

ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ В ВОДЕ И ВОЗДУХЕ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, defr@iipr.com.ua*

Введение. Электрический взрыв проводников (ЭВП) продолжает достаточно активно исследоваться в последние десятилетия. Интерес к этому явлению обусловлен бурным развитием физики высоких плотностей энергий, изучением экстремальных состояний вещества при высоких давлениях и температуре, рядом практических применений, связанных с современными исследованиями в области энергетики, инерциального термоядерного синтеза, космической техники, нанотехнологий, в частности технологии получения наноразмерных порошков чистых металлов и их соединений [1, 2]. В целом механизм разрушения проводников при протекании по ним тока различной плотности изучен достаточно подробно. Создан ряд моделей, способных дать качественно полную картину разряда через взрывающиеся тонкие металлические проволочки и последующей МГД эволюции системы. Однако некоторые явления, происходящие при ЭВП, оказываются достаточно сложными для строгих теоретических исследований. Поэтому по-прежнему актуальна задача получения соотношений, описывающих взаимосвязь характера выделения энергии в проводнике в процессе взрыва с его физическими свойствами, основанных на методах теории подобия. Среди множества публикаций на эту тему следует выделить монографию [3], содержащую как обзор публикаций, так и авторские результаты, посвященные подобию ЭВП в воде. Там же приведены соотношения, полученные автором, для определения так называемых оптимальных параметров взрываемых в воде проводников, обеспечивающих максимальную скорость выделения энергии в проводнике. Эти соотношения, на наш взгляд, и по сей день являются наиболее удачными и точными. На основе этих соотношений нами в [4] было установлено, что для оптимальных режимов ЭВП, когда вся энергия, запасенная в конденсаторе, вводится в проводник в течение первого полупериода разряда, отношение запасенной энергии $W_0 = CU_0^2/2$ к массе взрываемого в воде проводника m , не зависит от его размеров и параметров разрядного контура. Поскольку это отношение служит своего рода «интегралом» свойств проводника, не исключено, что оно может также являться размерным критерием подобия характеристик ЭВП. Это косвенно подтверждается использованием отношения W/m в классификации режимов ЭВП, основанной на скорости ввода энергии в проводник [5]. Ниже будет показано, что отношение W_0/m действительно можно использовать как приближенный критерий подобия электрических характеристик ЭВП в RLC -цепи.

Кроме того, известно, что соотношения для оптимальной длины и диаметра проводника [3] и соответственно отношение $(W_0/m)_{opt}$, полученное нами на их основе [4], явно не содержат параметров окружающей проводник среды. Поэтому цель настоящей работы – установление аналогичных соотношений для взрыва в воздухе и сравнения их с полученными ранее для воды.

Подобие электрических характеристик ЭВП в воде, как мы уже указывали выше, описывается соотношениями (4.11), (4.15) и (4.16) монографии [3]. Там же, на стр. 129, приведены безразмерные кривые тока разряда (см. рис. 43) для случаев, когда критерии подобия II_2 и $II_3 = idem$ при взрыве медных и алюминиевых проводников. Несмотря на то что все размерные постоянные, характеризующие как разрядную цепь, так и сам исследуемый образец, отличаются при этом весьма значительно

(см. табл.1), нормированные $(\bar{i} = \frac{I}{U_0} \sqrt{\frac{L}{C}}$, где I – измеряемый ток, U_0 – начальное напряжение, L

и C – индуктивность и емкость контура; $\bar{t} = t/\pi\sqrt{LC}$, t – «физическое» время») кривые тока разряда практически совпадают. Также удовлетворительно совпадают и пики перенапряжения в этих опытах. Мы ссылаемся на эти данные, поскольку такой эксперимент является достаточно трудоемким – необходимо каждый раз настраивать измерительную цепь под существенно отличающиеся параметры разрядного контура. В табл. 1 приведены основные электрические параметры (U_0 , C , L) этих опытов,

параметры взрываемого проводника (d – диаметр, l – длина), значения критериев подобия Π_2 и Π_3 , величина относительного индуктивного пика перенапряжения U_{peak}/U_0 , содержащиеся в табл. 11 монографии [3] (стр.130).

Таблица 1

Материал проводника	d , мм	l , мм	U_0 , кВ	C , мкФ	L , мкГн	Π_2	$\Pi_3 \cdot 10^2$	U_{peak}/U_0	W_0/m , кДж/г	$(W_0/m)_{opt}$, кДж/г
Cu	0,30	116	40	3,0	2,26	0,38	3,17	3,2	32,78	20,56
Cu	0,51	100	18	34,6	2,53	0,35	3,30	3,7	30,73	20,56
Cu	0,66	100	14	99,0	3,0	0,35	3,30	3,6	31,76	20,56
Cu	0,33	67	8	48,0	10,6	0,35	3,05	3,7	30,02	20,56
Al	0,41	68	8	47,6	11,8	0,38	3,14	3,3	62,84	44,35

Кроме материалов табл.11 из [3], в табл. 1 включены значения отношения запасенной энергии к массе проводника W_0/m для каждого из приведенных в таблице режимов взрыва, а также расчетные значения этого отношения для оптимальных режимов взрыва проводников из данных металлов $(W_0/m)_{opt}$ [4], рассчитанные по табличным данным. Как видно из таблицы, для медного проводника отношение W_0/m сохраняется практически постоянным для всех представленных режимов. Расхождения между различными режимами не превышают расхождения для других рассчитываемых параметров. Для второго и третьего проводников, при полном совпадении Π_2 и Π_3 , это расхождение составляет около 3%. Учитывая погрешность эксперимента, превышающую 5%, и приближенный характер критериев Π_2 и Π_3 , можно утверждать, что для всех выбранных в [3] режимов взрыва медных проводников отношение W_0/m характеризует их с такой же точностью, как и указанные критерии подобия. При этом простота и удобство пользования отношением W_0/m по сравнению с набором критериев подобия несравнимы.

Для того чтобы оценить, насколько универсальным может быть подход, базирующийся на отношении W_0/m , вычислим отношение этих величин для четвертого медного и алюминиевого проводников, имеющих наиболее полно совпадающие осциллограммы тока [3], и получим значение 2,09. Такое же отношение значений $(W_0/m)_{opt}$, вычисленных по табличным данным, для этих же металлов составит 2,16 (расхождение – те же 3%). Таким образом, определение подобных режимов взрыва с использованием простого параметра W_0/m возможно для проводников из любого материала по данным, скажем, для меди или алюминия, или любых других металлов. Алгоритм пользования этим отношением предельно прост. Если необходимо повторить какой-либо режим взрыва (скажем, медного проводника для никелевого проводника), берется отношение W_0/m из эксперимента для меди, табличные значения $(W_0/m)_{opt}$ для никеля и меди делятся друг на друга и полученный коэффициент умножается на известное отношение W_0/m для меди. Таким образом получается требуемое отношение W_0/m для никеля. Исходя из этого отношения, несложно подобрать параметры взрыва для имеющегося в наличии никелевого проводника с подобным характером кривых тока и напряжения.

Оптимальные параметры проводников при взрыве в воздухе. Классической работой, посвященной применению теории подобия к расчету характеристик ЭВП в воздухе, является [6]. В ней получены два критерия подобия электрических характеристик начальной стадии взрыва проводников в воздухе. Первый – Π_1 , характеризующий приближенное подобие начальной стадии взрыва (первого импульса тока), полностью совпадает с приведенным в более поздней работе [7] критерием для взрыва проводников в воде. Второй – Π_2 , обуславливающий фазу взрыва, содержит некоторую не определенную автором константу материала взрывающегося проводника h^* , имеющую размерность удельного действия. Сравнение этого Π_2 со вторым критерием, приведенным в [7], позволяет предположить, что, вероятней всего, эту константу с точностью до постоянного множителя можно определить как $h^* = \rho \sigma_0 (\lambda + \gamma)$, где ρ – плотность, σ – удельная электропроводность, λ и γ – удельные теплоты плавления и испарения материала проводника. Это может следовать из решения уравнения баланса энергии при взрыве проводника, приведенного в работе [8] в виде

$$\frac{de}{g(e)} = \frac{R_0 i^2}{m} dt, \quad (1)$$

где e , R_0 и m – соответственно удельная энергия, сопротивление проводника в холодном состоянии и его масса, а i – ток в момент времени t . Интегрирование (1) до момента взрыва дает в правой части «интеграл действия», а в левой – интеграл Стильтьеса, зависящий только от свойств материала проводника, который при использовании принятой в [3] нормировки и даст соответствующее выражение. Тогда второй критерий для взрыва проводника в воздухе будет иметь вид

$$P_2 = \frac{CU_0^2}{zd^4 \rho \sigma_0 (\lambda + \gamma)}, \quad (2)$$

где $z = \sqrt{L/C}$ – волновое сопротивление цепи, d – диаметр взрывающегося проводника.

Третий критерий, «отвечающий» за подобие электрических характеристик взрыва проводников на дуговой стадии, предложен впервые (и, насколько нам известно, только в работе [7]):

$$P_3 = \frac{Al^2}{U_0^2 \pi \sqrt{LC}}. \quad (3)$$

Здесь A – искровая постоянная, l – длина проводника. Для металлических проводников, вне зависимости от материала, $A = 10^4 \text{ В}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^2$. Точный, экспериментально подтвержденный вид критерия P_3 для воздуха может несколько отличаться от (3), но только лишь на константу-множитель, поскольку для его получения использовались методы теории подобия, а исходные уравнения, описывающие процесс взрыва, в обоих случаях практически идентичны. Методика определения оптимальных параметров, как показано ниже, строится на анализе и обработке массива экспериментальных данных, так что это обстоятельство не может повлиять на результат.

Опираясь на критерии P_2 и P_3 , можно получить соотношения для определения оптимальных параметров взрывающегося проводника в воздухе. Поиск оптимальных параметров проводника основывается на определении максимума скорости выделения энергии в проводник $\bar{N}_{\max} = f(P_1, P_2, P_3)$ – нахождение оптимальных условий ЭВП является решением задачи на экстремум для этой функции. Здесь \bar{N}_{\max} – безразмерная скорость выделения энергии в проводник, определявшаяся нами экспериментально для различных P_1, P_2, P_3 . Обозначая значения критериев подобия взрыва проводников в воздухе, соответствующие оптимальным условиям взрыва, как некоторые константы $P_1 = a_1; P_2 = a_2; P_3 = a_3$, нормированное значение максимальной скорости введения энергии можно представить как

$$\bar{N}_{\max} = f(P_1, P_2, P_3) \Big|_{P_1=a_1; P_2=a_2; P_3=a_3} = a. \quad (4)$$

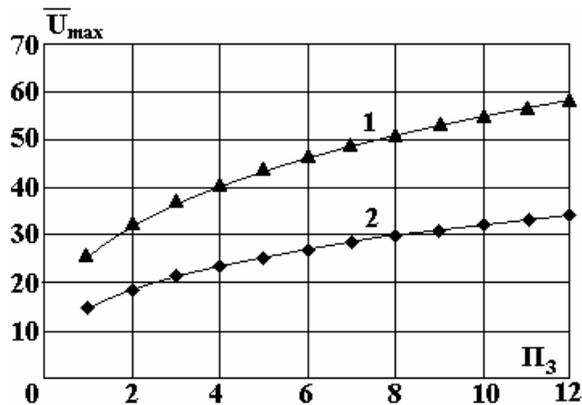
Учитывая нормировочные коэффициенты для времени ($2/T_0$), тока ($1/I_0$), напряжения ($1/U_0$) и мощности ($1/U_0 I_0$, или $T_0/4\pi W_0$), для максимальной скорости введения энергии несложно получить (в размерном виде) $N_{\max} = a \frac{4\pi W_0}{T_0}$. Геометрические размеры проводника, соответствующие оптимальным условиям взрыва, могут быть найдены из выражений для P_2 и P_3 :

$$\begin{cases} d_{opt} = \sqrt{\frac{CU_0^2}{a_2 z \rho \sigma (\lambda + m)}}; \\ l_{opt} = \sqrt{\frac{a_3 U_0^2 \pi \sqrt{LC}}{A}}. \end{cases} \quad (5)$$

Для определения максимума скорости выделения энергии в проводник и получения по (5) d_{opt} и l_{opt} нами использовался массив экспериментальных данных по ЭВ медных и алюминиевых проводников, полученных в Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины ранее В.Скорых и В. Шоломом. В проанализированных нами экспериментах главным образом использовался накопитель на конденсаторах ИМ-50-3, емкость варьировалась от 3 до 99 мкФ, индуктивность – с помощью многовитковой катушки от 1 до 10 мкГн. На осциллограммах тока и напряжения, полученных с помощью осциллографов ОК-21 или ОК-25, мы измеряли напряжение в пике и соответствующее этому моменту значение тока – таким образом определялось \bar{N}_{\max} . На выбор режимов накладывались та-

кие же ограничения, как и в [7]: анализу подвергались только осциллограммы беспузных режимов взрыва, причем таких, у которых время достижения первого максимума тока не превышает четверти периода собственных колебаний контура.

На рисунке приведена зависимость $\bar{U}_{\max} = f(\Pi_3)$ для параметрических значений $\Pi_2 = 0,5$ (верхняя кривая) и 0,1. Аппроксимация зависимости $\bar{U}_{\max} = f(\Pi_3)$ степенной функцией $y = cx^b$ позволяет получить для показателя степени значение (для всех Π_2) $b = 1/3$. Обработка обширного массива экспериментальных данных показала, что параметр c является функцией критерия Π_2 : $c = 32\Pi_2^{1/3}$. Таким образом, эмпирическая зависимость амплитуды импульса напряжения приобретает вид $\bar{U}_{\max} = 32\Pi_2^{1/3}\Pi_3^{1/3}$.



Экспериментальная зависимость $\bar{U}_{\max} = f(\Pi_3)$ для параметрических значений $\Pi_2 = 0,5$ (верхняя кривая) и 0,1

Нахождение зависимости величины тока, соответствующей пику напряжения, от критериев подобия, проводилось в два этапа. На первом анализировалась зависимость $\frac{\bar{I}_{\max} - \bar{I}_{peak}}{\bar{I}_{\max}}$. Здесь \bar{I}_{peak} – величина тока, соответствующая пику напряжения. Анализ экспериментальных осциллограмм тока для \bar{I}_{peak} с использованием такой же аппроксимации, как и выше, дало выражение $\bar{I}_{peak} = \bar{I}_{\max} (1 - 5\Pi_3^{3/4})$. Затем для функциональной зависимости амплитуды первого импульса тока от критериев подобия при аппроксимации экспериментальной зависимости \bar{I}_{\max} от Π_2 функцией вида $y = cx^{-b}$ было получено $\bar{I}_{\max} = 0,47\Pi_2^{-1/3}$. С учетом этого для зависимости максимальной мощности от критериев подобия несложно получить

$$\bar{N}_{\max} = \bar{U}_{\max} \cdot \bar{I}_{peak} = 15\Pi_3^{1/3} (1 - 5\Pi_3^{3/4}). \quad (6)$$

Обращает на себя внимание тот факт, что \bar{N}_{\max} зависит только от Π_3 , то есть из геометрических параметров на скорость введения энергии в проводник влияет только его длина. На самом деле это не совсем так – полученные выражения справедливы только для режимов взрыва, ограниченных условиями, указанными выше. Эти условия накладывают ограничения на диаметр взрывааемых проводников, причем как с одной (беспузные режимы), так и с другой стороны.

Построение экспериментальной зависимости \bar{N}_{\max} от Π_3 позволяет определить максимум этой кривой и соответствующее этому максимуму значение оптимального $\Pi_3 = a_3 \cong 2,43 \cdot 10^{-2}$. Соответствующее значение максимальной скорости введения энергии $\bar{N}_{\max} = a \cong 3$.

Подбор оптимального значения критерия подобия Π_2 основан на указанных выше ограничениях на режим разряда (беспузность и максимум тока за время, меньшее $T/4$). Хотя в этих пределах ($\Pi_2 > 0,074$) скорость ввода энергии не меняется, предлагается рекомендованное значение $\Pi_2 = a_2 = 0,2$. Отсюда, используя полученные a_2 и a_3 , и находим окончательные выражения для оптимального диаметра и длины проводника при ЭВП в воздухе:

$$\begin{cases} d_{opt}^a = (10)^{1/4} \left[\frac{W_0}{z\rho_n \sigma_{n0} (\lambda_n + \gamma_n)} \right]^{1/4} \\ l_{opt}^a = \sqrt{\frac{2,3\pi}{10^2 A}} \cdot U_0 \sqrt[4]{LC} \end{cases} \quad (7)$$

Здесь верхними индексами a обозначена принадлежность параметров к взрыву в воздухе. Соответствующие параметры для взрыва в воде можно обозначить индексом l . В знаменателе выражения для l_{opt}^a (под корнем) величина $10^2 \cdot A = 10^6 \text{ В}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^2$ в работе [3] заменена своим числовым значением, поэтому размерность оптимальной длины проводника там получается ошибочной.

Сравнение оптимальных параметров проводника при взрыве в воде и в воздухе. Сравнивая найденные соотношения с приведенными в [3] оптимальными параметрами для взрыва проводника в воде, получаем, что:

$$\begin{cases} d_{opt}^a = d_{opt}^l \cdot \sqrt[4]{10}/2, \\ l_{opt}^a = l_{opt}^l \cdot \sqrt{2,3\pi}/2, \end{cases} \quad (8)$$

то есть оптимальный диаметр для взрыва проводников в воздухе примерно на 12% меньше ($d_{opt}^a \approx d_{opt}^l \cdot 0,889$, или $d_{opt}^l \approx d_{opt}^a \cdot 1,125$), а оптимальная длина на 25% больше ($l_{opt}^a \approx l_{opt}^l \cdot 1,344$, или $l_{opt}^l \approx l_{opt}^a \cdot 0,744$), чем в воде.

Учитывая, что найденные нами оптимальные параметры d_{opt}^a и l_{opt}^a для ЭВП в воздухе отличаются от полученных в [3] аналогичных параметров для воды на постоянные множители, можно предположить, что отношение W_0/m может также служить приближенным критерием и для взрыва в воздухе.

Полученные соотношения (7) для определения условий, обеспечивающих максимальную скорость выделения энергии в разрядном промежутке при ЭВП в воздухе, позволяют установить характер зависимости отношения запасенной энергии W_0 к массе проводника m для оптимального режима

взрыва. Для воды нами было установлено [4] соотношение $\left(\frac{W_0}{m}\right)_{opt}^l = \sqrt{10^2 A} \cdot \left[\frac{\sigma_0 \cdot (\lambda + r)}{8\pi^2 \rho}\right]^{1/2} \text{ J/kg}$,

или $\left(\frac{W_0}{m}\right)_{opt}^l = k_1 \left[\frac{\sigma_0 \cdot (\lambda + r)}{8\pi^2 \rho}\right]^{1/2} \text{ J/g}$, где $k_1 = 1\text{В} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{м}$. Теперь, используя (7), для воздуха несложно

получить аналогичное выражение:

$$\begin{aligned} \left(\frac{W_0}{m}\right)_{opt}^a &\approx \sqrt{10^2 A} \cdot \sqrt{\frac{2,7826}{\pi}} \cdot \left[\frac{\sigma_0 \cdot (\lambda + r)}{8\pi^2 \rho}\right]^{1/2} \text{ J/kg}, \\ \text{или} \quad \left(\frac{W_0}{m}\right)_{opt}^a &\approx k_2 \left[\frac{\sigma_0 \cdot (\lambda + r)}{8\pi^2 \rho}\right]^{1/2} \text{ J/g}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $k_2 = k_1 \sqrt{\frac{2,7826}{\pi}}$. Как видно, значения отношения запасенной энергии к массе проводника для воды и воздуха для оптимального режима взрыва отличаются незначительно – для воздуха это значение примерно в 0,94 раза меньше. Так же как и для воды, это отношение не зависит от параметров разрядного контура и размеров проводника. В табл. 2 приведены значения $(W_0/m)_{opt}$ для некоторых металлов при взрыве проводников в воде (выбор металлов не носил целенаправленного характера, за исключением некоторых, наиболее часто используемых для взрыва проводников – таких как Al, Cu, Ni или W). Справочные данные по механическим, термодинамическим и электрическим свойствам металлов использовали из [9].

Таблица 2

Металл	Ag	Al	Au	Cr	Cu	Fe	Mo	Ni	Sn	Pb	Ta	Ti	W	Zn
$(W_0/m)_{opt}$, кДж/г	13,7	44,4	7,1	8,1	20,1	9,8	12,4	12	5,8	2,2	5,2	6,9	7,4	7,6

Значения $(W_0/m)_{opt}$ для взрыва в воздухе несложно получить, используя (9).

Опираясь на данные табл. 2, трудно предсказать характер взрыва проводников из приведенных в ней металлов в согласованном режиме, хотя, как будет показано ниже, различия существуют, и очень серьезные. Кроме того, не видно прямой корреляции между принадлежностью металла к тому или иному классу по классификации [10] и значениями $(W_0/m)_{opt}$. Аномально высокие значения этот параметр имеет для алюминия, высокие – для меди и серебра. Аномально низкие – для свинца, олова и тантала, низкие – для вольфрама, титана, золота, цинка. Промежуточные значения это отношение имеет для никеля, железа. В целом количество энергии на единицу массы проводника, необходимое для реализации «одиночных» режимов взрыва как в воде, так и в воздухе, для различных металлов неодинаково, зависит только от их свойств и не зависит от внешних регулируемых параметров.

Условия реализации «одиночного» взрыва и механизм разрушения проводников. Рассмотрим теперь отношение запасенной энергии к энергии, необходимой для испарения всего вещества проводника W_s при взрыве проводника в воздухе в оптимальном режиме. Используя те же упрощения, что и в [4], получим:

$$\left. \frac{W_0}{W_s} \right|_{opt}^a = 10 \sqrt{\frac{2,78A\sigma_0}{8\pi^3\rho}} \cdot \left[\frac{(\lambda+r)^{1/2}}{c_p(T_b-T_0)+(\lambda+r)} \right],$$

или же

$$\left. \frac{W_0}{W_s} \right|_{opt}^a = k_2 \left. \frac{W_0}{W_s} \right|_{opt}^l. \quad (10)$$

Здесь c_p – теплоемкость металла проводника, T_b – температура кипения, T_0 – комнатная температура. Таким образом, соотношение между $(W_0/W_s)_{opt}$ для воды и воздуха такое же, как и для $(W_0/m)_{opt}$, – их значения отличаются примерно в 0,94 раза. Соответственно для оптимальных режимов взрыва в воздухе отношение запасенной энергии к энергии сублимации проводника также является константой материала проводника и не зависит ни от его геометрических размеров, ни от параметров разрядного контура. В табл. 3 приведены значения $(W_0/W_s)_{opt}$ для ряда металлов при ЭВП в оптимальном режиме в воздухе.

Таблица 3

Металл	Ag	Al	Au	Cr	Cu	Fe	Mo	Ni	Sn	Pb	Ta	Ti	W	Zn
$(W_0/W_s)_{opt}$	4,3	3,1	3,3	0,94	3,2	1,3	1,5	1,4	1,8	1,9	0,95	0,6	1,3	3,2

Приведенные в табл. 3 данные свидетельствуют о том, что по величине этой постоянной металлы делятся как минимум на две группы. Большие значения $(W_0/W_s)_{opt}$ – от двух и более – характерны как раз для металлов первой группы указанной классификации. Для них энергия, необходимая для полного испарения проводника, в несколько раз меньше запасенной энергии, поэтому следует ожидать, что разрушение таких проводников при согласованном режиме взрыва будет происходить вследствие «тепловых» процессов – равновесного испарения либо спиноподобного распада в зависимости от величины этой константы. Для второй группы более характерными должны являться другие процессы, а испарение будет носить локальный характер. Отдельно в этом ряду следует отметить никелевый проводник, характер разрушения которого считался схожим с характером разрушения медного проводника [7], и проводники, для которых этот параметр меньше единицы. Что касается особенностей теплового разрушения проводников в согласованном режиме, то, безусловно, для тех металлов, для которых $(W_0/W_s)_{opt} \geq 2,5$, разрушение носит взрывной характер, сопровождающийся большими пиками перенапряжения ($U_m \geq 1,5U_0$) и выделенной энергией к моменту взрыва $W_{вз} \approx 2W_s$. Проводники с $(W_0/W_s)_{opt} \leq 1$ скорее всего разрушаются в режиме «плавкого предохранителя» [11]. Остальные металлы могут занимать промежуточное положение. В любом случае процесс ЭВП в оптимальном режиме носит самосогласованный характер, при котором количество энергии, выделяющейся к моменту взрыва, строго детерминировано свойствами материала проводника. Реализация такого «одиночного» режима ЭВП, когда к моменту взрыва выделяется количество энергии, равное энергии

сублимации, возможна не для всех проводников, а только для тех, у которых отношение $(W_0/W_s)_{opt}$ несколько больше единицы.

Рассмотрим еще один из аспектов возможного влияния окружающей среды на характер разрушения проводника. В [4] нами было показано, что для большинства металлов начальная плотность тока при взрыве проводников в оптимальном режиме при индуктивности контура $L = 3,32$ мкГн, емкости $C = 3$ мкФ и напряжении $U_0 = 30$ кВ на порядок и более превосходит критическую [12], определяющую характер их разрушения. Напомним, что в соответствии с [12], если к моменту взрыва плотность тока меньше некоторого «критического» значения, то разрушение проводника происходит вследствие развития МГД-неустойчивостей, если же больше, то превалирующими являются тепловые процессы. В табл. 4 представлены начальная (см. [4]) и критическая плотность тока для оптимальных режимов взрыва различных проводников при взрыве в воздухе.

Таблица 4

Металл	Ag	Al	Au	Cr	Cu	Mo	Ni	Fe	Pb	Sn	Ta	Ti	W
$10^{12} \frac{j_{opt}}{A/m^2}$	13,2	7,8	9,4	1,1	12,5	3,5	3,1	2,2	1	1,6	1,7	0,38	3,8
$10^{11} \frac{j_{кр}}{A/m^2}$	2,2	3	1,8	2,7	3,5	4,9	3,4	3,2	0,6	0,3	2,5	1,5	5,5

Как видно из таблицы, при выбранных нами параметрах контура почти для всех приведенных в ней металлов начальная плотность тока при взрыве проводников в оптимальном режиме по-прежнему на порядок и более превосходит критическую, определяющую характер их разрушения. Исключение составляет титановый проводник, у которого эти величины сопоставимы. Следует учесть, что отношение $j_{opt}/j_{кр}$ явным образом зависит от емкости конденсаторной батареи и неявным – от индуктивности контура и начального напряжения. Увеличение любого из этих параметров или всех вместе для каждого из металлов может полностью изменить ситуацию от $j_{opt}/j_{кр} \gg 1$ до $j_{opt}/j_{кр} < 1$, то есть изменить механизм взрыва. Анализ экспериментальных материалов [13] показывает, что при определенных условиях (параметрах контура) взрыв, скажем, никелевого проводника в оптимальном режиме в воздухе происходит в момент, когда в нем выделилось энергии меньше, чем необходимо для его полного испарения, чего не бывает при взрыве в воде. Это свидетельствует о том, что выражения (7) и (9) справедливы для взрыва в воздухе для еще более узкого диапазона значений параметров контура, чем соответствующие выражения для воды.

Выводы. Таким образом, нами установлено, что в определенной области значений параметров взрыва проводников достаточно точным критерием подобия электрических характеристик может выступать отношение запасенной энергии к массе проводника W_0/m . Эта область расположена в некоторой окрестности оптимальных параметров ЭВП. Границы области, где справедливо это утверждение, предстоит уточнить, либо используя тот же подход, базирующийся на подобии электрических характеристик ЭВП, либо привлекая какие-то физические закономерности взрыва.

В работе показано, что два важных энергетических параметра взрыва – удельная запасенная энергия W_0/m и отношение энергии сублимации металла проводника к запасенной энергии W_s/W_0 для оптимальных режимов ЭВП в воздухе так же не зависят от внешних регулируемых параметров, как и для взрыва в воде. Установлены условия, обеспечивающие максимальную скорость выделения энергии в разрядном промежутке при ЭВП в воздухе. Полученные зависимости оптимальных параметров проводников близки по своему виду к тем, которые были разработаны для ЭВП в воде [3] и отличаются только на постоянные множители. Это также является следствием того, что в обоих случаях использовался одинаковый подход, основанный на методах теории подобия. Следствием полученных соотношений является вывод о том, что разрушение металлических проводников при ЭВ в оптимальном режиме в воздухе, так же как и в воде, происходит в основном за счет тепловых процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sedoi V.S., Ivanov Yu.F. Particles and crystallites under electrical explosion of wires // Nanotechnology – 2008. №19. 145710 (6pp).
2. Кускова Н.И., Бакларь В.Ю., Гордиенко В.И., Хайнацкий С.А. О получении ультрадисперсных порошков металлов при электрическом взрыве проводников в жидкости. Часть I. Особенности взрыва проводников в жидкости // Электронная обработка материалов. 2008. № 1. С. 44–50.

3. *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наукова думка. 1986. 206 с.
4. *Хайнацкий С.А.* Условия реализации оптимального режима электрического взрыва проводников в воде // Письма в журнал технической физики. 2009. Т. 35. В. 7. С. 15–20.
5. *Chace W.G., Moor H.K., editors.* Exploding wires. – N.Y.: Plenum press. V.1, 1959; V.2, 1964; V.3, 1965; V.4, 1968.
6. *Азаркевич Е.И.* Применение теории подобия к расчету некоторых характеристик электрического взрыва проводников // Журнал технической физики. 1973. Т. 43. В. 1. С. 141–145.
7. *Кривицкий Е.В., Шолом В.К.* О приближенном подобии электрических характеристик подводного взрыва проводников // Журнал технической физики. 1974. Т. 44. В. 6. С. 1271–1276.
8. *Bennett F.D.* First Pulse in Exploding Wires // Rev.Sci.Instrum. 1967. 38. № 2. P. 293–294.
9. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. Акад. И.К.Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.
10. *Уэбб Ф., Хилтон Г., Левин П., Толлестрон Э.* Электрические и оптические характеристики быстрого взрыва проволочек // Электрический взрыв проводников. М.: Мир, 1965. С. 47–95.
11. *Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В.* Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.
12. *Колгатин С.Н., Лев М.Л., Перегуд Б.П. и др.* Разрушение медных проводников при протекании по ним тока плотностью, большей 10^7 А/см² // Журнал технической физики. 1989. Т. 59. В. 9. С. 123–133.
13. *Лебедев С.В., Савватимский А.И.* Металлы в процессе быстрого нагревания электрическим током большой плотности // Успехи физических наук. 1984. Т. 144. Вып. 2. С. 215–250.

Поступила 04.06.09

Summary

It is set in work, that attitude of the stocked energy toward mass of exploder W_0/m it is possible to use as a criterion of similarity of electric descriptions of explosion of exploders. It is shown that the specific stocked energy of W_0/m and relation of energy of sublimation of metal of exploder to the stocked energy of W_0/W_0 for the optimum modes of electric explosion of conductors (EEC) in mid air similarly does not depend on the external managed parameters, as well as for an explosion in water. Terms, providing high speed of selection of energy in a bit interval at EEC in mid air, are certain. Found correlation between the optimum parameters of explosion of exploders in water and in mid air.
