

А.Р. Ризун, Ю.В. Голень, Т.Д. Денисюк

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ
ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО РАЗРУШЕНИЯ
НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
просп. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина*

Введение

Применение электрогидравлических установок (ЭГУ) для разрушения материалов требует быстрого и надежного расчета характеристик основного воздействующего инструмента – электрического разряда (ЭР) цилиндрической симметрии. Мощность разряда достигает 10^9 Вт, длительность – порядка $(5 - 20) \cdot 10^{-6}$ с. Особенно необходимы сведения для первого полупериода тока, поскольку именно в это время формируется основная волна сжатия. Давления, развиваемые ЭР в первый полупериод, достигают порядка 10^9 Па, вещество в канале разряда (КР) представляет собой плотную плазму с температурой около $(10 - 50) \cdot 10^3$ К.

Методика расчета

Учет нелинейных эффектов распространения волн сжатия и эффектов неидеальности плазмы очень усложняет расчет параметров ЭР. Однако использование экспериментально установленного универсального для всех критических разрядов закона ввода мощности в канал разряда и приближения Кирквуда–Бете для расчета гидродинамических характеристик волн сжатия позволяют все многообразие явлений ЭР свести к единому критерию подобия разрядов – числу Маха (М) $M = \frac{a_0}{c_0 \tau}$ [1].

Для разрядов цилиндрической симметрии систему в безразмерном виде запишем так:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1 + M \frac{\dot{y}}{z}}{1 - M \frac{\dot{y}}{z}} \cdot \frac{\eta}{2y} + \frac{M}{z} \cdot \frac{d\eta}{dx} - \frac{3}{4} \frac{1 - \frac{M \dot{y}}{z}}{1 - M \frac{\dot{y}}{z}}, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{1}{M^2 (k-1)} = \left[\left(kM^2 \zeta + \frac{B}{A} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \quad (2)$$

$$z = \left(kM^2 \zeta + \frac{B}{A} \right)^{\frac{k-1}{2k}}, \quad (3)$$

$$\frac{d\zeta}{dx} = \frac{\dot{f}(x)}{y^2} - 2y \frac{\zeta}{y} \cdot \frac{dy}{dx}, \quad (4)$$

$$\dot{f}(x) = \begin{cases} 4 & 0 \leq x \leq 0,5 \\ 4(1-x) & 0,5 \leq x \leq 1, \\ 0 & 1 \leq x \end{cases} \quad (5)$$

В табл.1 $\dot{f}(x) = 0,5$. В систему (1) – (4) введены следующие безразмерные величины: $x = t/\tau$, где τ – время первого полупериода; $y = a/a_0$, где a – текущий радиус, a_0 – характерный радиус, приближенно равный радиусу КР к концу первого полупериода; $L = c/c_0$, где c – скорость звука, c_0 – скорость звука в покоящейся жидкости; $\zeta = \frac{p\tau^2}{\rho_0 a_0^2}$, где p – давление в КР, ρ_0 – плотность невозмущенной жидкости; $\eta = \frac{H\tau^2}{a_0^2}$ – энтальпия, где γ – эффективный показатель адиабаты плазмы – 1,26.

Уравнения (1) – (3) получены для уравнения воды, взятого в форме Тэта: уравнения (1) – (2) определяют соотношение между скоростью расширения КР и энтальпией, (3) – связывает энтальпию и давление в КР.

Уравнение (4) выражает закон сохранения мощности, (5) – эмпирически установленный закон выделения энергии в КР, нормированный на E/τ , где E – энергия, выделившаяся за время τ . Последнее уравнение, связывающее все рассмотренные величины, получено в [1]:

$$a_0^4 = \frac{\gamma-1}{\pi\rho_0} \tau^2 \frac{E}{l}, \quad (6)$$

где l – длина разрядного промежутка.

Система (1) – (6) позволяет найти гидродинамические характеристики разряда: радиус a , скорость \dot{a} и давление p , если известны энергия E , выделившаяся за время τ на длине разрядного промежутка – l . Решения уравнений (1) – (6) позволяют получение более простых расчетных формул для E и τ по заданным параметрам разрядного контура, а также нахождение способа определения электрических характеристик разряда в первый полупериод.

Расчет характеристик электроразрядов

Для ЭР технологии разрушения наиболее характерно число Маха $M = 0,5$. Система уравнений (1) – (6) интегрирована в более широком интервале чисел Маха от 0,1 до 1. Начальные условия варьировались следующим образом:

$$y_0 = 0,05 - 0,15; \quad \dot{y}_0 = 0,05 - 0,20; \quad \zeta_0 = 0,1 - 0,5.$$

При таких значениях радиусов, скоростей и давлений процесс расширения КР определяется только режимом выделения энергии.

Результаты вычислений для $M = 0,5$ сведены в табл.1. Анализ расчетов показал, что величины y и \dot{y} , то есть радиус и скорость его расширения, могут быть представлены единой зависимостью и аппроксимированы полиномом четвертой степени с точностью порядка 10% .

$$y = 0,034 + 0,621x + 1,42x^2 - 1,67x^3 + 0,626x^4, \\ \dot{y} = 0,375 + 5,41x - 13,8x^2 + 14,4x^3 - 5,55x^4.$$

Величины ζ в значительной степени определяются числом M и для значений $M = 0,5$ может быть выражено полиномом:

$$\zeta = 1,44 + 0,372x - 0,726x^2 - 1,28x^3 + 0,83x^4.$$

Переход к размерным величинам проводится по соотношениям

$$a = a_0 y; \quad \dot{a} = \frac{a_0}{\tau} \dot{y}; \quad p = \rho_0 \left(\frac{a_0}{\tau} \right)^2 \zeta_{0,5}.$$

Величины y, \dot{y}, ζ для соответствующего значения $M = 0,5$ берутся или из представленных выше полиномов, или из табл.1.

Таблица 1. Результаты расчета характеристик электроразряда

Цилиндр $M = 0,5$, $f(x) = 0,5$							
x	y	\dot{y}	ζ	x	y	\dot{y}	ζ
0,02	0,103	0,202	0,399	0,80	0,846	0,968	0,962
0,04	0,108	0,299	0,556	0,85	0,894	0,94	0,881
0,06	0,116	0,420	0,768	0,90	0,940	0,913	0,804
0,08	0,125	0,542	0,978	0,95	0,985	0,884	0,730
0,10	0,137	0,651	1,151	1,0	1,028	0,856	0,659
0,12	0,151	0,743	1,277	1,1	1,111	0,804	0,542
0,14	0,167	0,815	1,362	1,2	1,189	0,762	0,457
0,16	0,184	0,872	1,415	1,3	1,264	0,725	0,392
0,18	0,202	0,917	1,446	1,4	1,335	0,694	0,342
0,20	0,220	0,951	1,463	1,5	1,403	0,667	0,301
0,25	0,269	1,008	1,472	1,6	1,468	0,643	0,269
0,30	0,321	1,040	1,461	1,7	1,531	0,621	0,242
0,35	0,373	1,059	1,447	1,8	1,592	0,602	0,219
0,40	0,426	1,070	1,433	1,9	1,652	0,584	0,200
0,45	0,480	1,078	1,421	2,0	1,709	0,569	0,183
0,50	0,534	1,083	1,410	2,2	1,820	0,541	0,156
0,55	0,588	1,079	1,373	2,4	1,926	0,517	0,136
0,60	0,642	1,065	1,304	2,6	2,027	0,496	0,119
0,65	0,695	1,045	1,221	2,8	2,125	0,478	0,106
0,70	0,746	1,021	1,133	3,0	2,219	0,462	0,095
0,75	0,797	0,995	1,047	3,1	2,265	0,455	0,090

Исходя из экспериментально установленного факта, все характеристики разряда определяются четырьмя параметрами: начальным напряжением U , накопительной емкостью C , индуктивностью цепи L и длиной разрядного промежутка l . Учитывая, что $\tau = \pi\sqrt{LC}$, из соотношения работы [2] определяем долю энергии, выделившуюся в первый полупериод от всей запасенной $C U^2 / 2$,

$$\nu = (\pi^2 \Pi)^{\frac{1}{3}},$$

$$\Pi = \frac{A l^2}{\pi U^2 \sqrt{LC}},$$

где ν – доля энергии, выделившаяся в первый полупериод; A – искровая постоянная, равная для разрядов, инициируемых высоким напряжением, $10^5 \text{ В}^2 \text{ с/м}^2$. Тогда после несложных преобразований

$$a = 0,8(L\nu)^{\frac{1}{4}}(UC)^{\frac{1}{4}}(\rho_0 l)^{-\frac{1}{4}} y,$$

$$\dot{a} = 0,25U^{\frac{1}{2}}\nu^{\frac{1}{4}}(\rho_0 Ll)^{-\frac{1}{4}} \dot{y},$$

$$p = 0,066(\rho_0 \nu U^2)^{\frac{1}{2}}(Ll)^{-\frac{1}{2}} \zeta.$$

При более точных расчетах длительность первого полупериода следует вычислять по формуле $\tau = \pi\sqrt{LC}(1 + \pi^2 \Pi)$.

При исследовании воздействия электроразрядов на обрабатываемый материал необходимо знать следующие характеристики канала: работу, совершаемую над окружающей средой A ; интенсивность такого воздействия \dot{A} ; энергию плазмы W ; скорость ее изменения \dot{W} ; режим ввода электрической энергии в канал и общую мощность.

Используя подход, аналогичный изложенному выше, будем иметь соответственно для M , равного 0,5, и закона ввода мощности в виде равнобедренного треугольника $f(x) = 0,5$:

$$A = \int_{s_0}^s pl ds - 0,26CU^2 \nu f(x_A),$$

$$f(x_A)_{0,5} = 0,006 - 0,19x + 2,01x^2 - 0,278x^3 - 0,94x^4,$$

$$\dot{A} = pl \frac{ds}{dt} = 0,083 \frac{C^{1/2} U \nu}{L^{1/2}} f(x_A),$$

$$f(x_A)_{0,5} = 0,06 + 1,27x + 11,1x^2 - 19,3x^3 + 8,01x^4,$$

$$W = \frac{pV}{\gamma - 1} = \frac{CU^2}{2} \nu \zeta y^2 = \frac{CU^2}{2} \nu f(x_W),$$

$$f(x_W)_{0,5} = 0,073 - 0,96x + 5,52x^2 - 4,49x^3 + 0,847x^4,$$

$$\dot{W} = \frac{CU^2}{2} \nu \frac{d\zeta y^2}{dx} \frac{1}{\pi \sqrt{LC}} = \frac{C^{1/2} U^2 \nu}{6,28L^{1/2}} f(x_{\dot{W}}),$$

$$f(x_{\dot{W}})_{0,5} = 0,317 - 2,46x + 30,0x^2 - 55,1x^3 + 27,05x^4,$$

$$E = \frac{CU^2 \nu}{2} \begin{cases} 2x^2 & 0 \leq x \leq 0,5 \\ 4x - 2x^2 - 1 & 0,5 \leq x \leq 1 \\ 0 & 1 \leq x, \end{cases}$$

$$\dot{E} = \frac{C^{1/2} U^2 \nu}{6,28L^{1/2}} \begin{cases} 4x & 0 \leq x \leq 0,5 \\ 4(1-x) & 0,5 \leq x \leq 1 \\ 0 & 1 \leq x. \end{cases}$$

Кроме представленных формул, расчеты сведены в табл.2.

Таблица 2. Характеристики канала разряда для числа Маха $M = 0,5$

x	$f(x_A)$	$f(x_{\dot{A}})$	$f(x_W)$	$f(x_{\dot{W}})$
0,1	0,005	0,260	0,017	0,332
0,2	0,052	0,670	0,670	0,625
0,3	0,130	0,979	0,139	0,945
0,4	0,245	1,302	0,248	1,261
0,5	0,386	1,515	0,365	1,605
0,6	0,553	1,766	0,528	1,140
0,7	0,737	1,730	0,630	0,750
0,8	0,905	1,566	0,686	0,392
1,0	1,171	1,151	0,689	-0,29

Для расчета электрических характеристик канала разряда воспользуемся соотношением, полученным в работе [2]:

$$A = \frac{P}{(\gamma - 1)\sigma},$$

где σ – удельная проводимость канала разряда.

Отсюда $\sigma = \rho_0 \left(\frac{a_0}{\tau} \right)^2 \zeta (\gamma - 1)^{-1} A^{-1}$. Сопротивление КР $R = \frac{l}{\pi a^2 \sigma}$ или, переходя к безразмерным величинам, $R = \frac{l(\gamma - 1) A \tau^2}{\rho_0 a_0^4 \pi \zeta y^2}$.

Величина $1/\zeta y^2$ аппроксимируется полиномом шестой степени

$$\left(\frac{1}{\zeta y^2} \right)_{0,5} = 84 - 541x + 1290x^2 - 1089x^3 - 423x^4 + 1173x^5 - 492x^6.$$

Мощность, задаваемая $f(x) = 0,5$, дает возможность вычислить ток с помощью выражения

$$I = \sqrt{\frac{\dot{E}}{R}} = \frac{\pi a_0^4 \rho_0}{(\gamma - 1) A^{1/2} \tau^{3/2}} \begin{cases} \sqrt{4x\zeta y^2}, & 0 \leq x \leq 0,5, \\ \sqrt{4(1-x)\zeta y^2}, & 0,5 \leq x \leq 1, \\ 0, & 1 \leq x, \end{cases}$$

где подкоренное выражение, характеризующее величину безразмерного тока, может быть аппроксимировано выражением

$$I_{0,5} = 0,0945 - x + 10,7x^2 - 13,4x^3 + 3,67x^4.$$

Величина напряжения на разрядном промежутке l соответственно выразится

$$U = IR \frac{l A^{1/2}}{\tau^{1/2}} = \begin{cases} \sqrt{4x(\zeta y^2)^{-1}}, & 0 \leq x \leq 0,5, \\ \sqrt{4(1-x)(\zeta y^2)^{-1}}, & 0,5 \leq x \leq 1, \\ 0, & 1 \leq x, \end{cases}$$

где подкоренное выражение, характеризующее падение напряжения в безразмерном виде, аппроксимируется уравнением

$$U_{0,5} = 4,39 - 0,817x - 19,9x^2 + 33,6x^3 - 17,2x^4.$$

На рис.1 и 2 представлены данные расчетов и экспериментов для разрядов с параметрами для электроразрядного дробления: начальное напряжение $U = 5 \cdot 10^4$ и $4 \cdot 10^4$ В емкость батарей $C = 6 \cdot 10^{-6}$ Ф, индуктивность $L = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Гн, $l = 0,04$ м. Кривые 3, 6 получены экспериментально; кривые 1-2 и 4-5 – расчетным путем для напряжения $5 \cdot 10^4$ и $4 \cdot 10^4$ В соответственно; 2 и 5 вычислены при учете неадиабатичности процесса – равномерной потери 60% энергии за время от 0,5 до 1,5 x . Как видно из рисунков, подобный учет неадиабатичности слабо сказывается на активной стадии разряда, когда по каналу протекает ток, однако эти потери во многом определяют процесс пульсации пузыря на послеразрядной стадии.

Немаловажным является установление влияния изменения индуктивности, напряжения и емкости разрядной цепи на динамические характеристики канала разряда. При эксплуатации установок необходимо использовать согласованные разряды, поскольку именно они обеспечивают наибольший КПД, то есть наибольшую долю энергии, выделившуюся в первый полупериод, и максимальную амплитуду в волне сжатия. Это обычно разряды, в которых в первый полупериод выделяется около 80% всей запасенной в конденсаторе энергии. Оптимальные условия преобразования электрической энергии в механическую можно определить, варьируя параметры U , L , C и l , кроме того, изменением этих параметров можно добиться оптимальных условий работы установки, связанных с частотой следования импульсов и с особенностью разрушаемого материала, то есть его прочностью.

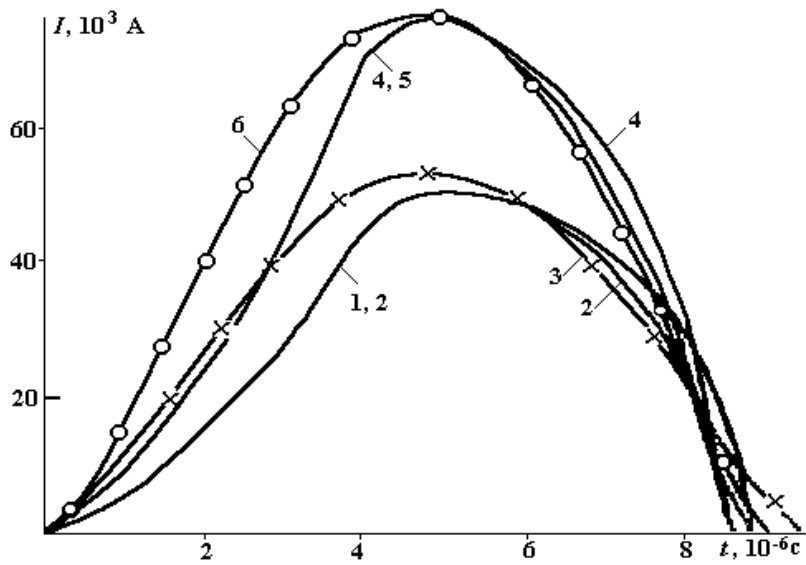


Рис.1. Ток канала разряда

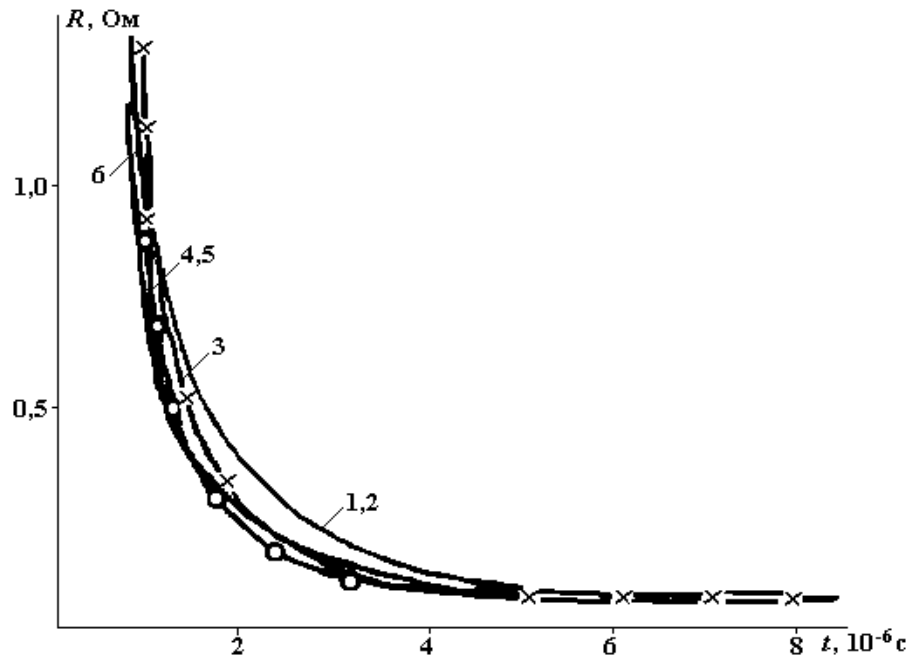


Рис.2. Сопротивление канала разряда

Проследим изменение характеристики канала разряда при изменении индуктивности цепи L . Получать индуктивность заданной величины можно, меняя длину подводных проводов.

Для примера рассмотрим действующую ЭГ установку с параметрами: $U = 42 \cdot 10^3 \text{ В}$, $C = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, $l = 0,06 \text{ м}$, $L = (5, 10, 15, 20) \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$. Разряд в воде инициируется высоким напряжением, поэтому искровая постоянная $A = 10^5 \text{ В}^2 \cdot \text{м}/\text{с}^2$.

Для перечисленных величин индуктивностей будем иметь соответственно изложенной методике:

- 1) $L = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, $E = 1453 \text{ Дж}$, $\tau = 14,56 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, $a_0 = 0,454 \cdot 10^{-2} \text{ м}$;
- 2) $L = 10 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, $E = 1294 \text{ Дж}$, $\tau = 19,89 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, $a_0 = 0,516 \cdot 10^{-2} \text{ м}$;
- 3) $L = 15 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, $E = 1210 \text{ Дж}$, $\tau = 23,95 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, $a_0 = 0,556 \cdot 10^{-2} \text{ м}$;
- 4) $L = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$, $E = 1153 \text{ Дж}$, $\tau = 27,35 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, $a_0 = 0,587 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

С помощью расчетов показано уменьшение величины энергии E в 1,25 раза, выделившейся в первый полупериод, и увеличение времени ее выделения почти в 2 раза.

Это привело к уменьшению пикового давления от $1,7 \cdot 10^8$ до $0,9 \cdot 10^8$ Па, тока – от $19 \cdot 10^3$ до $11 \cdot 10^3$ А, скорости расширения канала разряда – от 340 до 230 м·с⁻¹.

Характер изменения во времени давления, тока и скорости расширения канала разряда в зависимости от величины индуктивности показан на рис.3 – 5.

Результаты и обсуждение

Таким образом, уменьшение индуктивности приводит к резкому увеличению интенсивных характеристик разряда. Поскольку очень часто условия эксплуатации установки требуют использования максимальных напряжений, которые определяют длину стабильно пробиваемых разрядных промежутков, а индуктивность определяется конструкцией установки, единственным, легко варьируемым фактором, оказывается емкость. Поэтому определим на примере конкретной ЭГ установки для дробления материалов характер изменения параметров канала разряда в зависимости от величины емкости.

Параметры разрядной цепи $U = 42 \cdot 10^3$ В, $L = 7 \cdot 10^{-6}$ Гн, $l = 0,06$ м, $C = (3, 6, 9, 15) \cdot 10^{-6}$ Ф.

Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Из таблицы видно, что скорость расширения КР, величина пикового давления и удельная проводимость не изменяются с увеличением емкости. Сопротивление канала резко падает, а ток, радиус и длительность разряда значительно увеличиваются.

Максимальная величина тока при емкостях $(3, 6, 9, 15) \cdot 10^{-6}$ Ф составляет $(16, 23, 31, 43) \cdot 10^3$ А, величины радиусов $(4,9; 61; 7,3; 9,1) \cdot 10^{-2}$ м.

Увеличение емкости позволяет, не меняя величины давления, значительно увеличить энергию, расходуемую на перемещение жидкости в течение данного импульса, и тем самым увеличить производительность установки. Однако увеличение энергии, выделившейся в первом полупериоде, не пропорционально увеличению энергии в накопительных конденсаторах. Действительно, в конденсаторах накапливается энергия пропорционально емкости. Для величин $C = (3, 6, 9, 15) \cdot 10^{-6}$ Ф имеет место соотношение (1:2:3:5), а для выделившейся энергии (1374; 2448; 3431; 5252) Дж получено соотношение 1:1,8:2,5:3,9, и в этом смысле КПД установки падает. Величина импульсов волны сжатия также непропорциональна увеличению емкости. Действительно, при постоянном давлении импульс пропорционален длительности заряда и, следовательно, величинам τ : 16,9; 23,2; 28; 36; или в отношении 1:1,36:1,65:2. Указанное обстоятельство следует учитывать при отработке технологии и усовершенствовании ее на действующих ЭГУ и проектировании новых моделей. Полученные зависимости необходимы при расчетах параметров ЭГУ, планируемых для работы в поточных линиях.

Рассмотрим влияние начального напряжения на разрядном промежутке на электрические характеристики. При этом использование неоправданно больших напряжений уменьшает технологичность установки, приводит к быстрому износу электродов, увеличивает вероятность пробоя на соседние детали, способствует возникновению перенапряжений, требует увеличения габаритов блока накопителей и так далее.

На рис. 6 – 8 представлены найденные зависимости для разряда с параметрами $C = 3 \cdot 10^{-6}$ Ф, $l = 0,06$ м, $L = 7 \cdot 10^{-6}$ Гн, $U = (20; 30; 42; 50) \cdot 10^{-3}$ В.

Исходные для расчетов данные:

- 1) $U = 2 \cdot 10^4$ В, $E = 510,8$ Дж, $\tau = 21,2 \cdot 10^{-6}$ с, $a_0 = 0,422 \cdot 10^{-2}$ м;
- 2) $U = 3 \cdot 10^4$ В, $E = 877,1$ Дж, $\tau = 18,36 \cdot 10^{-6}$ с, $a_0 = 0,450 \cdot 10^{-2}$ м;
- 3) $U = 42 \cdot 10^4$ В, $E = 1347$ Дж, $\tau = 16,93 \cdot 10^{-6}$ с, $a_0 = 0,4827 \cdot 10^{-2}$ м;
- 4) $U = 50 \cdot 10^4$ В, $E = 1733$ Дж, $\tau = 16,4 \cdot 10^{-6}$ с, $a_0 = 0,504 \cdot 10^{-2}$ м.

Увеличение напряжения приводит к росту всех показателей разряда: тока, скорости расширения и давления.

Однако, как и в случае с емкостью, увеличение запасенной энергии не пропорционально росту уже рассмотренных величин. Действительно, запасенная энергия увеличивается пропорционально квадрату напряжения: 4:9:17,5:25, то есть 1:2,25:4,36:6,25, а энергии, выделившиеся в первый полупериод, имеют соотношение 1:1,72:2,7:3,4. Пиковое давление составляет (780; 1007; 1448; 1678)·10⁵ Па или 1:1,37:1,9:2,16.

В отличие от емкости увеличение начального напряжения приводит к значительному росту давления, и в этом смысле увеличение напряжения, как и снижение индуктивности, крайне желательно.

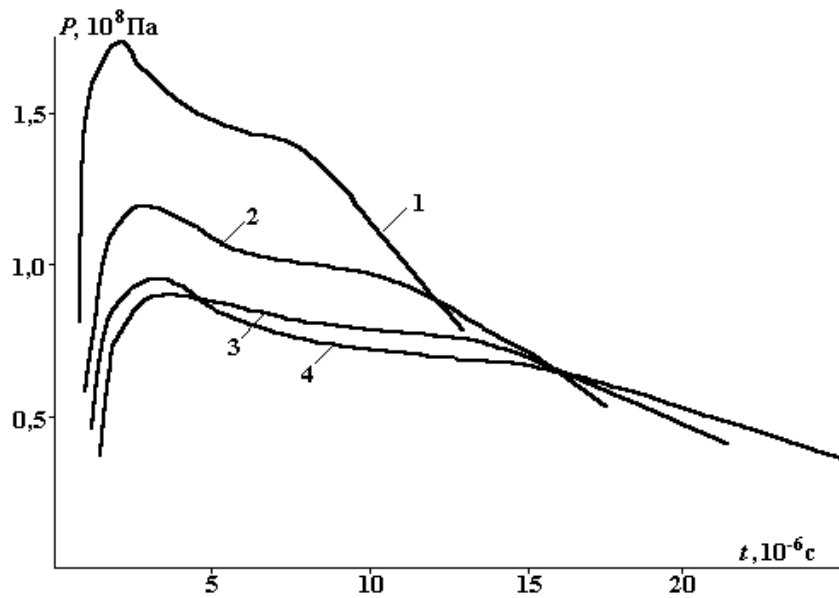


Рис.3. Давление в канале разряда при различных индуктивностях

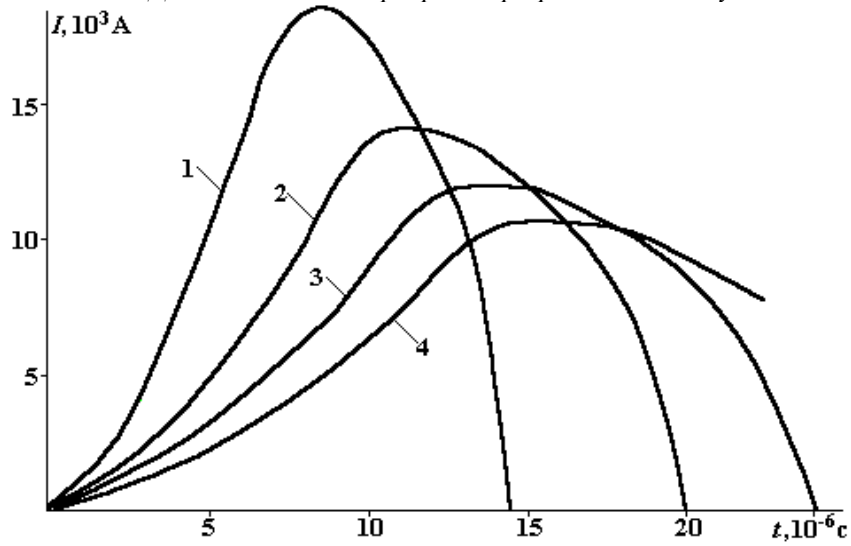


Рис.4. Ток в канале разряда при различных индуктивностях

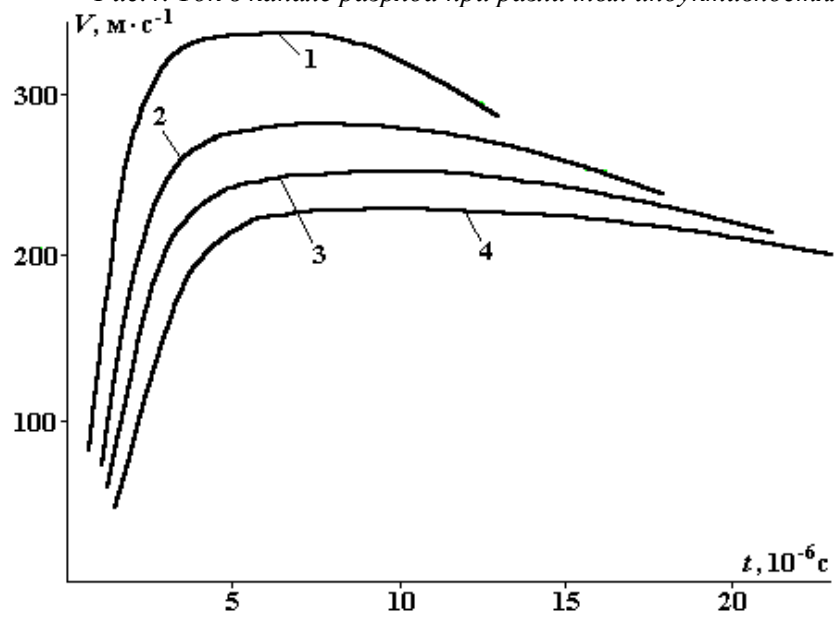


Рис. 5. Скорость перемещения стенки канала при различных индуктивностях

Таблица 3. Изменение параметров канала разряда в зависимости от изменения емкости

$C = 3 \cdot 10^{-6} \Phi$; $\tau = 16,93 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; $E = 1374 \text{ Дж}$; $a_0 = 0,4827 \cdot 10^{-2} \text{ м}$								
x	$t \cdot 10^{-6}$	$\dot{a} \cdot 10^{-3}$	ν	$p \cdot 10^8$	$\sigma \cdot 10^4$	R	$I \cdot 10^3$	$U \cdot 10^3$
0,05	0,846	0,386	74,14	0,675	0,260	49,34	0,574	28,30
0,10	1,693	0,483	211,03	1,399	0,538	15,24	1,460	22,24
0,15	2,539	0,724	276,6	1,448	0,557	6,54	2,728	17,85
0,20	3,385	0,965	296,5	1,366	0,525	3,90	4,080	15,91
0,25	4,232	1,207	305,1	1,301	0,500	2,62	5,565	14,58
0,30	5,078	1,448	307,7	1,260	0,485	1,88	7,200	13,52
0,40	6,771	1,979	310,84	1,204	0,463	1,05	11,10	11,69
0,50	8,463	2,510	310,84	1,179	0,454	0,668	15,58	10,41
0,60	10,156	3,041	305,1	1,080	0,419	0,493	16,23	7,999
0,70	11,848	3,524	293,7	0,943	0,363	0,424	15,15	6,426
0,80	13,541	4,006	279,4	0,797	0,307	0,388	12,93	5,020
0,90	15,234	4,489	265,2	0,659	0,253	0,374	9,315	3,485
1,0	16,926	–	–	–	–	–	0	0
$C = 6 \cdot 10^{-6} \Phi$; $\tau = 23,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; $E = 2448 \text{ Дж}$; $a_0 = 0,6529 \cdot 10^{-2} \text{ м}$								
0,05	1,160	0,522	73,17	0,657	0,253	27,69	0,873	24,17
0,10	2,320	0,653	208,2	1,362	0,524	8,55	2,221	18,99
0,15	3,480	0,979	272,9	1,410	0,542	3,673	4,152	15,24
0,20	4,64	1,306	292,6	1,331	0,512	2,189	6,210	13,59
0,25	5,800	1,632	301,1	1,267	0,487	1,471	8,469	12,45
0,30	6,960	1,959	303,9	1,228	0,472	1,054	10,95	11,55
0,40	9,286	2,677	306,7	1,172	0,451	0,591	16,89	9,990
0,5	11,60	3,395	306,7	1,148	0,442	0,375	23,71	8,897
0,60	13,92	4,113	301,1	1,061	0,408	0,277	24,70	6,833
0,70	16,24	4,766	289,8	0,919	0,353	0,238	23,06	5,488
0,80	18,56	5,419	275,8	0,776	0,299	0,218	19,68	4,288
0,90	20,87	6,072	261,7	0,642	0,247	0,210	14,17	2,977
1,0	23,199	–	–	–	–	–	0	0
$C = 9 \cdot 10^{-6} \Phi$; $\tau = 27,97 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; $E = 3431 \text{ Дж}$; $a_0 = 0,780 \cdot 10^{-2} \text{ м}$								
0,05	1,399	0,624	72,50	0,646	0,248	19,75	1,115	22,01
0,10	2,797	0,780	206,3	1,338	0,514	6,100	2,838	17,30
0,15	4,196	1,170	270,5	1,384	0,532	2,620	5,301	13,88
0,20	5,595	1,560	290,0	1,307	0,503	1,561	7,928	12,37
0,25	6,993	1,950	301,1	1,244	0,479	1,049	10,813	11,34
0,30	8,392	2,340	303,9	1,205	0,464	0,752	13,99	10,52
0,40	11,18	3,198	303,9	1,151	0,443	0,422	21,57	9,09
0,5	13,98	4,057	298,4	1,128	0,434	0,268	30,27	8,10
0,60	16,78	4,915	287,2	1,042	0,401	0,197	31,54	6,22
0,70	19,58	5,695	273,3	0,902	0,347	0,170	29,45	4,99
0,80	22,37	6,475	266	0,792	0,293	0,155	25,12	3,90
0,90	25,17	7,255	259,3	0,630	0,242	0,150	18,10	2,71
1,00	27,97	–	–	–	–	–	0	0
$C = 15 \cdot 10^{-6} \Phi$; $\tau = 35 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; $E = 5252 \text{ Дж}$; $a_0 = 0,975 \cdot 10^{-2} \text{ м}$								
0,05	1,775	0,782	71,59	0,629	0,242	12,9	1,514	19,54
0,10	3,550	0,978	203,7	1,304	0,502	3,985	3,854	15,35
0,15	5,325	1,466	267,1	1,350	0,519	1,711	7,202	12,32
0,20	7,100	1,955	286,3	1,274	0,490	1,020	10,77	10,98
0,25	8,875	2,444	294,6	1,213	0,467	0,685	14,69	10,07
0,30	10,65	2,933	297,4	1,175	0,452	0,491	19,01	9,34
0,40	14,20	4,008	300,1	1,222	0,432	0,276	29,31	8,07
0,5	17,75	5,083	300,1	1,099	0,423	0,175	41,14	7,19
0,60	21,30	6,158	294,6	1,016	0,391	0,129	42,85	5,52
0,70	24,85	7,136	283,6	0,880	0,338	0,111	40,01	4,43
0,80	28,40	8,113	269,8	0,743	0,286	0,102	34,14	3,46
0,90	31,95	9,091	256,1	0,614	0,236	0,098	24,59	2,406
1,0	35,50	–	–	–	–	–	0	0

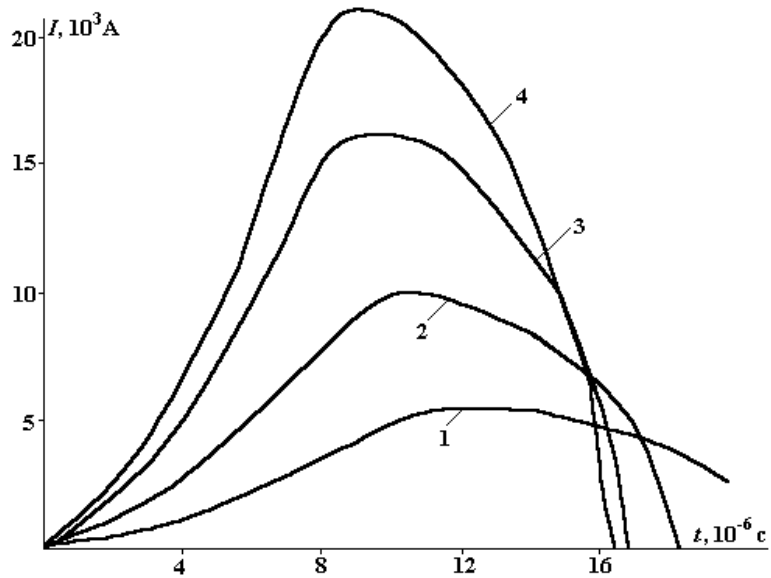


Рис. 6. Ток в канале разряда при различных начальных напряжениях

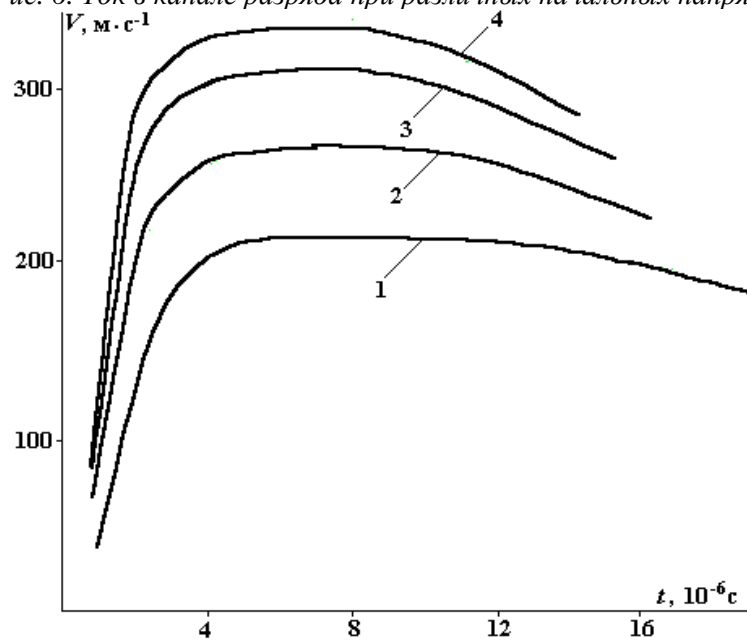


Рис. 7. Скорость перемещения стенки канала при различных начальных напряжениях

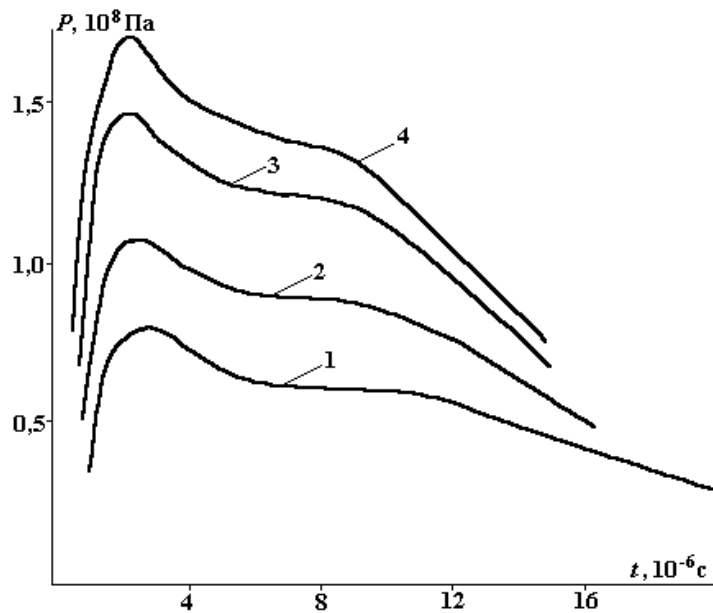


Рис. 8. Давление в канале при различных начальных напряжениях

Заключение

Таким образом, U , C , L по-разному и довольно сложным образом влияют на характеристики канала разряда, и для определенного вида ЭГУ их совокупность должна быть подобрана отдельно.

Предложенная методика позволяет это сделать для каждого конкретного случая и получить все характеристики ЭГУ не прибегая к сложным расчетам.

Полученное хорошее совпадение результатов расчетов и экспериментов позволяет рекомендовать предложенную методику для практических расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде. М., 1971.
2. *Кривицкий Е.В., Шамко В.В.* Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев, 1979.

Поступила 24.12.02

Summary

The designed technique allows to establish by a computational way, avoiding composite and expensive experiments, hydrodynamic and electrical characteristics of electrocategory (electrodischarge) for different given technological conditions of parameters of a discharge circuit. As an example the calculations of the hydrodynamic and electrical characteristics with reference to parameters of discharge circuits of the electrohydraulic installations on splitting of nonmetallic stuffs are executed (made).

А.С. Сафаров, Д.М. Шукурова, А.Х. Икрамов, Т.Ж. Арсланова

ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОКСИДА НА КРЕМНИИ

*Ташкентский государственный технический университет им. А.Р. Беруни,
ул. Университетская, 2, г. Ташкент, 700095, Узбекистан*

Структура поверхности кристалла представляет интерес при изучении процесса окисления полупроводниковых образцов. С этой точки зрения является важным выяснение связи структуры поверхности кристалла с природой и энергией образования поверхностных комплексов адсорбат – адсорбент.

Цель данной работы – изучение процесса образования оксида кремния на начальном этапе окисления с учетом адсорбции и десорбции частиц.

Нами были проанализированы данные об адсорбционных свойствах системы кремний – кислород и кремний – диоксид кремния, в которых для исследования прироста веса образца кремния в процессе его окисления при различных условиях применялся термомикрогравиметрический метод [1 – 3].

Для количественного изучения адсорбции и десорбции частиц на поверхности кремния нами проведена серия экспериментов. Их сущность заключается в следующем. Проводилась сортировка на основе технических данных заводского паспорта кристалла. Некоторые образцы были вырезаны из одного и того же слитка монокристалла кремния, для того чтобы убедиться в однотипности образцов. Затем они подвергались механической и химической полировке при заводских условиях, после чего проводилось окисление пластины кремния. Окисление проводилось двумя методами: первый – перед окислением образец очищался путем термического нагрева в высоком вакууме; второй – без очистки поверхности образца в высоком вакууме, то есть в условиях, применяемых в серийном изготовлении на заводах интегральных схем и металл – окисел – полупроводник (МОП) структур.

© Сафаров А.С., Шукурова Д.М., Икрамов А.Х., Арсланова Т.Ж., Электронная обработка материалов, 2003, № 4, С. 84–86.