{2C} = 0,125 \cdot 10^{-3} \cdot v^{-0,83}.$$

Используя уравнения для определения коэффициентов b и k , а также времени Tr для соответствующей группы и подгруппы газовой смеси в системе уравнений (1), можно проводить оценку искробезопасности электрических цепей по этим газовым смесям. В качестве положительной характеристики следует отметить то, что установленные зависимости не привязаны к какому-либо конкретному классу цепей и могут использоваться для оценки искробезопасности цепей различных классов.

Имея математический аппарат для определения выделяемой в разряд энергии и оценки ее воспламеняющей способности, можно проводить как расчетную оценку конкретных электрических цепей различных классов, так и решать задачи синтеза. Например, определять требуемые параметры элементов или цепи, при которых разряды имеют заданный коэффициент искробезопасности по энергии. Так, определим минимальные воспламеняющие токи омической цепи (строка 2 табл. 2) при различных ее напряжениях (строка 1 табл. 2) и коэффициенте искробезопасности по энергии для 8,3% метано-воздушной смеси, равном единице. Скорость коммутации принималась равной 0,046 м/с.

Табл. 2. Данные для оценки минимального воспламеняющего тока омической цепи (группа I)

$U, В$	15	16	17	18	20	24	30
$I, А$ ($k_{im}=1$)	6,65	4,74	3,59	2,83	1,93	1,11	0,647
k_{iv47} при этом токе	3,68	3,69	3,70	3,70	3,70	3,05	2,57

$U, В$	40	50	70	100	200	300
$I, А$ ($k_{im}=1$)	0,364	0,247	0,15	0,0975	0,0395	0,0218
k_{iv47} при этом токе	2,21	2,03	1,90	1,90	1,90	1,90

Сравнительная оценка зависимостей минимального воспламеняющего тока омической цепи по группе I может быть проведена по графикам, представленным на рис. 2.

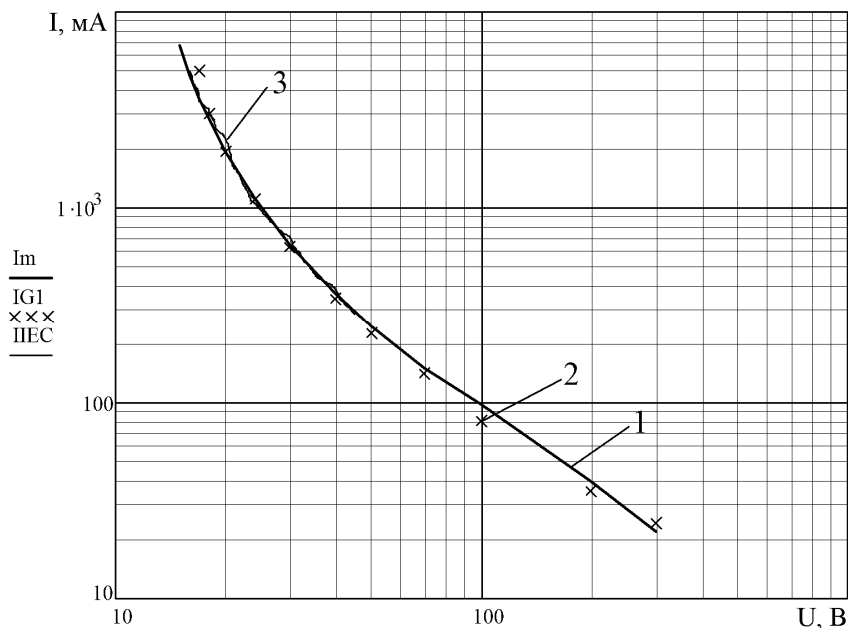


Рис. 2. Зависимости минимального воспламеняющего тока омической цепи по группе I: 1 – расчетные значения; 2 – по данным [2]; 3 – по данным [5].

Видно (рис. 2), что имеется удовлетворительная сходимость между расчетными и экспериментальными данными.

В строке 3 табл. 2 и на рис. 3 представлена зависимость коэффициента искробезопасности по энергии для 47% водородно-воздушной смеси. То есть, выделившаяся в разряд энергия сравнива-

ется с воспламеняющей для 47% водородно-воздушной смеси при полученных значениях длительности разряда и наиболее опасной скорости коммутации 0,046 м/с.

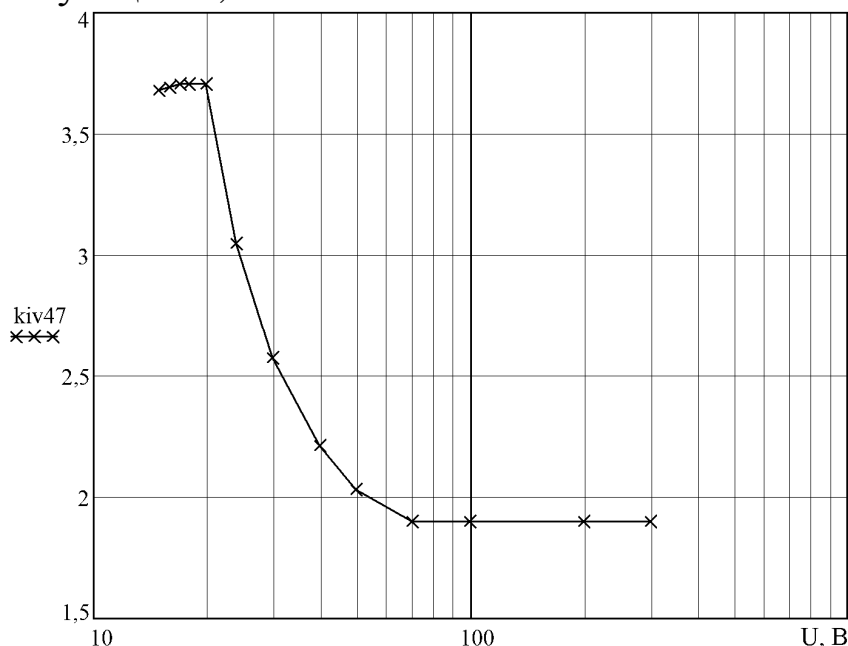


Рис. 3. Зависимость коэффициента искробезопасности по энергии для 47% водородно-воздушной смеси от напряжения (по данным зависимости минимального воспламеняющего тока омической цепи для группы I)

Рассматриваемая зависимость коэффициента искробезопасности по энергии имеет два участка относительно постоянных значений. В первом диапазоне напряжений от 15 до 20 В указанный коэффициент равен 3,7, а во втором диапазоне напряжений от 70 до 300 В – 1,9. В промежутке напряжений от 20 до 70 В коэффициент искробезопасности по энергии плавно уменьшается от 3,7 до 1,9. Наличие участков постоянства значений коэффициента объясняется тем, что в первом интервале длительности разрядов находятся в диапазоне постоянной минимальной энергии разряда, а во втором – в диапазоне наклонных участков этой энергии. Средний интервал является переходным.

Выводы и направление дальнейших исследований. Разработан метод и определены зависимости минимальной воспламеняющей энергии от длительности разряда и скорости коммутации для испытательных смесей групп I (активизированная 47 % водородно-воздушная смесь) и II, позволяющие проводить расчетную оценку искробезопасности электрических цепей. Дана сравнительная оценка минимальных воспламеняющих токов омической цепи по группе I. Показано, что расчетные и экспериментальные данные имеют удов-

летворительную сходимость. Дальнейшие исследования представляется целесообразным провести в части анализа имеющихся экспериментальных данных минимального воспламеняющего тока.

Список литературы

1. Valery P. Didenko. Metoda szacowania możliwości zapłonu przez wyładowanie w obwodach iskrobezpiecznych // Innowacyjne i bezpieczne systemy mechanizacyjne do eksploatacji surowców mineralnych: KOMAG, Zakopane, 14-16. 11. 2006 r. tom 2, S. 5-9.
2. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь». Технические требования и методы испытаний : ГОСТ 22782.5-78. – Введ. с 01.01.80. – М.: Стандартиздат, 1979. – 70 с.
3. Диденко В.П. Современные подходы к оценке и обеспечению искробезопасности электрических цепей / В.П. Диденко // Уголь Украины. – 2007. – № 9. – С. 39-42.
4. Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «i» : ГОСТ Р 51330.10-99. – Введ. С 01.01.2001. – М.: Госстандарт России, 2000. – 118 с.
5. Explosive atmospheres – Part 11: Equipment protection by intrinsic safety «i» : IEC 60079-11 Ed. 5.0.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2013

В.П. Діденко. Державний Макіївський науково-дослідний інститут з безпеки робіт в гірничій промисловості

Залежності мінімальної запалювальної енергії розряду від його тривалості та швидкості комутації

Розроблено метод і визначено залежності мінімальної запалювальної енергії від тривалості розряду і швидкості комутації для випробувальних сумішей груп I (активізована 47 % воднево-повітряна суміш) і II, що дозволяють проводити розрахункову оцінку іскробезпеки електричних кіл. Дано порівняльну оцінку мінімальних запалювальних струмів омичного ланцюга по групі I.

Ключові слова: іскробезпечність, електричне коло, запалювальна енергія, тривалість розряду, швидкість комутації, випробувальна суміш.

V. Didenko. State Makiivka Research Institute

Dependences of Minimum Igniting Energy of a Discharge on its Duration and Switching Speed

We provide a method and dependences of minimum igniting energy on discharge duration and switching speed for test mixtures of groups I (activated 47 % hydrogen-air mixture) and II, which allow estimating intrinsic safety of electric circuits. Comparative assessment was made for minimum igniting currents of ohmic circuit in terms of group I.

Keywords: intrinsic safety, electric circuit, igniting energy, discharge duration, switching speed, test mixture.