

К.В. КОРИТЧЕНКО, І.С. ВАРШАМОВА

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЕЛЕКТРОДНОГО ПАДІННЯ НАПРУГИ В ІСКРОВОМУ РОЗРЯДІ У ГАЗАХ

Загальний опис теми дослідження. Розглядається проблема дослідження приелектродного падіння напруги в сильноточному іскровому розряді. Актуальність теми. Зростання ефективності електророзрядних генераторів дрібнодисперсних металевих частинок досягається перерозподілом балансу виділення енергії в іскровому розряді між газорозрядним каналом і приелектродними областями. Дослідження даного балансу вимагає вимірювання розподілу потенціалів в розрядному проміжку іскрового розряду. Надмірна складність і висока похибка існуючої техніки дослідження приелектродного падіння напруги в іскровому розряді вимагає подальшого їх розвитку. Метою статті є удосконалення техніки дослідження приелектродного падіння напруги в сильноточному іскровому розряді. Метод досліджень, наукова новизна. Запропоновано техніку визначення приелектродного падіння напруги в іскровому розряді в газах, заснований на вимірюванні напруги на іскровому проміжку і розрахунковому визначенні напруженості електричного поля і нелінійної індуктивності іскрового каналу по експериментальній кривій розрядного струму. Практична значимість і основні висновки. Розроблена техніка дослідження приелектродного падіння напруги в сильноточному іскровому розряді дозволяє визначити шляхи підвищення ефективності електророзрядних генераторів дрібнодисперсних металевих частинок.

Ключові слова: приелектродне падіння напруги, іскровий розряд, техніка вимірювання падіння напруги.

К.В. КОРИТЧЕНКО, И.С. ВАРШАМОВА

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИЭЛЕКТРОДНОГО ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ИСКРОВОМ РАЗРЯДЕ В ГАЗАХ

Общее описание темы исследования. Рассматривается проблема исследования приелектродного падения напряжения в сильноточном искомом разряде. Актуальность темы. Рост эффективности электроразрядных генераторов мелкодисперсных металлических частиц достигается перераспределением баланса выделения энергии в искомом разряде между газоразрядным каналом и приелектродными областями. Исследование данного баланса требует измерения распределения потенциалов в разрядном промежутке искомом разряда. Чрезмерная сложность и высокая погрешность существующей техники исследования приелектродного падения напряжения в искомом разряде требует дальнейшего их развития. Целью статьи является совершенствование техники исследования приелектродного падения напряжения в сильноточном искомом разряде. Метод исследований, научная новизна. Предложено технику определения приелектродного падения напряжения в искомом разряде в газах, основанную на измерении напряжения на искомом промежутке и расчетном определении напряженности электрического поля и нелінійной індуктивності іскрового каналу по експериментальной кривой разрядного тока. Практическая значимость и основные выводы. Разработанная техника исследования приелектродного падения напряжения в сильноточном искомом разряде позволяет определить пути повышения эффективности электроразрядных генераторов мелкодисперсных металлических частиц.

Ключевые слова: приелектродное падение напряжения, искомой разряд, техника исследования падения напряжения.

K.V. KORYTCHENKO, I.S. VARSHAMOVA

IMPROVEMENT OF THE TECHNIQUE FOR RESEARCH ON ELECTRODE VOLTAGE REDUCTION IN SPARK DISCHARGE IN GASES

General description of the research topic. The problem of studying the near-electrode voltage drop in a high-current spark discharge is considered. Relevance of the topic. An increase in the efficiency of electric-discharge generators dispersed metal particles is achieved by redistributing the balance of the energy deposition in the spark discharge between the gas-discharge channel and the electrode regions. The study of this balance requires measuring the distribution of potentials in the discharge gap of the spark discharge. The excessive complexity and high error of the existing technique for studying the near-electrode voltage drop in a spark discharge requires their further development. The aim of the article is to improve the technique for studying the near-electrode voltage drop in a high-current spark discharge. Research method, scientific novelty. A technique is proposed for determining the near-electrode voltage drop in a spark discharge in gases, based on measuring the voltage across the spark gap and calculating the electric field strength and nonlinear inductance of the spark channel from the experimental curve of the discharge current. Practical relevance and key findings. The developed technique for studying the near-electrode voltage drop in a high-current spark discharge allows to determine ways to increase the efficiency of electric-discharge generators of dispersed metal particles.

Key words: near-electrode potential drop, spark discharge, voltage drop research technique.

Введение. Импульсный дуговой разряд приводит к эрозии разрядных электродов (контактов), то исследование процесса выделения энергии разряда в приелектродных областях в импульсной дуге с целью повышения ресурса работы контактов является актуальным. В случае применения импульсной дуги для получения мелкодисперсных металлических частиц возникает обратная задача, направленная на увеличение затрат энергии разряда на эрозию материала электродов [1-3].

Исследование распределения потенциалов в разрядном промежутке стационарных разрядов проводят с

помощью зондовых методов [4]. Данные методы не могут быть использованы для исследования приелектродного падения напряжения в импульсной дуге из-за значительного влияния зонда на разрядные процессы.

Для измерения падения напряжения в приелектродных областях стационарных дуговых разрядов также используют калориметрический метод [5]. Из-за ограниченной скорости теплопередачи, данный метод не используется при исследовании импульсных дуг.

В работе [6] предложено определение приелектродного падения напряжения (суммы катодного и

анодного падения) в сильноточном искровом разряде на основе метода сближения электродов. Суть метода заключается в измерении напряжения на искровых промежутках разной длины при постоянстве остальных параметров разрядной цепи (емкости конденсатора, начального напряжения его заряда и индуктивности разрядной цепи). Далее на фиксированные моменты времени осуществляется построение зависимости напряжения на искровом промежутке от длины этого промежутка. При этом полагается, что имеется линейная зависимость между напряжением и длиной искрового промежутка, имеющая вид [6]:

$$u_t = a_t + E_t l, \quad (1)$$

где u_t – экспериментально измеренное напряжение на искровом промежутке в момент времени t ;

a_t – приэлектродное падение напряжения в момент времени t ;

E_t – напряженность электрического поля в искровом канале;

l – длина искрового промежутка.

Из полученной линейной зависимости $u_t(l)$ приэлектродное падение напряжения определяется путем линейной интерполяции кривой до нулевой длины промежутка. Таким образом, определение изменения во времени приэлектродного падения напряжения и напряженности электрического поля в искровом канале по методу сближения электродов требует повторения осциллографирования напряжения на разрядном промежутке при постоянстве электрических параметров разрядной цепи, но при разной длине искрового промежутка.

Определение приэлектродного падения напряжения по методу сближения электродов является технически сложным. Это связано с тем, что требуется изменять длину разрядного промежутка при одинаковом напряжении заряда конденсатора. Также в методе сближения электродов имеется погрешность измерения падения напряжения на разрядном промежутке импульсной дуги. Это вызвано тем, что расширение токопроводящего канала приводит к изменению его индуктивности и, соответственно, к изменению его реактивного сопротивления. В работах [7, 8] изменение во времени индуктивности искрового канала получено в результате фотографического исследования расширения искрового канала. В свою очередь, применение фотографических исследований значительно усложняет данный метод исследований.

В работе [9] обоснована возможность изменения баланса выделения энергии в приэлектродных областях и в газоразрядном канале импульсной дуги за изменения длины разрядного промежутка и амплитуды разрядного тока. Но в данном обосновании [9] использовалось допущение о постоянстве приэлектродного падения напряжения в полупериодах колебательного затухающего разряда и постоянстве сопротивления канала импульсной дуги, что не соответствует экспериментальным данным [3]. Поэтому предложенный метод расчета баланса может быть использован только для приблизительной оценки.

Целью данной работы является усовершенствование техники измерения приэлектродного падения напряжения в искровом разряде в газах.

Экспериментально-расчетный метод определения приэлектродного падения напряжения в искровом разряде. Развитие вычислительной техники и достигнутый уровень знаний о процессах в искровом разряде позволил разработать математические модели развития искрового разряда на стадии ее перехода в импульсную дугу [10-14]. Данные модели позволяют адекватно описать процессы в искровом канале в широком диапазоне энергий (от десятков микроджоулей до сотни джоулей), что показано в ряде работ [11-14]. В тоже время, падение напряжения в приэлектродных областях в данных моделях учтено косвенным образом через увеличенное сопротивление разрядной цепи.

Учитывая вышеизложенное, предлагается экспериментально-расчетный метод определения приэлектродного падения напряжения в импульсной дуге, основанный на измерении напряжения на искровом промежутке и расчетном определении напряженности электрического поля по экспериментальной кривой разрядного тока. Синхронное осциллографирование напряжения и тока исключает в последующем проблему совмещения во времени измеренного напряжения с расчетной напряженностью электрического поля, определяемой по экспериментальной кривой разрядного тока. При этом становится достаточным провести измерения на разрядном промежутке одной длины. Также, такие измерения не требуют дополнительного включения управляемого разрядника в исследуемую цепь.

Таким образом, изменение приэлектродного падения напряжения во времени $a(t)$ определится по выражению:

$$a(t) = u - El - \frac{d(L_{sp}i)}{dt}, \quad (2)$$

где u и i – измеренные мгновенные значения напряжения и тока на искровом промежутке;

E – текущая расчетная напряженность электрического поля в искровом канале;

l – длина искрового промежутка;

L_{sp} – текущая расчетная индуктивность искрового канала.

Индуктивность искрового канала рассчитывается по выражению [15]

$$L_{sp} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2l}{r_{sp}} \right) - 1 + \frac{4r_{sp}}{\pi l} - \frac{r_{sp}^2}{2l^2} \right], \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная,

r_{sp} – текущий радиус токопроводящего канала искры.

Расчет изменения напряженности электрического поля в искровом канале проведем по модели [11-14] с уточненной проводимостью плазмы на область слабо ионизированного газа. В данной одномерной осесимметричной модели процесс газодинамического расширения искрового канала с процессом передачи тепла за счет теплопроводности в газе с учетом протекания неравновесных химических реакций описывается уравнениями в виде [11-14]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rpu)}{\partial r} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial [r(p + \rho u^2)]}{\partial r} = \frac{p}{r}; \quad (5)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \left[r \left(u \left(\rho \varepsilon + \frac{\rho u^2}{2} + p \right) + k_T \frac{dT}{dt} \right) \right]}{\partial r} +$$

$$+ \frac{\partial \left[\rho \varepsilon + \frac{\rho u^2}{2} \right]}{\partial t} = \sigma E^2 - W_{em}$$

$$\frac{\partial y_i}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r u y_i)}{\partial r} = \omega_i, \quad (7)$$

где r – радиальная координата;

u – скорость среды;

t – время;

p – давление;

ρ – плотность;

ε – внутренняя энергия газа на единицу массы;

k_T – коэффициент теплопроводности;

T – температура;

E – напряженность электрического поля в столбе

разрядного канала;

σ – проводимость плазмы в канале;

W_{em} – удельная мощность излучения;

y_i – молярная концентрация i -й компоненты газа;

ω_i – скорость изменения концентрации i -й компоненты смеси за счет химических реакций.

Система уравнений (4)-(7) дополняется уравнением состояния многокомпонентной газовой смеси, уравнениями химической кинетики, уравнениями Саха, условием квазинейтральности плазмы. Подробно данная модель раскрыта в работах [11-14].

В отличие от предыдущих численных исследований [11-14], в случае моделирования развития искрового канала по предлагаемому методу исключается необходимость использования дифференциального уравнения RLC-цепи. Это вызвано тем, что текущая напряженность электрического поля в этом случае рассчитывается исходя из текущего значения разрядного тока, значение которого берется из результатов измерений. То есть используется выражение

$$E = R_{sp} i / l, \quad (8)$$

где i – экспериментальное значение разрядного тока на текущий момент времени,

R_{sp} – расчетное сопротивление искрового канала, определяемое из расчетного распределения проводимости газа σ по сечению разрядного канала по выражению

$$R_{sp} = l / \int_0^{r_{ch}} 2\pi r \sigma dr, \quad (9)$$

где r_{ch} – радиус расчетной области.

Для расчета изменения напряженности электрического поля в искровом канале в качестве исходных данных используется длина разрядного промежутка, начальное состояние газа в разрядном промежутке и экспериментальные значения разрядного тока.

Верификация математической модели по изменению напряженности электрического поля в искровом разряде. Из линейной зависимости между

напряжением и длиной искрового промежутка, получаемой экспериментально, следует наличие фиксированной напряженности электрического поля на заданное время при разной длине разрядного промежутка. Поэтому, проведем верификацию математической модели по наличию фиксированной напряженности поля на фиксированное время в искровом разряде для заданной разрядной цепи, но разной длине разрядного промежутка.

Численное исследование проведено для искрового разряда в азоте атмосферного давления при длинах искрового промежутка 1 мм и 5 мм для разрядной цепи при $C = 0,25$ мкФ, $L = 2$ мкГн, $U = 15$ кВ, $R = 50$ мОм.

На рис. 1 представлено изменение во времени напряженности электрического поля в искровом канале при длинах искрового промежутка 1 мм и 5 мм.

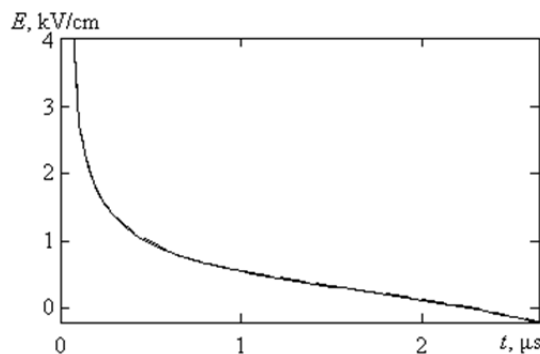


Рис. 1. Расчетное изменение напряженности электрического поля в искровом канале во времени

Данный результат отражает наложение расчетных результатов на одну общую кривую. Таким образом, по результатам численных исследований подтверждено наличие зависимости, близкой к линейной, между напряжением и длиной искрового промежутка. Незначительные отклонения в кривых вызваны отличием в сопротивлениях искры на разных длинах разрядного промежутка, приводящему к отличию в разрядных токах. Такое отличие в разрядных токах также приводит к неточности измерения приэлектродного падения напряжения по методу сближения электродов.

Оценить абсолютную погрешность в определении напряженности электрического поля по методу сближения электродов возможно путем сравнения напряженностей поля, рассчитываемых при разной длине промежутка. Результаты оценки такой погрешности в расчетном варианте представлены на рис. 2. Погрешность выявлена на основании расчета разницы между расчетными напряженностями электрического поля в искровом канале во времени, получаемой при моделировании искрового разряда на длине разрядного промежутка 5 мм и 1 мм.

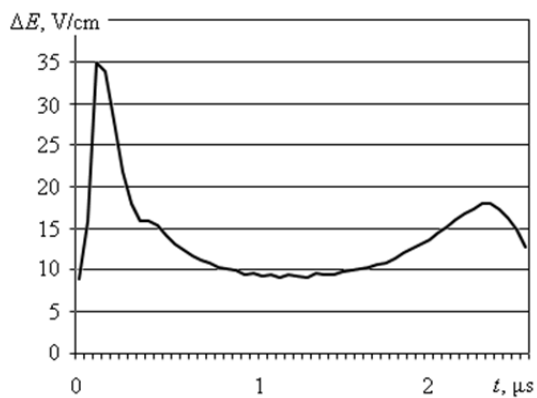


Рис. 2. Изменение абсолютной погрешности определения напряженности электрического поля по методу сближения электродов во времени, вызванное изменением разрядного тока при разряде на длине разрядного промежутка 5 мм и 1 мм

Полученная оценка показывает, что наибольшее отклонение возникает в области низких разрядных токов.

Детальный анализ причины возникновения такой погрешности показал, что это вызвано значительным отличием в разрядном токе, возникающим в процессе завершения первого и начала второго полупериода разряда. Так, распределение проводимости газа вдоль радиальной координаты в расчетных вариантах при моделировании искрового разряда на длине разрядного промежутка 1 мм и 5 мм на одно и тоже время практически совпадает (рис. 3).

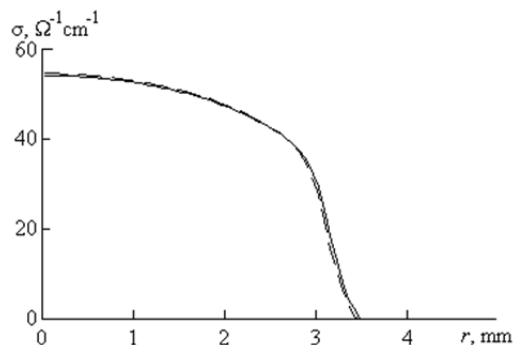


Рис. 3. Распределение проводимости газа вдоль радиальной координаты на время 2,2 мкс

Сопротивление искрового канала с длиной промежутка 1 мм на время 2,2 мкс, определяемое по выражению (8), составляет 7,1 мОм, а на разрядном промежутке 5 мм имеем сопротивление 36 мОм, что на единицу длины дает сопротивление 7,2 мОм/мм. В тоже время, разрядный ток на время 2,2 мкс при длине промежутка 1 мм составляет 444 А, а при длине 5 мм имеем ток 233 А. В результате на время 2,2 мкс напряженность электрического поля, рассчитываемая по выражению (8), при длине промежутка 1 мм составляет 31,5 В/см, а при длине 5 мм имеем 16,8 В/см. Этим подтверждается важность точности совмещения разверток напряжения и тока во времени, получаемых на разной длине промежутка по методу сближения электродов. Такой проблемы не возникает в случае применения рассматриваемого экспериментально-

расчетного метода, так как в обработке используется результаты измерения на одной длине промежутка.

Сравнение результатов измерения приэлектродного падения напряжения по методу сближения электродов и по экспериментально-расчетному методу. Проведем расчет по предлагаемому методу, используя результаты экспериментальных исследований работы [6], и сравним полученные результаты с результатами, получаемыми по методу сближения электродов. В приведенном ниже варианте использованы результаты для разрядной цепи при $C = 0,25$ мкФ, $L = 2$ мкГн, $U = 15$ кВ и $l = 3$ мм для искрового разряда в воздухе атмосферного давления. Представленная в работе [6] осциллограмма тока не позволяет с достаточной точностью задать исходные данные по току. Поэтому для расчета напряженности электрического поля использовался расчетный ток для указанной разрядной цепи. В расчетах сопротивление разрядной цепи равнялось 0,5 Ом, чтобы приблизить расчетный ток к экспериментальной кривой [6].

Изменение проводимости газа (рис. 4) приводит к изменению сопротивления искрового канала (рис. 5).

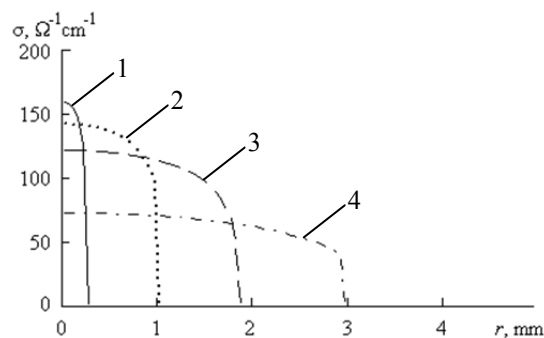


Рис. 4. Распределение проводимости газа в искровом канале вдоль радиальной координаты на время: 1 – 0,1 мкс; 2 – 0,5 мкс; 3 – 1 мкс; 4 – 2 мкс

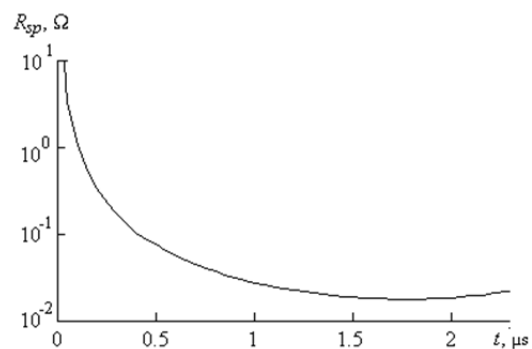


Рис. 5. Зависимость сопротивления искрового канала от времени разряда

Зная сопротивление и разрядный ток, представляется возможным определить изменение напряжения на искровом канале, вызванное его активным сопротивлением. Результаты расчета изменения падения напряжения в газоразрядном канале $u_{arc} = EI$ (без приэлектродного падения напряжения) представлено на рис. 6 (вверху). Для сравнения полученного результата с результатами экспериментальных исследований, на данном рисунке также приведено измеренное

напряжение на разрядном промежутке для данных условий разряда (рис. 6, внизу).

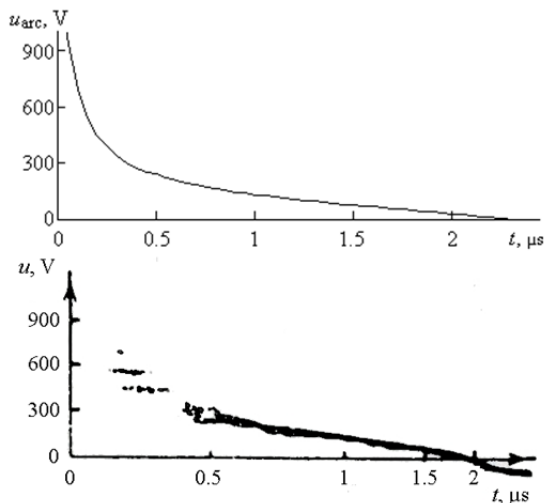


Рис. 6. Вверху: расчетное падение напряжения в газоразрядном канале u_{arc} ; Внизу: измеренное напряжение на разрядном промежутке по данным [2]

Полученный результат отражает корректность полученных результатов. Так, расчетное напряжение на фиксированное время ниже, чем экспериментально измеренное напряжение на разрядном промежутке, включающее падение напряжения в приэлектродных областях и падение напряжения, вызванное реактивным сопротивлением искрового промежутка. Но на 0,25 мкс отличается время снижения напряжения до нулевого значения. Это связано с наличием погрешностей измерения и расчетов, отклонением принятых в расчете параметров разрядной цепи от реальных и влиянием индуктивного сопротивления искрового канала.

Влияние индуктивного сопротивления искрового канала на падение напряжения возможно оценить, зная изменение радиуса токопроводящего канала во времени. По результатам моделирования, зависимость радиуса токопроводящего канала от времени имеет вид (рис. 7).

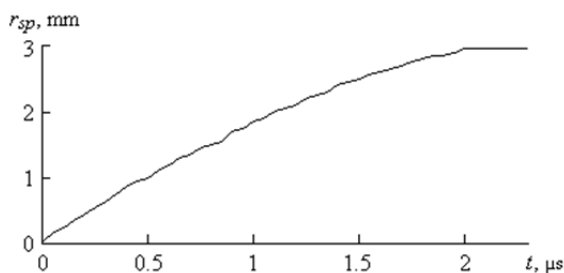


Рис. 7. Зависимость радиуса токопроводящего канала искры от времени разряда

Напряжение на индуктивном сопротивлении искрового канала, рассчитанное по выражению (2) имеет вид (рис. 8).

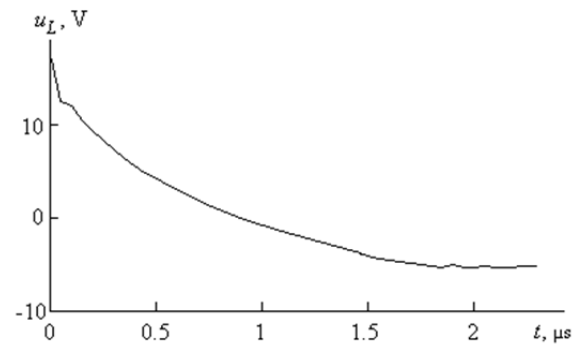


Рис. 8. Напряжение u_L на индуктивном сопротивлении искрового канала

Сравнение величин напряжений на рис. 6 и 8 показывает, что в начальный период разряда напряжение, вызванное активным сопротивлением, значительно превосходит напряжение, вызванное реактивной составляющей сопротивления. Поэтому учет индуктивного сопротивления приводит к незначительной корректировке падения напряжения на искровом канале. Но в конце первого полупериода разряда их величины становятся соизмеримы. Поэтому учет данной составляющей напряжения в расчетном примере привел к снижению разности во времени снижения напряжения до нулевого значения до 0,2 мкс.

Результаты расчета напряжения на искровом канале были нанесены на усредненный график напряжения на искровом промежутке. Результаты совмещения графиков на общей шкале представлены (рис. 9).

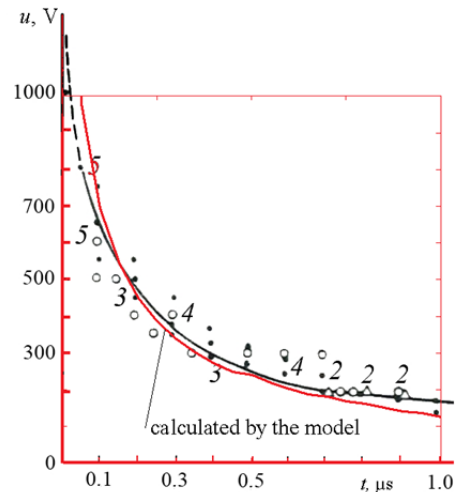


Рис. 9. Усредненное напряжение на искровом промежутке по данным [6], где номера показывают количество измерений в каждой точке, и расчетное напряжение на искровом канале

Анализ кривых напряжений показывает, что на период разряда до 0,2 мкс полученный результат не имеет физического смысла, так как напряжение на искровом канале не может превышать напряжения на искровом промежутке. Следует отметить, что авторы работы [6] отметили наличие трудностей в измерении напряжения на начальной стадии пробоя. Поэтому это дало основание использовать осциллограмму напряжения (рис. 6) для анализа приэлектродного падения напряжения. Результаты нанесения расчетного

напряжения на искровом канале на экспериментальную кривую напряжения на искровом промежутке представлено на рис. 10.

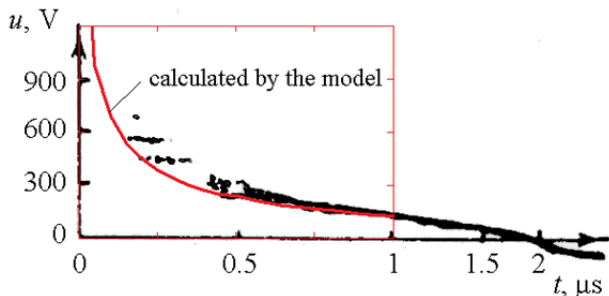


Рис. 10. Осциллограмма напряжения на искровом промежутке по данным [6] и расчетное напряжение на искровом канале

Наблюдается более быстрое падение напряжения в приэлектродных областях, чем получено в работе [6].

Таким образом, двумя методами исследования получено повышенное падение напряжения в приэлектродных областях в период возрастания разрядного тока. Но экспериментально-расчетный метод в исследуемом случае в области малой производной разрядного тока дал более низкие значения приэлектродного падения напряжения, которые характерны для стационарной дуги в газе [16].

Выводы.

Усовершенствована техника исследования приэлектродного падения напряжения в импульсной дуге в газах за счет использования нового метода исследований приэлектродного падения напряжения. Техника основана на измерениях напряжения и тока на искровом промежутке и с последующим расчетом напряженности электрического поля и нелинейной индуктивности искрового канала по экспериментальной кривой разрядного тока.

В результате численных исследований подтверждена близкая к линейной зависимость между напряжением и длиной искрового промежутка, получаемой экспериментально на фиксированные моменты времени. Численными исследованиями показано формирование ошибки измерения падения напряжения по методу сближения электродов в области изменения полярности тока.

Список литературы

1. Voloshko A. Nanoparticle formation by means of spark discharge at atmospheric pressure / A. Voloshko // PhD thesis, Jean Monnet University, Saint-Etienne, France, 2015 – 128 p.
2. Messing M.E. The Advantages of Spark Discharge Generation for Manufacturing of Nanoparticles with Tailored Properties / M.E. Messing // Journal of Green Engineering, Vol. 5, 83–96. doi: 10.13052/jge1904-4720.5346.
3. Kohut A. On the plasma and electrode erosion processes in spark discharge nanoparticle generators / Kohut A. // Ph.D. Dissertation, University of Szeged, 2017. – 109 p.
4. Райзер Ю. П. Физика газового разряда: Научное издание / Райзер Ю. П. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. – 736 с.
5. McIntosh C. Experimental Measurements of Fall Voltages in Gas Metal Arc Welding / C. McIntosh, P. F. Mendez // Welding journal, 2017, Vol. 96. – P.121-132.
6. Абрамсон И. С. Осциллографические исследования искрового разряда / И. С. Абрамсон, Н. М. Гегечкори // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1951. – Т. 21, № 4. – С.

484–492.

7. B. Maas, H. Krompholz, M. Kristiansen, M. Hagler. Arc current voltage and resistance in a high energy gas filled spark gap. Proc. 5th IEEE Pulsed Power Conf., pp. 99-101, 1985-Jun.
8. Krompholz H. Spark gap electrode erosion / H. Krompholz, M. Kristiansen // Report of Texas Tech University AFORS TR-85-0282, 1985, 137p.
9. Mylnikov D.A. Investigation of the Energy Balance in the Spark Discharge Generator for Nanoparticles Synthesis / D.A. Mylnikov, A.A. Efimov, V.V. Ivanov // Journal of Physics: Conf. Series 830 (2017) 012162. doi: 10.1088/1742-6596/830/1/012162.
10. Yasunori Tanaka. Hydrodynamic chemical non-equilibrium model of a pulsed arc discharge in dry air at atmospheric pressure / Tanaka Yasunori, T. Michishita, Y. Uesugi // Plasma Sources Science and Technology. – 2005. – V. 14. – P. 134–151. doi: 10.1088/0963-0252/14/1/016.
11. Korytchenko K.V. Numerical simulation of the energy distribution into the spark at the direct detonation initiation / K.V.Korytchenko, V. I.Golota, D.V.Kudin, O.V. Sakun // Problems of atomic science and technology, 2015, N 3(97). – p. 154-158.
12. Korytchenko K.V. Model of the spark discharge initiation of detonation in a mixture of hydrogen with oxygen / K.V. Korytchenko, E.V. Poklonskii, P.N. Krivosheev // Russian Journal of Physical Chemistry B, September 2014, Volume 8, Issue 5, pp 692-700. doi: 10.1134/s1990793114050169.
13. Korytchenko, K.V., Markov, V.S., Polyakov, I.V., Slepuzhnikov, E.D., Meleshchenko, R.G. Validation of the numerical model of a spark channel expansion in a low-energy atmospheric pressure discharge / Problems of Atomic Science and Technology, 2018. – No4. – p. 144-149.
14. Korytchenko, K.V., Essmann, S., Markus, D., Maas, U., Poklonskii, E.V. Numerical and Experimental Investigation of the Channel Expansion of a Low-Energy Spark in the Air / Combustion Science and Technology, 2018. – in print. doi: 10.1080/00102202.2018.1548441.
15. Калантаров П. Л. Расчет индуктивностей / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – Л.: Атомэнергиздат, 1986. – 481 с.
16. Ширшов И.Г., Котиков В.Н. Плазменная резка. Ленинград: изд-во Машиностроение, Ленинградское отделение. – 1987 г. – 192 с.

References (transliterated)

1. Voloshko A. Nanoparticle formation by means of spark discharge at atmospheric pressure. PhD thesis, Jean Monnet University, Saint-Etienne, France, 2015. 128 p.
2. Messing M.E. The Advantages of Spark Discharge Generation for Manufacturing of Nanoparticles with Tailored Properties. Journal of Green Engineering, 2016, vol. 5, pp. 83–96. doi: 10.13052/jge1904-4720.5346.
3. Kohut A. On the plasma and electrode erosion processes in spark discharge nanoparticle generators. Ph.D. Dissertation, University of Szeged, 2017. 109 p.
4. Raizer Yu.P. Fizika gazovogo razriada: Nauchnoe izdanie [Gas Discharge Physics: Scientific publication]. Dolgoprudny, Publishing House "Intellect", 2009. 736 p.
5. McIntosh C., Mendez P.F. Experimental Measurements of Fall Voltages in Gas Metal Arc Welding. Welding journal, 2017, vol. 96. pp.121-132.
6. Abramson I.S., Gegechkori N.M. Otsillograficheskie issledovaniia iskrovogo razriada. Zhurnal eksperimentalnoi i teoreticheskoi fiziki – Journal of Experimental and Theoretical Physics. 1951. T. 21, no 4. pp. 484–492.
7. Maas B., Krompholz H., Kristiansen M., Hagler M. Arc current voltage and resistance in a high energy gas filled spark gap. Proc. 5th IEEE Pulsed Power Conf., 1985. pp. 99-101.
8. Krompholz H., Kristiansen M. Spark gap electrode erosion. Report of Texas Tech University AFORS TR-85-0282. 1985. 137 p.
9. Mylnikov D.A., Efimov A.A., Ivanov V.V. Investigation of the Energy Balance in the Spark Discharge Generator for Nanoparticles Synthesis. Journal of Physics: Conf. Series. 2017. vol. 830. pp. 012162. doi: 10.1088/1742-6596/830/1/012162
10. Yasunori Tanaka, Michishita T., Uesugi Y. Hydrodynamic chemical non-equilibrium model of a pulsed arc discharge in dry air at atmospheric pressure. Plasma Sources Science and Technology. 2005. V. 14. pp. 134–151. doi: 10.1088/0963-0252/14/1/016.
11. Korytchenko K.V., Golota V.I., Kudin D.V., Sakun O.V. Numerical simulation of the energy distribution into the spark at the direct detonation initiation. Problems of atomic science and technology. 2015, no 3(97). pp. 154-158.
12. Korytchenko K.V., Poklonskii E.V., Krivosheev P.N. Model of the spark discharge initiation of detonation in a mixture of hydrogen with oxygen. Russian Journal of Physical Chemistry B, September 2014, Volume 8, Issue 5, pp. 692-700. doi: 10.1134/s1990793114050169.

- 10.1134/s1990793114050169.
13. Korytchenko K.V., Markov V.S., Polyakov I.V., Slepuzhnikov E.D., Meleshchenko R.G. Validation of the numerical model of a spark channel expansion in a low-energy atmospheric pressure discharge. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2018. No 4. pp. 144-149.
 14. Korytchenko K.V., Essmann S., Markus D., Maas U., Poklonskii E.V. Numerical and Experimental Investigation of the Channel Expansion of a Low-Energy Spark in the Air. *Combustion Science and Technology*, 2018. – in print. doi: 10.1080/00102202.2018.1548441
 15. Kalantarov P. L., Tseitlin L. A. *Raschet induktivnostei* [Calculation of inductances]. Leningrad: Atomenergoizdat, 1986. 481 p.
 16. Shirshov I.G., Kotikov V.N. *Plazmennaya rezka* [Plasma cutting]. Leningrad: Mechanical Engineering Publishing House, Leningrad Branch. 1987. 192 p.

Поступила (received) 07.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

Коритченко Костянтин Володимирович (Корытченко Константин Владимирович, Korytchenko Konstantin Vladimirovich) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри загальної електротехніки; м. Харків, Україна; e-mail: korytchenko_kv@ukr.net.

Варшамова Ірина Сергіївна (Варшамова Ирина Сергеевна, Varshamova Iryna Sergeevna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7411-2302>; e-mail: varshamova.i.s@gmail.com.