

Исследования гидродинамических характеристик импульсно-волнового воздействия для различных технологических режимов электроразрядных установок разрушения неметаллических материалов

Т. Д. Денисюк*, А. Р. Ризун, А. Д. Блащенко

*Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины,
г. Николаев, 54018, Украина, *e-mail: t.d.denisyuk@gmail.com*

Поступила в редакцию 28.04.2023

После доработки 11.12.2023

Принята к публикации 18.12.2023

Представлен метод расчета параметров высоковольтного канала разряда (давления, радиуса, скорости расширения) для электроразрядных установок разрушения неметаллических материалов, что позволило исследовать влияние параметров (индуктивности, напряжения и емкости) на гидродинамические параметры канала разряда и генерируемой волны давления. При увеличении индуктивности происходит уменьшение давления и скорости расширения канала разряда, рост напряжения, что приводит к расширению активных характеристик канала разряда, а увеличение емкости – к повышению тока разряда, и без изменений остаются давление и скорость расширения канала разряда. Определена эффективная зона разрушения, которая зависит от параметров технологических режимов работы циклов, прочностных характеристик разрушаемого материала и электропроводности разрядной среды. Предложены рекомендации по выбору режимов электроразрядных установок для дезинтеграции неметаллических материалов.

Ключевые слова: гидродинамические характеристики, электроразряд, параметры канала разряда, волна сжатия, скорость расширения канала разряда, разрушение

УДК 532:537

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.1.080>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее распространение в различных областях промышленного производства получают технологические процессы разрушения, дробления и измельчения высокопрочных неметаллических материалов, основанные на использовании высоковольтного электрического разряда в конденсированных средах [1–3]. Наряду с высокой производительностью и простотой реализации эти технологии характеризуются экологической чистотой и минимальными энергозатратами по сравнению с традиционными способами обработки. При электроразрядном способе дезинтеграции прочных неметаллических объектов разрушение происходит за счет суммирования напряжений, возникающих вокруг канала электрического разряда в воде, то есть вокруг расширяющейся плазмы канала пробоя, а также вследствие распространения в жидкой среде волн сжатия–разрядки. Давление волны сжатия электроразряда формируется в первом полупериоде тока [4]. Максимальное динамическое воздействие испытывают материалы, находящиеся непосредственно в зоне канала разряда. Определяющими

факторами электроразрядного разрушения являются параметры волн сжатия. Известно, что скорость расширения канала разряда достигает 2000 м/с, а давление в нем – до 5×10^9 Па. При таких параметрах следует ожидать больших плотностей энергии в волне давления, генерируемой электроразрядом, что позволит при определенных технических решениях применять ее в технологических процессах разрушения неметаллических материалов различного рода.

На практике используются высоковольтные электрические установки с сильно различающимися параметрами, например зарядным напряжением, емкостью и т.д. Преобразование электрической энергии источника в высоковольтных электроразрядных системах в энергию волн сжатия зависит от параметров энергоисточника и среды, в которой эти волны распространяются. В связи с этим предполагается, что параметры волны давления также могут изменяться в довольно широких пределах.

Разработка технологических процессов электроразрядной дезинтеграции неметаллических материалов различной прочности требует предварительного определения параметров и характеристик режимов электрического разряда,

что позволяет воздействовать на обрабатываемый объект импульсными нагрузками наиболее оптимальной формы в каждом конкретном случае. Для решения этой задачи возможно применение методов физического или математического моделирования. Физическое моделирование требует значительных материальных и временных затрат. В свою очередь использование математического аппарата позволит значительно снизить себестоимость и ускорить проведение работ, а также выполнить исследования в более широком диапазоне начальных данных. В связи с этим актуальной является задача по разработке алгоритма математического расчета параметров энергоисточника применительно к потребностям конкретных разрядно-импульсных технологий и по исследованию гидродинамических характеристик канала разряда в зависимости от параметров энергоисточника [5]. Это позволит определить режимы, которые обеспечат необходимое динамическое воздействие на объект с целью его разрушения.

Цель работы – исследование гидродинамических характеристик канала высоковольтного разряда и генерируемых волн давления в зависимости от параметров энергоисточника и режимов реализации технологических процессов разрушения неметаллических материалов.

Для достижения цели работы использовались методы математического моделирования. С их помощью проведено численное исследование зависимостей давлений в плазменном канале высоковольтного разряда и в зоне за его пределами от параметров технологических режимов электроразрядных установок для разрушения неметаллических материалов.

РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНО-ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

При расчете гидродинамических характеристик разряда решаем последовательно две задачи: расчет расширения канала разряда при заданном режиме выделения энергии и определение амплитуды давления волны сжатия в канале разряда. Исследование распространения волн сжатия является сложной научной задачей, поэтому было решено использовать экспериментально установленный универсальный закон ввода энергии в канал разряда и приближение Криквуда-Бете [4]. В этом случае процесс расширения канала разряда можно описать системой уравнений:

$$P_k \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} \frac{d}{dt} PV = \dot{E}(t),$$

$$a \frac{d^2 a}{dt^2} \left(1 - \frac{U}{c}\right) + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{U}{c}\right) U^2 =$$

$$= \left(1 - \frac{U}{c}\right)^2 H + \frac{a}{c} \left(1 - \frac{U}{c}\right) \frac{dH}{dt}, \quad (1)$$

$$H = \int_{P_0}^{P_k} \frac{dP_k}{\rho} = \frac{c_0^2}{n-1} \left[\left(\frac{P_k + B}{A} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right],$$

где P_k – давление в канале; V – объем канала разряда; γ – эффективный показатель адиабаты плазмы ($\gamma = 1,26$); \dot{E} – выделившаяся в канале мощность; a – радиус канала разряда; U – рабочее напряжение; $c = c(\rho)$ – локальная скорость звука, являющаяся переменной величиной; H – энтальпия; n, A, B – константы уравнения состояния жидкости, $n = 7$ для воды, $A = 3,001 \times 10^8$ Па, $B = 3 \times 10^8$ Па.

Начальные условия выбираем в виде $\bar{t} \rightarrow 0$. Тогда значения радиуса канала и скорости его расширения достаточно малы по сравнению с их характеристическими значениями.

Для практических расчетов гидродинамических характеристик параметров разрядов цилиндрической симметрии, используемых в электроразрядных процессах для разрушения неметаллических материалов, введем в систему уравнений расширения канала разряда (1) безразмерные величины:

$$M = \frac{a_0}{c_0 \tau}; \quad x = \frac{t}{\tau}; \quad y = \frac{a}{a_0}; \quad \eta = \frac{H \tau^2}{a_0^2}; \quad z = \frac{c}{c_0};$$

$$\xi = \frac{P_k \tau^2}{\rho_0 a_0^2}; \quad \dot{y} = \frac{dy}{dx},$$

где M – число Маха; a_0 – характеристический радиус канала разряда, приближенно равный радиусу канала в конце первого полупериода; c_0 – скорость звука в покоящейся жидкости; τ – время исследуемого первого полупериода или время формирования основной волны сжатия; t – время распространения волны сжатия; η – электроакустический к.п.д.; ξ – коэффициент потери энергии; ρ_0 – плотность невозмущенной жидкости.

Можно записать систему уравнений в безразмерном виде [5]:

$$\frac{d\xi}{dx} = \frac{f(x)}{y^3} - 2\gamma \frac{\xi}{y} \times \frac{dy}{dx}, \quad (2)$$

Таблица 1. Расчеты безразмерных величин для режимов $f(x) = 0,5$ и $M = 0,5$

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	0,940	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	1,00	1,028	0,856	0,659
0,12	0,151	0,743	1,277	1,10	1,111	0,804	0,542
0,14	0,167	0,815	1,362	1,20	1,189	0,762	0,457
0,16	0,184	0,872	1,415	1,30	1,264	0,725	0,392
0,18	0,202	0,917	1,446	1,40	1,335	0,694	0,342
0,20	0,220	0,951	1,463	1,50	1,403	0,667	0,301
0,25	0,269	1,008	1,472	1,60	1,468	0,643	0,269
0,30	0,321	1,040	1,461	1,70	1,531	0,621	0,242
0,35	0,373	1,059	1,447	1,80	1,592	0,602	0,219
0,40	0,426	1,070	1,433	1,90	1,652	0,584	0,200
0,45	0,480	1,078	1,421	2,00	1,709	0,569	0,183
0,50	0,534	1,083	1,410	2,20	1,820	0,541	0,156
0,55	0,588	1,079	1,373	2,40	1,926	0,517	0,136
0,60	0,642	1,065	1,304	2,60	2,027	0,496	0,119
0,65	0,695	1,045	1,221	2,80	2,125	0,478	0,106
0,70	0,746	1,021	1,133	3,00	2,219	0,462	0,095
0,75	0,797	0,995	1,047	3,10	2,265	0,455	0,090

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

$$\eta = \frac{1}{M^2(k-1)} \left[\left(kM^2 \xi + \frac{B}{A} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \quad (4)$$

$$z = \left(M^2 k \xi + \frac{B}{A} \right)^{\frac{k-1}{2k}}, \quad (5)$$

$$f(x) = \begin{cases} 4x & 0 \leq x \leq 0,5 \\ 4(1-x) & 0,5 \leq x \leq 1 \\ 0 & 1 \leq x, \end{cases} \quad (6)$$

где k – коэффициент ($k = 7,15$); $f(x) = \frac{I^2 R \tau}{E}$ – безразмерная мощность электроразрядной установки, при этом I – ток в канале разряда; R – сопротивление канала разряда; E – мощность, выделившаяся за время τ :

$$a_0^4 = \frac{\gamma-1}{\pi \rho_0} \tau^2 E (\tau) \frac{1}{l}, \quad (7)$$

где l – длина канала разряда.

Уравнения (2)–(5) описывают процесс расширения канала разряда, уравнение (6) – эмпирически установленный закон выделения энергии в канале разряда, приравненный к величине мощности E/τ . Уравнение (7) связывает все рассмотренные величины [4].

Решение системы уравнений (2)–(7) позволяет определить гидродинамические характеристики канала разряда: скорость расширения \dot{a} и

давление P_k , если известна энергия E , выделившаяся за время τ в канале разряда длиной l .

Для электроразрядной технологии разрушения неметаллических материалов наиболее характерно $M = 0,5$ [4]. Система уравнений (1)–(6) интегрирована в более широком интервале чисел Маха от 0,1 до 1,0. Начальные условия варьировались следующим образом:

$$x_0 = 0; y = 0,05 \div 0,18; \\ \dot{y} = 0,005 \div 0,20; \zeta = 0,1 \div 0,05.$$

При таких значениях начальных параметров процесс расширения канала разряда определяется только режимом выделения в нем энергии [6].

Для примера в табл. 1 показаны расчеты безразмерных величин для режимов $f(x) = 0,5$ и $M = 0,5$.

Анализ результатов расчетов безразмерных величин для любых значений числа M в диапазоне от 0,1 до 1,0 показал, что y и \dot{y} могут быть аппроксимированы с точностью до 10%:

$$y = 0,034 + 0,621x + 1,42x^2 - 1,67x^3 + 0,626x^4. \quad (8)$$

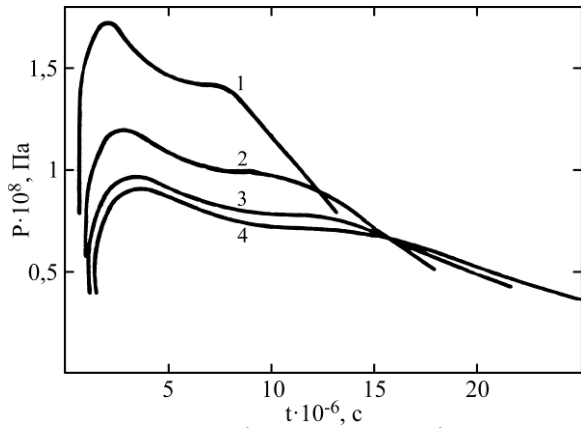
$$\dot{y} = 0,375 + 5,41x + 13,8x^2 - 14,4x^3 + 5,55x^4. \quad (9)$$

Величина ξ в значительной степени определяется числом Маха и для значений $M = 0,5$ может быть выражена:

$$\xi_{0,5} = 1,44 + 0,372x + 0,726x^2 - 1,28x^3 + 0,83x^4. \quad (10)$$

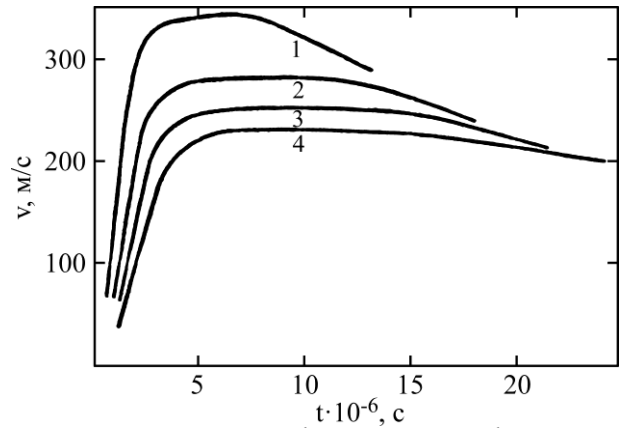
Таблица 2. Результаты расчетов гидродинамических характеристик

№ п/п	x	$t, 10^{-6} \text{ с}$	$\alpha, \times 10^{-3} \text{ м}$	$\dot{\alpha}, \text{ мс}^{-1}$	$P_k \times 10^8, \text{ Па}$
1	0,05	1,72	0,35	164,6	1,25
2	0,1	3,44	0,56	212,7	1,22
3	0,15	5,16	0,79	247,6	1,20
4	0,2	6,88	1,04	271,7	1,18
5	0,3	10,3	1,58	295,4	1,16
6	0,4	13,7	2,16	298,3	1,12
7	0,5	17,2	2,73	230,9	1,06
8	0,6	20,6	3,29	280,5	0,98
9	0,7	24,08	3,82	270,4	0,86
10	0,8	27,5	4,33	260,7	0,74
11	0,9	30,9	4,82	247,7	0,61
12	1,0	34,4	5,31	224,7	0,49



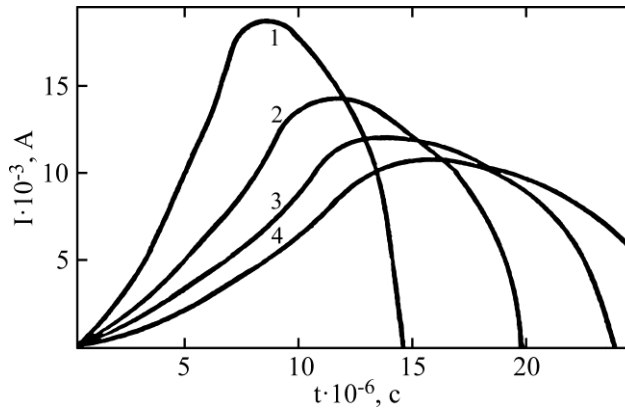
1 – $L = 5 \times 10^{-6} \text{ Гн}$; 2 – $L = 10 \times 10^{-6} \text{ Гн}$;
3 – $L = 15 \times 10^{-6} \text{ Гн}$; 4 – $L = 20 \times 10^{-6} \text{ Гн}$

Рис. 1. Изменение давления в канале разряда в зависимости от индуктивности.



1 – $L = 5 \times 10^{-6} \text{ Гн}$; 2 – $L = 10 \times 10^{-6} \text{ Гн}$;
3 – $L = 15 \times 10^{-6} \text{ Гн}$; 4 – $L = 20 \times 10^{-6} \text{ Гн}$

Рис. 2. Изменение скорости расширения канала разряда в зависимости от индуктивности.



1 – $L = 5 \times 10^{-6} \text{ Гн}$; 2 – $L = 10 \times 10^{-6} \text{ Гн}$;
3 – $L = 15 \times 10^{-6} \text{ Гн}$; 4 – $L = 20 \times 10^{-6} \text{ Гн}$

Рис. 3. Изменение величины тока в канале разряда в зависимости от индуктивности.

Переход к размерным величинам проводится по соотношениям:

$$\alpha = \alpha_0 y, \quad (11)$$

$$\dot{\alpha} = \frac{\alpha_0}{\tau} \dot{y}, \quad (12)$$

$$P_k = \rho \left(\frac{\alpha_0}{\tau} \right)^2 \xi_{0,1-0,5}. \quad (13)$$

Таким образом, разработанная методика позволяет определить для каждого варианта процесса дезинтеграции прочных неметал-

лических материалов радиус канала разряда, скорость его расширения и давление в канале разряда. Эти величины лежат в основе определения технологических параметров электроразрядной дезинтеграции.

$$E = \frac{CU^2}{2} v, \quad (14)$$

$$\tau = \pi \sqrt{LC}, \quad (15)$$

где E – запасенная энергия; C – емкость накопителя; U – рабочее напряжение; v – доля энергии,

выделившейся в первый полупериод; L – индуктивность разрядного контура.

Исходя из экспериментально установленного факта [3, 4], все характеристики разряда определяются параметрами: рабочим напряжением, емкостью накопителя, индуктивностью разрядного контура, сопротивлением разрядного контура, проводимостью жидкости ρ_0 и длиной разрядного промежутка l . Принимая $\tau = \pi\sqrt{LC}$, определяем долю энергии ν , выделившуюся в первый полупериод тока от всей запасенной $\frac{CU^2}{2}$ [6]:

$$\nu = \left(\pi^2 \frac{\dot{A}I^2}{\pi U^2 \sqrt{LC}} \right)^{1/3}; \quad (16)$$

где \dot{A} – искровая постоянная, равная для разрядов, инициируемых микропроводником, $0,25 \cdot 10^5 \text{ В}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^2$, а для разрядов, инициируемых высоким напряжением, – $10^5 \text{ В}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^2$ [7].

Учитывая все это, преобразуем уравнения (11)–(13) и получаем уравнения для расчетов радиуса канала разряда, скорости его расширения и давления канала разряда:

$$\alpha = 0,8(L\nu)^{1/4}(UC)^{1/4}(\rho_0 l)^{-1/4} y, \quad (17)$$

$$\dot{\alpha} = 0,25U^{1/2}\nu^{1/4}(\rho_0 l)^{-1/4} \dot{y}, \quad (18)$$

$$P_k = 0,066(\rho\nu U^2)^{1/2}(Ll)^{-1/2} \xi. \quad (19)$$

Величины y , \dot{y} , ξ находятся из уравнений (8)–(10) в зависимости от значений числа M , например, из табл. 1.

В качестве примера рассмотрим зависимость гидродинамических характеристик канала разряда от изменений индуктивности, напряжения разрядного контура и емкости накопительных конденсаторов. В ранее опубликованных работах [8] установлено, что эти параметры значительно влияют на характеристики канала разряда. Для расчета были использованы следующие параметры электро-разрядной установки для дезинтеграции неметаллических материалов: напряжение, емкость и индуктивность варьировались в пределах $U = (2,1; 3,1; 4,2; 5) \times 10^4 \text{ В}$, $C = (3; 6; 9; 15) \times 10^{-6} \text{ Ф}$, $L = (5; 10; 15; 20) \times 10^{-6} \text{ Гн}$, длина разрядного промежутка $l = 0,06 \text{ м}$. Разряд в воде инициировался высоким напряжением, поэтому искровая постоянная $\dot{A} = 10^5 \times \text{В}^2 \text{ с}/\text{м}^2$.

Для примера в табл. 2 представлены результаты расчетов гидродинамических характеристик электро-разряда с параметрами: $U = 5 \times 10^4 \text{ В}$, $C = 3 \times 10^{-6} \text{ Ф}$, $L = 15 \times 10^{-6} \text{ Гн}$, $l = 0,06 \text{ м}$.

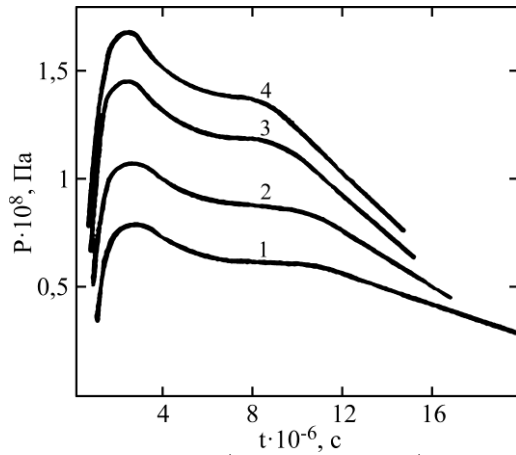
Характер изменения давления в канале разряда, скорости его расширения и величины тока исследованы при $U = 4,2 \times 10^4 \text{ В}$, $C = 3 \times 10^{-6} \text{ Ф}$ и следующих значениях индуктивности: 1 – $L = 5 \times 10^{-6} \text{ Гн}$; 2 – $L = 10 \times 10^{-6} \text{ Гн}$; 3 – $L = 15 \times 10^{-6} \text{ Гн}$; 4 – $L = 20 \times 10^{-6} \text{ Гн}$ и приведены на рис. 1–3.

Результаты исследования показали, что при увеличении индуктивности происходит уменьшение амплитуды давления в канале от $1,7 \times 10^8 \text{ Па}$ при индуктивности $L = 5 \times 10^{-6} \text{ Гн}$ до $0,9 \times 10^8 \text{ Па}$ при индуктивности $L = 20 \times 10^{-6} \text{ Гн}$ (рис. 1), скорости расширения канала от $340 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при индуктивности $L = 5 \times 10^{-6} \text{ Гн}$ до $230 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при индуктивности $L = 20 \times 10^{-6} \text{ Гн}$ (рис. 2) и максимальной величины тока в 1,25 раза (рис. 3). Таким образом, уменьшение индуктивности электроразрядного оборудования приводит к увеличению активных характеристик канала разряда. Следует заметить, что изменение индуктивности мало влияет на энергию, выделившуюся в первый полупериод. При увеличении индуктивности разряд становится мягче и менее бризантным.

Полученные данные о характере изменения гидродинамических характеристик канала разряда в зависимости от изменения индуктивности важны при проектировании установок для разрушения различных неметаллических материалов исходя из технологии дезинтеграции. Например, для очистки литья применяются электроразрядные установки с индуктивностью 15 мкГн . Для эффективного применения электроразрядной технологии очистки литья необходимо, чтобы величина «пикового» давления не превышала прочность материала отливки. Для дробления и измельчения высокопрочных неметаллических материалов индуктивность электроразрядных установок установлена в пределах $6\text{--}8 \text{ мкГн}$.

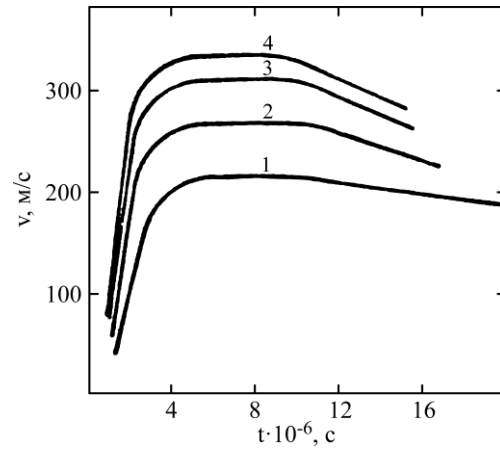
Характер изменения давления в канале разряда, скорости его расширения и величины тока исследован при $C = 3 \times 10^{-6} \text{ Ф}$, $L = 5 \times 10^{-6} \text{ Гн}$ и следующих значениях напряжения: 1 – $U = 2,1 \times 10^4 \text{ В}$; 2 – $U = 3,1 \times 10^4 \text{ В}$; 3 – $U = 4,2 \times 10^4 \text{ В}$; 4 – $U = 5 \times 10^4 \text{ В}$ и приведен на рис. 4–6.

Анализ результатов исследования показал, что рост напряжения приводит к повышению давления канала разряда, скорости его расширения и величины тока (рис. 4–6), то есть к увеличению активных характеристик канала разряда. Таким образом, возрастание начального напряжения вызывает повышение эффективности процесса дезинтеграции. При проектировании электроразрядных установок следует



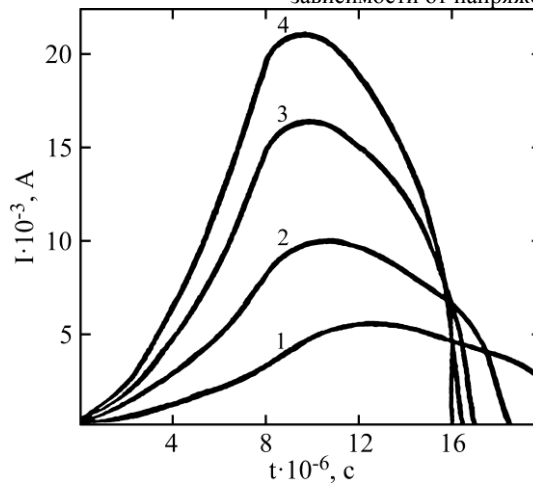
1 – $U = 2,1 \times 10^4$ В; 2 – $U = 3,1 \times 10^4$ В;
3 – $U = 4,2 \times 10^4$ В; 4 – $U = 5 \times 10^4$ В.

Рис. 4. Изменение давления в канале разряда в зависимости от напряжения.



1 – $U = 2,1 \times 10^4$ В; 2 – $U = 3,1 \times 10^4$ В;
3 – $U = 4,2 \times 10^4$ В; 4 – $U = 5 \times 10^4$ В.

Рис. 5. Изменение скорости расширения канала разряда в зависимости от напряжения.



1 – $U = 2,1 \times 10^4$ В; 2 – $U = 3,1 \times 10^4$ В;
3 – $U = 4,2 \times 10^4$ В; 4 – $U = 5 \times 10^4$ В.

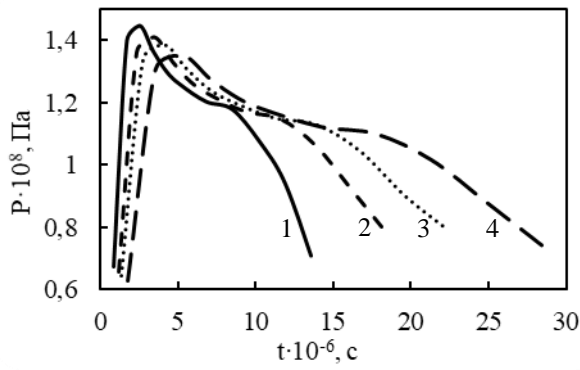
Рис. 6. Изменение величины тока в канале разряда в зависимости от напряжения.

учитывать, что значительный рост напряжения приводит к увеличению громоздкости электроразрядного оборудования и осложняет условия безопасной работы. Оптимальная величина напряжения рассчитывается с учетом минимальной напряженности поля, при которой еще возникают лидеры разрядов. Для установок по очистке литья оптимальное напряжение составляет 40 кВ, для дробления и измельчения высокопрочных неметаллических материалов, например металлургического кремния, рудных материалов, величина напряжения – 50 кВ.

Изменения характеристик разряда и эффективности процесса дезинтеграции в зависимости от изменения емкости конденсаторных батарей исследованы при $U = 4,2 \times 10^4$ В, $L = 5 \times 10^{-6}$ Гн и следующих значениях емкости: 1 – $C = 3 \times 10^{-6}$ Ф; 2 – $C = 6 \times 10^{-6}$ Ф; 3 – $C = 9 \times 10^{-6}$ Ф; 4 – $C = 15 \times 10^{-6}$ Ф (рис. 7–9).

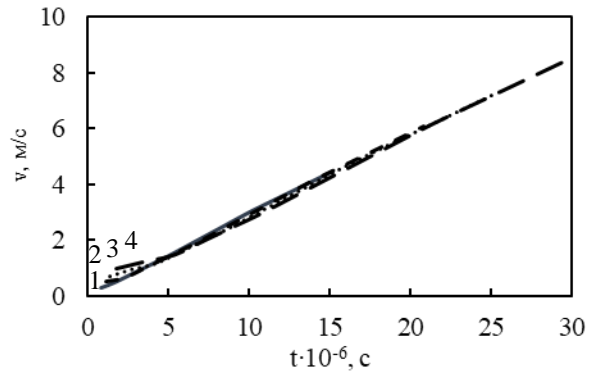
Анализ результатов позволил сделать вывод, что скорость и давление канала разряда практически не изменяются при увеличении емкости, а

ток значительно возрастает. Таким образом, увеличение емкости дает возможность без изменения величины давления существенно повысить энергию, расходуемую на разрушение неметаллических материалов в течение одного импульса и, таким образом, интенсифицировать производительность оборудования. Следует, однако, иметь в виду, что увеличение энергии, выделившийся в первый полупериод, не пропорционально увеличению емкости в накопительных конденсаторах. Емкость в накопителях изменялась (3; 6; 9; 15) $\times 10^{-6}$ Ф, то есть в отношении 1:2:3:5, а выделившаяся энергия – 1:1,6:2,4:3,5. Таким образом, при увеличении емкости конденсаторов энергия разрушения повышается непропорционально запасенной, то есть к.п.д. электроразрядной установки с возрастанием емкости снижается. Поэтому величину емкости накопителей необходимо рассматривать в зависимости от технологического процесса дезинтеграции неметаллических материалов для каждого вида индивидуально.



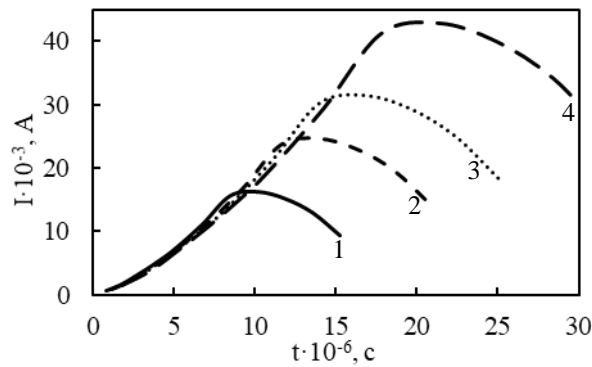
1 – $C = 3 \times 10^{-6}$ Ф; 2 – $C = 6 \times 10^{-6}$ Ф;
3 – $C = 9 \times 10^{-6}$ Ф; 4 – $C = 15 \times 10^{-6}$ Ф

Рис. 7. Изменение давления в канале разряда в зависимости от емкости.



1 – $C = 3 \times 10^{-6}$ Ф; 2 – $C = 6 \times 10^{-6}$ Ф;
3 – $C = 9 \times 10^{-6}$ Ф; 4 – $C = 15 \times 10^{-6}$ Ф

Рис. 8. Изменение скорости расширения канала разряда в зависимости от емкости.



1 – $C = 3 \times 10^{-6}$ Ф; 2 – $C = 6 \times 10^{-6}$ Ф;
3 – $C = 9 \times 10^{-6}$ Ф; 4 – $C = 15 \times 10^{-6}$ Ф

Рис. 9. Изменение величины тока в канале разряда в зависимости от емкости.

Таблица 3. Максимальные значения амплитуды давления, полученные расчетным путем

Напряжение $U \times 10^4$, В	Индуктивность $L \times 10^{-6}$, Гн	$P \times 10^8$, Па по формуле (16)	$P_m \times 10^8$, Па по формуле (17)	Погрешность, %
2,1	5,0	1,85	2,01	8,6
3,1	12,0	1,25	1,43	14,0
4,2	15,0	0,99	1,09	10,0
5	20,0	0,91	1,0	9,8

Полученные зависимости важны при расчете параметров электроразрядных установок и разработке технологии дезинтеграции прочных неметаллических материалов.

Для сравнения и определения погрешностей в табл. 3 показаны максимальные значения амплитуды давления, полученные расчетным путем по предложенному методу численного исследования (17)–(19) и по расчетной формуле (20) [6]:

$$P_m = 0,17 \left(\frac{\rho U^2}{Ll} \right)^{1/2}. \quad (20)$$

Анализ представленных в табл. 3 данных показал, что получено хорошее совпадение с точностью до 14% результатов расчетов по предложенному методу и известной расчетной формуле, что позволяет рекомендовать предложенный метод для практических расчетов

параметров электроразрядных установок для дезинтеграции неметаллических материалов.

Для установления зон эффективного разрушения неметаллических материалов необходимо определить изменение скорости потоков и величины импульса давления волн сжатия с увеличением расстояния до канала разряда. В процессе электроразрядной дезинтеграции прочных неметаллических материалов образуется многокомпонентная система, состоящая из твердого тела, заземленного воздуха и воды. Для разрядов цилиндрической симметрии, используемых для разрушения прочных неметаллических материалов, гидродинамическую скорость жидкости V и давление P_B в точке на расстоянии r от канала разряда позволяют рассчитать следующие уравнения [4]:

$$\beta V = \frac{1}{2} \left[\left(1 + (k+1) M^2 \frac{a^{1/2}}{r^{1/2}} M^2 g \right)^{1/2} - 1 \right], \quad (21)$$

Таблица 4. Результаты расчетов гидродинамических характеристик

№ п/п	t/τ	$t \times 10^{-6}$, с	v , м/с	$P \times 10^7$, Па
1	319,3	60,2	0,56	2,4
2	318,9	60,1	0,74	3,2
3	318,6	60,0	0,92	4,0
4	318,2	59,9	1,1	4,7
5	317,7	58,89	1,4	6,0
6	317,4	59,82	1,6	6,9
7	317,2	59,8	1,7	7,3
8	317,3	59,8	1,78	8,3
9	317,5	59,84	1,68	7,2
10	317,8	59,91	1,57	6,7

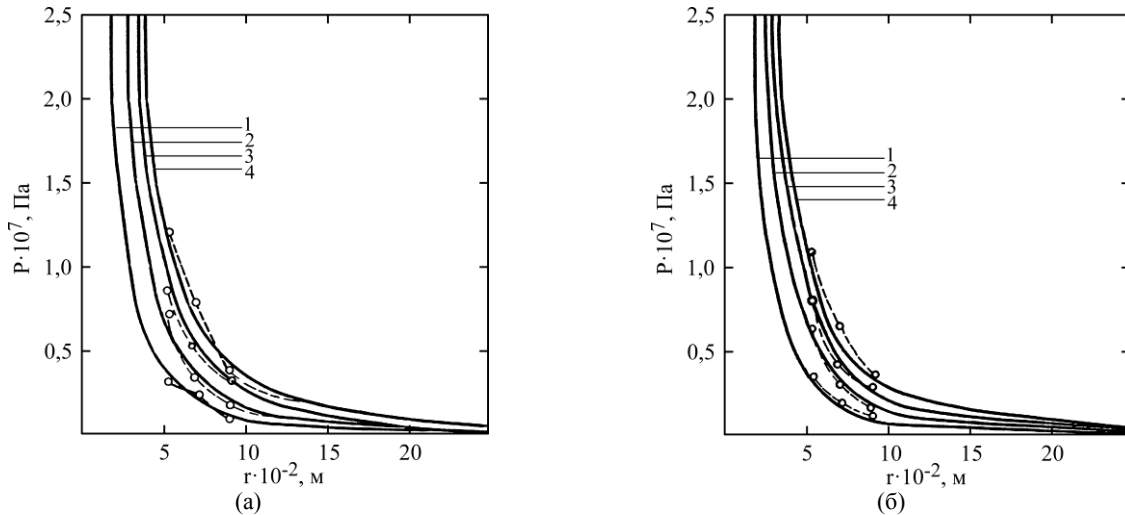
1 – $E = 1,65$ кДж; 2 – $E = 3,15$ кДж; 3 – $E = 4,48$ кДж; 4 – $E = 5,65$ кДж

Рис. 10. Изменение давления волн сжатия от расстояния до канала разряда: (а) – керамические стержни с прочностью на сжатие $\sigma_{сж} = 20$ МПа; (б) – металлургический кремний с прочностью на сжатие $\sigma_{сж} = 35$ МПа. Пунктирные кривые – результаты экспериментальных измерений.

$$P_B = A \left[\frac{2}{k+1} + \frac{k-1}{k+1} \left(1 + \frac{k+1}{r^{1/2}} a_0^{1/2} g M^2 \right)^{1/2} \right]^{\frac{2k}{k-1}} - B, \quad (22)$$

где $\beta = \frac{1+k}{4c_0}$; g – ускорение силы тяжести.

Решение уравнений (21), (22) позволяет определить значение гидродинамических характеристик за пределами канала разряда для электроразрядных нагрузений, характерных для дезинтеграции неметаллических материалов.

Результаты расчетов гидродинамических характеристик на расстоянии от канала разряда $r = 0,01$ м для параметров $U = 5 \times 10^4$ В, $C = 3 \times 10^{-6}$ Ф, $L = 5 \times 10^{-6}$ Гн, $l = 0,06$ м для водной среды представлены в табл. 4.

Для примера определена зависимость давления волн сжатия от расстояния до канала разряда при дезинтеграции неметаллических материалов с пределом прочности на сжатие 20 МПа (керамические литейные стержни) и 35 МПа (металлургический кремний). Данные приведены на рис. 10.

Полученные зависимости позволяют рассчитать радиус эффективного действия импульсов волн сжатия на разрушаемый

неметаллический материал с широким спектром физико-механических свойств. Из анализов результатов видно, что давление импульсов волн сжатия в многокомпонентных системах угасает при увеличении расстояния до канала разряда значительно быстрее, чем в воде. Для материалов с прочностью на сжатие $\sigma_{сж} \geq 35$ МПа радиус эффективного действия волн сжатия $r \leq 0,05$ м. Материалы с прочностью на сжатие $20 \text{ МПа} \leq \sigma_{сж} \leq 35$ МПа могут быть разрушены в радиусе $r \leq 0,07$ м.

Предложенный метод расчета гидродинамических характеристик электроразрядной дезинтеграции неметаллических материалов позволит решить большое количество вариантов сложных задач и аппроксимировать зависимость простыми аналитическими выражениями. Установленная аналитическая связь энергетических параметров разрядного контура с технологическими показателями дает возможность исключить ряд сложных экспериментов, сократить временные и материальные ресурсы для разработки электроразрядных технологий и оборудования дезинтеграции неметаллических материалов.

ВЫВОДЫ

1. Представленный метод численного исследования гидродинамических характеристик позволяет установить расчетным путем характеристики канала разряда и зоны эффективного разрушения в зависимости от расстояния от канала разряда для разработки технологического процесса дезинтеграции неметаллических материалов.

2. Представлены результаты, позволяющие находить оптимальные параметры технологических режимов электроразрядной дезинтеграции неметаллических материалов различной прочности. Определено, что U , C , L по-разному и довольно сложным образом влияют на характеристики канала разряда. При увеличении индуктивности происходит уменьшение давления и скорости расширения канала разряда, рост напряжения приводит к расширению активных характеристик канала разряда, а повышение емкости – к увеличению тока практически без изменений давления и скорости расширения канала разряда. Для различных технологий электроразрядной дезинтеграции совокупность параметров технологических режимов должна быть подобрана индивидуально для каждого вида материала.

3. Полученные зависимости позволяют находить эффективную зону разрушения для различных неметаллических материалов, которая зависит от параметров технологических режимов работы циклов, прочностных характеристик разрушаемого материала и электропроводности разрядной среды.

4. Получено хорошее совпадение результатов расчетов по предложенному методу и известной расчетной формуле, что позволяет рекомендовать указанный метод для практических расчетов параметров электроразрядных установок для дезинтеграции неметаллических материалов.

5. Оценка погрешности в пределах $\pm 15\%$ допускает использование предложенного метода для расчетов вместо сложных экспериментальных методов измерения гидродинамических характеристик канала разряда.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sizonenko, O. and Vovchenko, A., Pulsed discharge technologies of processing and obtainment of materials (review), *Machines. Technologies. Materials*, 2014, vol. 8, no. 12, p. 41.
2. Ризун, А.Р., Цуркин, В.Н., Электроразрядное разрушение неметаллических материалов, *ЭОМ*, 2002, т. 38, № 1, с. 83.
3. Rizun, A.R., Posdeev, V.A. and Golen, Yu.V., One-shot electrode systems for high-voltage electrochemical destruction of natural and artificial lumps, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2010, vol. 46, no. 3, p. 263.
4. Наугольных, К.А., Рой, Н.К., *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1971. 155 с.
5. Ризун, А.Р., Косенков, В.М., Голень, Ю.В., Денисюк, Т.Д., Разработка и внедрение электроразрядного процесса дезинтеграции металлургического кремния, *Наука та інновації*, 2010, т. 6, № 6, с. 25.
6. Кривицкий, Е.В., *Динамика электровзрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1984. 204 с.
7. Вовченко, А.И., Посохов А.А., Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах. Киев: Наукова думка, 1992. 168 с.
8. Ризун, А.Р., Голень, Ю.В., Денисюк, Т.Д., Методика расчета параметров установки электроразрядного разрушения неметаллических материалов, *ЭОМ*, 2003, № 4, с. 74.

Summary

A method for the calculation of high voltage discharge channel parameters (pressure, radius, and expansion velocity) for electric discharge units for destruction of non-metallic materials is presented. It allowed to investigate the influence of installation parameters (inductance, voltage and capacitance) on the hydrodynamic parameters of the discharge channel and generated pressure wave. It is noted that increasing inductivity results in decreasing pressure and expanding discharge channel rate, increasing voltage results in increasing active characteristics of the discharge channel, and increasing capacitance results in increasing discharge current, while pressure and expanding discharge channel rate remaining practically unchanged. The effective area of destruction which depends on the parameters of the technological modes of the cycles, strength properties of the destructible material and electrical conductivity of the discharge medium were determined. The recommendations for selecting operating modes of electrodischarge installations for disintegration of non-metallic materials have been given.

Keywords: hydrodynamic characteristics, electric discharge, discharge channel parameters, pressure wave, discharge channel expansion rate, fracture