

## ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОДНИКОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ БОЛЬШИХ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

Баранов М.И., д.т.н.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"  
тел. (0572) 40-08-41, факс (0572) 40-01-33, E-mail: nipkimolniya@kpi.kharkov.ua

*Отримана наближена формула для розрахункового визначення мінімальної середньомасової температури плазми на початкової стадії електричного вибуху у повітрі немагнітних циліндричних провідників під інтенсивної короткочасної дією великих імпульсних струмів, які генерують у розрядному контурі високовольтних електрофізичних установок з ємкісними нагривачами енергії.*

*Получена приближенная формула для расчетного определения минимальной среднemasсовой температуры плазмы на начальной стадии электрического взрыва в воздухе немагнитных цилиндрических проводников под интенсивным кратковременным воздействием больших импульсных токов, генерируемых в разрядном контуре высоковольтных электрофизических установок с емкостными накопителями энергии.*

### ВВЕДЕНИЕ

Электрический взрыв (ЭВ) проводников, являющийся одним из важных составных технических элементов в разветвленной сети современных электро-технологий, находит широкое применение в высоко-точных электрических цепях высоковольтных электрофизических установок (ВЭФУ) с емкостными накопителями энергии (ЕНЭ) для генерирования больших импульсных токов (БИТ), используемых в научных, прикладных технических и технологических целях. Автором в работе [1] приведен весьма обширный обзор литературных источников по эволюции изучения и практического применения в высоковольтной импульсной технике, импульсной светотехнике, сильноточной электронике, технике и физике плазмы, а также в технике сильных электрических и магнитных полей явления ЭВ проводников под кратковременным воздействием высоких плотностей импульсного тока. Из данного обзора следует, что одними из перспективных применений электрически взрывающихся проводников являются их использование в лабораторных условиях в качестве импульсного источника света, высоких и сверхвысоких температур [8]. Световое излучение при ЭВ проводников, по данным работ [7,11], возникает в его начальной фазе в момент исчезновения металлической проводимости проводника, что по времени совпадает с появлением пика электрического напряжения на электродах, к которым подсоединяется электрически взрывающийся проводник. На данной стадии ЭВ проводника спектр его излучения является сплошным. На последующей фазе его ЭВ – стадии дугового разряда возникает интенсивная вспышка света. Здесь спектр светового излучения носит, в основном, непрерывный характер с наложенными линиями, характерными для материала проводника и газа его окружающего [7,8]. Образующаяся продуктами электровзрыва проводника в сильноточном канале разряда низкотемпературная плазма аккумулирует вводимую от ЕНЭ электротепловую энергию, постепенно расходуя ее на радиальное расширение канала разряда и световое излучение [11].

Отметим, что измерение температуры продуктов взрыва проводника в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ является и сегодня сложной и трудоемкой научно-технической задачей, сопряженной с внесением больших погрешностей в ее опытное определение. Так, согласно [2] яркостная (поверхностная) температура сильнооточного искрового разряда в его дуговой стадии, измеренная с применением временной развертки по отношению к интенсивности спектральных линий светового излучения, составляла от 4727 до 9727 °С. По экспериментальным данным работы [3] яркостная температура на начальной стадии ЭВ в воздухе круглой медной проволоки диаметром 0,15мм принимала значения от 8927 до 9227 °С. При этом опытное определение температуры взрыва проволоки осуществлялось по самообращенным спектральным линиям и спектрам поглощения меди. Косвенные измерения температуры при ЭВ проводника, базирующиеся на опытном определении проводимости продуктов взрыва медной проволоки в вакууме, свидетельствуют о том, что среднemasсовая (среднеобъемная) температура плазмы, образующейся при ЭВ этого проводника, принимает значение около 9727 °С или 10<sup>4</sup> К [9]. В [4,5] отмечается, что на дуговой стадии сильнооточного искрового разряда в цепи ВЭФУ с ЕНЭ и электрически взрывающимся проводником, используемым в мощных импульсных электроразрядных источниках света, возможно получение сверхвысоких температур (в десятки и сотни эВ). Заметим, что 1эВ примерно равен 11327 °С [6]. Кроме того, в [10] при расчетной оценке максимальной температуры взрыва в вакууме круглой литиевой проволоки диаметром 0,127мм и длиной 10мм, включенной в разрядную цепь ВЭФУ с ЕНЭ, в случае, когда запасаемая электрическая энергия в ЕНЭ составляла 100кДж, а время введения с помощью БИТ электротепловой энергии в проволоку было равно 200нс, приведено приблизительное значение ее предельной температуры в 10эВ (113270 °С). Имеющиеся результаты указывают на то, что при ЭВ проводников в конденсированных средах могут достигаться очень

высокие температуры. Так, при подводном электро-взрыве медного проводника экспериментально зафиксированные пиковые значения яркостной температуры достигают величин от 20727 до 27727 °С, а при ЭВ алюминиевого проводника в тех же условиях – от 25727 до 35727 °С [8]. В соответствии с [11,12] среднемассовая температура плотной низкотемпературной плазмы, образованной при ЭВ круглых проводников в сильноточном канале подводного искрового разряда, может достигать значений от 9727 до 499727 °С. Причем, температура плазмы в центре канала подводного искрового разряда оказывается примерно в 1,5-2 раза выше ее яркостной или поверхностной температуры, измеренной в сплошном спектре светового излучения.

В [11] на основе статистической обработки экспериментальных данных приведена формула (2.37) для грубой расчетной оценки температуры плазмы с энергией в разряде ЕНЭ ВЭФУ до 100кДж и для ограниченных диапазонов изменения основных электрических параметров ее разрядной цепи. В данную громоздкую формулу входит ряд эмпирических коэффициентов для степенных рядов, затрудняющих понимание физического смысла в длинной цепочке выполняемых математических операций по приближенному расчету температуры продуктов электровзрыва проводника.

Целью настоящей статьи является получение простого аналитического соотношения для приближенного расчета минимальной среднемассовой температуры продуктов взрыва немагнитных цилиндрических проводников в воздушной атмосфере на начальной стадии их ЭВ в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ.

#### ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Считаем, что для исследуемых неизолированных круглых немагнитных цилиндрических проводников выполняется следующее соотношение:  $l/d \gg 1$ , где  $l$ ,  $d$  - соответственно длина и диаметр прямолинейного проводника, включенного в разрядную цепь ВЭФУ с ЕНЭ. Пусть атмосферные условия воздушной среды, в которой размещены исследуемые проводники, соответствуют нормальным (давление воздуха составляет  $1,013 \cdot 10^5$  Па, а его температура равна  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ ). Примем, что при решении рассматриваемой задачи выполняются следующие допущения:

1. Электротепловыми потерями на теплоотдачу в окружающую проводник воздушную среду и диссипацией в разрядном контуре ВЭФУ с ЕНЭ электромагнитной энергии можно пренебречь [8].

2. Радиальные распределения плотности импульсного тока и температуры по поперечному сечению проводника как до, так и в процессе его ЭВ носят равномерный характер [8].

3. Скорость нарастания температуры проводника является постоянной в течение развития начальной стадии его ЭВ, т.е. стадии плавления и фазового перехода жидкий металл - металлический пар.

4. Удельная теплоемкость материала проводника на начальной стадии взрывообразного разрушения его металлической структуры остается практически неиз-

менной в процессе ЭВ проводника [8].

5. Максимальная температура проводника при ЭВ достигается в момент его электровзрывного разрушения, сопровождающегося разлетом в радиальном направлении перегретого материала проводника.

Требуется с учетом принятых допущений получить приближенное соотношение для аналитического расчета на начальной стадии ЭВ немагнитных цилиндрических проводников минимальной среднемассовой температуры образующегося после их взрыва в воздухе сильноточного плазменного канала искрового разряда в электрической цепи ВЭФУ с ЕНЭ.

#### ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

В [1] автором было показано, что минимальное расчетное значение критической плотности электро-тепловой энергии  $W_{km}$  (Дж/м<sup>3</sup>) в электрически взрывающемся проводнике может быть определено из следующего выражения:

$$W_{km} = \frac{J_k(1 + \theta_k c_0 \beta_0)}{\gamma_0}, \quad (1)$$

где  $\gamma_0$  - удельная электропроводимость материала проводника до воздействия на него БИТ, т.е. при температуре окружающей воздушной среды, равной комнатной  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$  (для алюминия  $\gamma_0 = 3,61 \cdot 10^7$  См/м; для меди  $\gamma_0 = 5,81 \cdot 10^7$  См/м [6]);  $c_0$  - удельная теплоемкость, отнесенная к единице объема материала проводника (для алюминия  $c_0 = 2,7 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>·°С; для меди  $c_0 = 3,92 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>·°С [6]);  $\theta_k = (\theta_m - \theta_0)$  - минимальное критическое превышение температуры материала проводника;  $\theta_m$  - температура кипения материала проводника (для алюминия  $\theta_m = 2450^\circ\text{C}$ ; для меди  $\theta_m = 2590^\circ\text{C}$  [13]);  $\beta_0$  - тепловой коэффициент удельной электропроводимости материала проводника (для алюминия  $\beta_0 = 2,14 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/Дж; для меди  $\beta_0 = 1,31 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/Дж [6]);  $J_k$  - критическое значение интеграла тока для проводника при его ЭВ (при  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$  для алюминия  $J_k = 1,09 \cdot 10^{17}$  А<sup>2</sup>·с·м<sup>-4</sup>, а для меди  $J_k = 1,95 \cdot 10^{17}$  А<sup>2</sup>·с·м<sup>-4</sup> [6]).

Определенная по (1) величина  $W_{km}$  представляет собой минимальную удельную энергию электротеплового разрушения материала проводника при его ЭВ, численное значение которой приближается к удельной теплоте сублимации материала проводника [1,8].

Для реальных лабораторных условий ЭВ проводника в разрядном контуре ВЭФУ с ЕНЭ значение критической плотности электротепловой энергии  $W_k$ , вводимой в электрически взрывающийся цилиндрический проводник, может быть найдено из следующего приближенного соотношения:

$$W_k \approx \frac{4W_0}{\pi d_k^2 l_k}, \quad (2)$$

где  $W_0$  - электрическая энергия, запасенная в ЕНЭ ВЭФУ;  $d_k, l_k$  - соответственно критические значения диаметра и длины электрически взрывающегося проводника [1].

В этой связи на практике при надежном осуществлении ЭВ цилиндрических проводников в разрядной цепи ВЭФУ с ЕНЭ должно выполняться следующее неравенство:

$$W_k > W_{km}. \quad (3)$$

Для скорости нарастания минимальной средне-массовой температуры  $\theta_{km}$  сильноточного плазменного канала искрового разряда на начальной стадии ЭВ проводника имеем [1]:

$$\frac{d\theta_{km}}{dt} = c_0^{-1} \frac{dW_{km}}{dt}, \quad (4)$$

где  $\frac{dW_{km}}{dt} = \frac{\delta_{km}^2 (1 + \theta_k c_0 \beta_0)}{\gamma_0}$  - скорость ввода минимальной критической плотности электротепловой энергии  $W_{km}$  в электрически взрывающийся проводник;  $\delta_{km}$  - минимальная критическая плотность аксиального тока во взрывающемся проводнике, численные значения которой для медной проволоки и различных видов БИТ приведены в [1].

Из (4) следует, что чем больше плотность тока  $\delta_k \geq \delta_{km}$  во взрывающемся проводнике, тем выше скорость ввода критической удельной электротепловой энергии в проводник и соответственно выше скорость нарастания его температуры. Причем, в рассматриваемом случае согласно (4) данная скорость нарастания температуры будет обратно пропорциональна значению критического диаметра проводника, возведенному в четвертую степень, т.е.  $d_k^4$ . Этот теоретический результат соответствует в полной мере опытным данным из работы [11], где экспериментальным путем было установлено то, что при неизменных электрических параметрах ВЭФУ с ЕНЭ скорость роста температуры при ЭВ проводника малого диаметра намного выше, чем при электровзрыве проводника из того же материала, но большего диаметра.

Тогда с учетом принятых допущений для минимальной средне-массовой температуры  $\theta_{km}$  плазменных продуктов на начальной стадии взрыва в воздухе немагнитного цилиндрического проводника, включенного в разрядную цепь ВЭФУ с ЕНЭ, получаем следующее приближенное выражение:

$$\theta_{km} = t_e \frac{d\theta_{km}}{dt}, \quad (5)$$

где  $t_e = W_{km} / dW_{km} / dt$  - время до электровзрыва проводника с плотностью тока  $\delta_{km}$  [1].

После элементарных преобразований на основании выражений (1), (4) и (5) окончательно для минимальной средне-массовой температуры  $\theta_{km}$  плазмы, получаемой при ЭВ в воздушной среде атмосферного давления цилиндрического проводника, запишем:

$$\theta_{km} = W_{km} \cdot c_0^{-1} \frac{J_k (1 + \theta_k c_0 \beta_0)}{c_0 \gamma_0}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что чем больше  $W_{km}$  и меньше  $c_0$ , тем будет выше и значение минимальной средне-массовой температуры  $\theta_{km}$  плазмы электровзрыва проводника. Если подставить в (6) вместо минимальной критической плотности электротепловой энергии  $W_{km}$ , определяемой из выражения (1), рассчитанную по (2) и (3) реально достигаемую в электрически взрывающемся проводнике критическую удельную электротепловую энергию  $W_k$ , то с помощью указанной выше формулы (6) можно выполнить и приближенную расчетную оценку "сверху" средне-массовой температуры  $\theta_{kc}$  электровзрыва исследуемого проводника. При этом в соответствии с (2) значения  $\theta_{kc}$  оказываются обратно пропорциональны квадрату критического диаметра проводника, т.е. величине  $d_k^2$ . Поэтому при электровзрыве тонких круглых проводников будут достигаться большие значения средне-массовой температуры  $\theta_{kc}$  плазмы, чем при использовании толстых электрически взрывающихся цилиндрических проводников. Это утверждение, вытекающее из полученных нами результатов расчета  $\theta_{kc}$ , было ранее подтверждено экспериментальным путем применительно к среднейкостной температуре плазменного канала разряда, инициированного взрывающимся проводником [11].

Из (6) видно, что минимальная средне-массовая температуры  $\theta_{km}$  плазмы при ЭВ проводника монотонно возрастает с увеличением критической электротепловой энергии, приходящейся на единицу объема электрически взрывающегося проводника. Это соответствует результатам экспериментальных исследований ЭВ в различных газах цилиндрических проводников, применяемых в мощных импульсных электроразрядных источниках света [4,5]. Поэтому для получения больших и возможно рекордных значений средне-массовой температуры плазмы  $\theta_{kc}$  при ЭВ заданного проводника необходимо использовать условие (3), т.е. рабочее значение электрической энергии  $W_0$  согласно (2) выбирать максимально возможным для применяемого разрядного контура ВЭФУ с ЕНЭ.

#### ПРИМЕР РАСЧЕТА СРЕДНЕМАССОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ ПРИ ЭВ ПРОВОДНИКА

Выполним по полученной формуле (6) расчетную оценку минимальной средне-массовой температуры плазмы  $\theta_{km}$  при ЭВ в воздухе алюминиевого и медного круглых цилиндрических проводников, включенных в разрядный контур ВЭФУ с ЕНЭ. Из (1) следует, что в нашем случае для алюминиевого проводника величина минимальной критической удельной электротепловой энергии  $W_{km}$  принимает значение  $W_{km} = 4,57 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup>, а для медного проводника -  $W_{km} = 4,76 \cdot 10^{10}$  Дж/м<sup>3</sup>. В результате из (6) при извест-

ных значениях удельной теплоемкости  $c_0$  рассматриваемых материалов электрически взрывааемых проводников (см. формулу (1)) получаем, что при ЭВ алюминиевого проводника минимальная среднемассовая температуры  $\theta_{km}$  плазмы численно составляет примерно значение  $\theta_{km} = 16926$  °С, а при ЭВ медного проводника – примерно  $\theta_{km} = 12143$  °С. Полученные нами расчетные данные для  $\theta_{km}$  при ЭВ в воздухе круглых алюминиевых и медных цилиндрических проводников удовлетворительно согласуются с соответствующими экспериментальными данными, представленными в [3,8], для среднемассовой температуры плазмы канала воздушного сильноточного искрового разряда, формируемого при ЭВ круглых цилиндрических проволок из алюминия и меди.

### ВЫВОДЫ

1. Получена простая формула (6) для приближенного аналитического расчета минимальной среднемассовой температуры плазмы  $\theta_{km}$  на начальной стадии ЭВ в воздухе немагнитных цилиндрических проводников, испытывающих интенсивное кратковременное воздействие БИТ, генерируемых в разрядном контуре ВЭФУ с ЕНЭ.

2. Минимальная среднемассовая температура  $\theta_{km}$  плазмы, образующейся в воздушной среде при ЭВ проводника, прямо пропорциональна минимальной критической удельной электротепловой энергии  $W_{km}$ , рассчитываемой по формуле (1), и обратно пропорциональна удельной теплоемкости  $c_0$  материала проводника.

3. Показано, что среднемассовая температура  $\theta_{kc} \geq \theta_{km}$  воздушного электровзрыва немагнитного цилиндрического проводника определяется количеством вводимой в него электротепловой энергии  $W_k \geq W_{km}$ , приходящейся на единицу объема материала электрически взрывааемого проводника, которая согласно формулы (2) прямо пропорциональна запасаемой электрической энергии  $W_0$  в ЕНЭ ВЭФУ.

4. Установлено, что применение при ЭВ в воздухе алюминиевого цилиндрического проводника по сравнению с медным цилиндрическим проводником тех же геометрических размеров при идентичных значениях запасаемой электрической энергии  $W_0$  в ЕНЭ ВЭФУ позволяет обеспечить получение больших значений минимальной среднемассовой температуры  $\theta_{km}$  образующейся при их взрыве плазмы сильноточного канала искрового разряда.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Баранов М.И. Упрощенная математическая модель электрического взрыва проводников под воздействием больших импульсных токов// Электротехника і електромеханіка.-2003.-№3.-С.59-64.
- [2] Взрывающиеся проволоки/ Под ред. А.А. Рухадзе. - М.: Изд-во ИЛ, 1963.-342с.
- [3] Ильин Г.Г., Нурматов Э.М., Фишман И.С. Определение температуры и других параметров плазмы взрывающейся проволоки по самообращенным спектральным линиям и спектрам поглощения// Теплофизика высоких температур.-1975.-т.13.-№2.-С.288-294.
- [4] Александров А.Ф., Рухадзе А.А. Сильноточные электроразрядные источники света// Успехи физических наук.-1974.-т.112.-№2.-С.195-230.
- [5] Александров А.Ф., Рухадзе А.А. Физика сильноточных электроразрядных источников света. - М.: Атомиздат, 1976.-184с.
- [6] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.-М.: Мир, 1972.-391с.
- [7] Абрамова К.Б., Перегуд Б.И. Излучение металлов при электрическом взрыве// Журнал технической физики.-1971.-т.41.-№10.-С.2216-2225.
- [8] Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии/ Под ред. В.Н. Карнюшина.-Минск: Наука и техника, 1983.-151с.
- [9] Шуманов В.С. Измерение параметров плазмы, образующейся при электрическом взрыве проволоки в вакууме// Журнал прикладной спектроскопии.-1971.-т.14.-№2.-С.209-211.
- [10] Роуз К. Максимальная температура взрыва проволок в вакууме/ В кн. пер. с англ.: Электрический взрыв проводников.-М.: Мир, 1965.-С.43-46.
- [11] Гулый Г.А. Научные основы разрядноимпульсных технологий.-Киев: Наукова думка, 1990.-208с.
- [12] Пасечник Л.Л., Старчик П.Д., Федорович О.А. Измерение температуры подводного взрыва проволок в условиях развитых нестабильностей в канале разряда// Тезисы докл. I Всесоюз. конф.: Электрический разряд в жидкости и его применение в технологии машиностроения и металлообработке (г. Николаев, 1976).-Киев: Наукова думка, 1976.-С.32-39.
- [13] Кухлинг Х. Справочник по физике/ Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. - М.: Мир, 1982.-520с.

Поступила 03.07.03