

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ.

Часть I. ОДНООСТРИЙНАЯ ЭЛЕКТРОДНАЯ СИСТЕМА

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

Введение. Импульсный коронный разряд (ИКР) в проводящих жидкостях при определенных условиях характеризуется достаточно высокой интенсивностью гидродинамических возмущений, сравнимых, по крайней мере, с возмущениями, генерируемыми подводно-искровым разрядом. Такая гидродинамическая особенность присуща ИКР в сильных водных электролитах, для них разветвленная корона превращается в сплошное плазменное образование (СПО) [1–3]. При этом создается возможность формировать в жидкости поля давлений заданной конфигурации за счет как геометрии электрода-острия, так и большого количества острий, на которых одновременно зажигается разряд [4]. Это предопределило внимание к ИКР разработчиков технологических приложений электровзрыва в жидкости, особенно там, где объект обработки находится в агрессивных сильнопроводящих средах [5, 6].

Для ИКР с СПО предложен ряд математических моделей, состоящих из сложных систем нелинейных интегродифференциальных уравнений в частных производных, которые в достаточно точном приближении описывают процессы в разрядном промежутке – динамику СПО и переходного слоя плазма-жидкость, неоднородную диссипацию энергии в электролите [5, 7]. Расчет таких моделей требует больших мощностей компьютерного вычислительного процесса, и, как правило, существующие сегодня готовые программные продукты не способны в полной мере обеспечить решение поставленной задачи. В связи с этим приходится прибегать к получению аналитических зависимостей, которые хоть и снижают точность описания процесса ввиду принятых упрощающих допущений, однако быстрота расчета по таким зависимостям в достаточной степени удовлетворяет инженеров, проектирующих электроразрядные технологические устройства.

Данная статья посвящена разработке инженерной методики расчета технологических параметров ИКР – максимального давления на границе СПО и его радиуса, максимального давления на фронте волны сжатия на удалении от СПО и электроакустического КПД разряда для выбираемых внешних регулируемых параметров импульсного генератора в составе технологической электроразрядной установки. В первой части работы приведена методика расчета параметров для одноострийной электродной системы.

Постановка задачи. При постановке задачи, как и в [7], вводятся следующие допущения.

1. Плазменное образование имеет вид полусферического слоя, "посаженного" на основание положительного острия-электрода, которое можно рассматривать как твердую стенку. Удваивая энергию источника в соответствии с принципом зеркального отражения [2], можно моделировать динамику процесса, решая сферически симметричную задачу. При этом эквивалентные активные сопротивления отдельных элементов разрядного промежутка - плазменной области R_a и слоя электролита R_l – должны вычисляться для полусферических слоев.

2. Плазменное образование однородно по давлению и температуре, так как характерное время их выравнивания $\tau_{p,T} \sim a/c_a$ ($a \sim 10^{-3}$ м – радиус СПО, $c_a \approx 3000$ м/с - скорость звука в плазме) мало по сравнению с характерным временем изменения радиуса СПО $\tau_a \sim a/\dot{a}$ ($\dot{a} < 1000$ м/с [8]).

3. Потери энергии из СПО за счет радиационного излучения и теплопроводности малы [2], и поэтому эти составляющие не будут учитываться в уравнении энергобаланса.

© Богуславский Л.З., Электронная обработка материалов, 2009, № 5, С. 48–56.

4. Для плазменного образования справедливо искровое приближение, связывающее давление

P_a и электропроводность σ_a [9]:

$$P_a = A_s(\gamma - 1)\sigma_a, \quad (1)$$

при значениях искровой постоянной A_s и эффективном показателе адиабаты γ разрядной плазмы, соответствующих подводному искровому разряду [5].

5. Расширение СПО происходит в безграничной среде, что оправдано для времен $t < 2(r_s - a)/c_0$, меньших времени прихода к границе СПО отраженной от стенки камеры волны сжатия (c_0 – скорость звука в электролите).

6. Процесс зажигания разряда исключается из рассмотрения, поскольку для ИКР с СПО время зажигания короны и количество расходуемой на этой стадии электрической энергии несоизмеримо малы по сравнению с характерным временем и энергией разряда соответственно [3]. Следовательно, отсчет времени будет вестись от момента зажигания короны, и начальные условия для радиуса СПО и напряжения на промежутке запишутся в виде

$$a(0) = r_{эл}, \quad U(0) = U_0, \quad (2)$$

где $r_{эл}$ – радиус закругления острия электрода, U_0 – напряжение заряда конденсаторной батареи.

После зажигания СПО внутри него резко возрастает давление, и оно, расширяясь, вытесняет окружающую жидкость. Поскольку \dot{a} меньше скорости звука в жидкости, то сжимаемость последней можно учесть в квазиакустическом приближении, и тогда уравнение движения границы СПО, на которой имеет место массообмен между жидкостью и содержимым СПО, можно записать так [10]:

$$a \frac{dv_g}{dt} \left(1 - 2 \frac{v_g}{c_0}\right) + \frac{3}{2} v_g^2 \left(1 - \frac{4}{3} \frac{v_g}{c_0}\right) + \frac{P_0 - P_a(t)}{\rho_0} - \frac{a}{\rho_0 c_0} \left(1 - \frac{v_g}{c_0}\right) \frac{dP_a(t)}{dt} = 0, \quad (3)$$

где ρ_0 – равновесная плотность жидкости.

Уравнение энергетического баланса с учетом объема СПО в виде полусферического слоя $V(t) = 2\pi(a^3 - r_{эл}^3)/3$ и при принятых допущениях приведено к следующему виду:

$$\frac{2\pi a^2(t)}{(\gamma - 1)} \left[\gamma P_a(t) \frac{da(t)}{dt} + \frac{1}{3} a(t) \frac{dP_a(t)}{dt} \right] = N_a(t), \quad (4)$$

где выделяемая в СПО мощность $N_a(t) = I^2 R_a$ выражается через определяемую уравнением (3) функцию радиуса СПО, протекающий в разрядной цепи ток I и сопротивление плазмы R_a . Разрядный ток задается уравнением цепи:

$$L \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t Idt + I(R_a + R_l) = U_0, \quad (5)$$

сопротивление R_a в приближении однородности свойств плазмы по радиусу СПО имеет вид [7]:

$$R_a = \frac{1}{2\pi a \sigma_a} \left(\frac{a(t)}{r_{эл}} - 1 \right). \quad (6)$$

Определение максимальных параметров ИКР и его электроакустического КПД. При достижении максимума мощности, который соответствует для ИКР максимуму давления [5], к моменту времени t_m параметры примут следующие значения: $a(t) = a_m$; $P_a(t) = P_{am}$; $N_a(t) = N_{am}$; $da_m/dt_m = v_{am}$, и из (4) получим

$$P_{am} = \frac{(\gamma - 1)}{2\pi \left(\gamma + \frac{1}{3}\right)} \frac{N_{am}}{a_m^2 v_{am}}. \quad (7)$$

Из уравнения движения границы СПО (3) при допущениях $\frac{v_{am}}{c_0} < 1$ и $\frac{a_m}{t_m} \approx v_{am}$ можно полу-

чить

$$P_{am} = \frac{5\rho_0 a_m v_{am}}{2t_m \left(1 + \frac{v_{am}}{c_0}\right)}. \quad (8)$$

Откуда при подстановке a_m в (7) получим:

$$P_{am} = \left(\frac{25(\gamma - 1)N_{am}\rho_0^2 v_{am}}{8\pi(\gamma + \frac{1}{3})t_m^2 (1 + \frac{v_{am}}{c_0})^2} \right)^{1/3}. \quad (9)$$

Мощность электрической энергии, выделяющаяся в СПО к моменту t_m , определяется как

$$N_{am} = I_m^2 R_{am}, \quad (10)$$

где I_m , R_{am} – ток и сопротивление СПО в момент достижения времени t_m .

Максимальный ток разряда, который примем для наших расчетов соответствующим максимуму мощности, определяется по характеру электрического разряда емкостного накопителя на нагрузку. Он согласно [11] в контуре с емкостью C и индуктивностью L определяется по декременту затухания:

$$\delta = \frac{R_n}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (11)$$

где R_n – сопротивление нагрузки.

В случае $\delta < 1$ разряд будет колебательный, при $\delta \approx 1$ – критический и при $\delta > 1$ – разряд апериодический. Для ИКР сопротивление нагрузки – величина нелинейная, и потому декремент затухания определим в приближении к начальному сопротивлению разрядного промежутка:

$$\delta = \frac{1}{4\pi\sigma_0 r_{эл}} \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (12)$$

Для ИКР будут реализованы в основном критический и апериодический режимы разряда. Для них согласно [11] при линеаризации нелинейного сопротивления нагрузки по начальному, критическому разряду соответствует

$$I_m = \frac{U_0}{e} \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (13)$$

а апериодическому -

$$I_m = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} B^{-\frac{\delta}{\delta^2 - 1}}, \quad (14)$$

где e – основание натурального логарифма, U_0 – напряжение заряда емкостного накопителя, $B = \delta + \sqrt{\delta^2 - 1}$. Время достижения максимума тока для критического разряда $t_m = \sqrt{LC}$, а для апериодического -

$$t_m = \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{\delta^2 - 1}} \ln B. \quad (15)$$

Согласно последнему для апериодического разряда время достижения t_m должно смещаться в сторону меньших времен. Однако согласно экспериментальным данным [5] для максимума мощности такого не наблюдается в силу нелинейности сопротивления разрядного промежутка. Для инженерных расчетов с погрешностью не более 10% можно все же принять выражение (15).

Сопротивление СПО к моменту t_m примет вид

$$R_{am} = \frac{A_s(\gamma - 1)}{2\pi P_{am} a_m} \left(\frac{a_m}{r_{эл}} - 1 \right). \quad (16)$$

Таким образом, мощность для критического разряда можно представить как

$$N_{am} = \frac{A_s(\gamma - 1)U_0^2 C}{2\pi e^2 L P_{am} a_m} \left(\frac{a_m}{r_{эл}} - 1 \right) \quad (17)$$

и для апериодического -

$$N_{am} = \frac{A_s(\gamma-1)U_0^2 C}{2\pi B \frac{2\delta}{\sqrt{\delta^2-1}} L P_{am} a_m} \left(\frac{a_m}{r_{эл}} - 1 \right). \quad (18)$$

При подстановке (17) либо (18) в (9) с учетом $\frac{a_m}{r_{эл}} > 1$ получим:

$$P_{am} = \left(\frac{25(\gamma-1)^2 A_s U_0^2 k \rho_0^2 v_{am}}{16\pi^2 (\gamma + \frac{1}{3}) L^2 r_{эл} (1 + \frac{v_{am}}{c_0})^2} \right)^{1/4}, \quad (19)$$

где $k = e^{-2}$ – для критического разряда, $k = B \frac{-2\delta}{\sqrt{\delta^2-1}}$ – для аperiodического разряда.

Анализ полученной зависимости (19) указывает на слабую зависимость P_{am} от начальной проводимости жидкости (только через параметр δ). Однако экспериментальные данные [5] говорят о достаточно сильной зависимости мощности джоулевой диссипации энергии, выделившейся в разрядном промежутке от σ_0 . На рис. 1 приведена экспериментальная зависимость максимума мощности от начальной проводимости и получен аппроксимационный тренд этой зависимости. Потому для корректности расчетов введем в выражение (19) член $k^* \sigma_0$, где при $k^* = 0,126$ м/См взят наибольший коэффициент тренда:

$$P_{am} = \left(\frac{25(\gamma-1)^2 A_s U_0^2 k \rho_0^2 v_{am} k^* \sigma_0}{16\pi^2 (\gamma + \frac{1}{3}) L^2 r_{эл} (1 + \frac{v_{am}}{c_0})^2} \right)^{1/4}. \quad (20)$$

В выражении (20) остался один не определенный параметр v_{am} – скорость расширения СПО к моменту t_m . Согласно экспериментальным данным [12] в диапазоне электропроводностей жидкости $2 < \sigma_0 < 9$ См/м скорость расширения СПО не изменяется (вплоть до достижения токамак максимума), примерно одинакова для всех случаев и равна 1000 м/с.

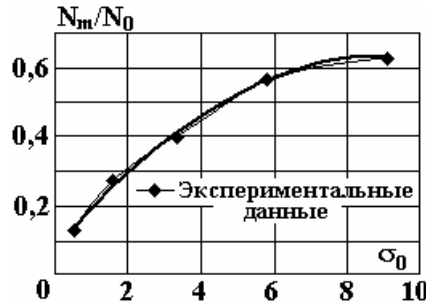


Рис. 1. Полиномиальная зависимость относительного максимума мощности от электропроводности электролита. $y = -0,0071x^2 + 0,1259x + 0,0739$

Радиус СПО к моменту достижения максимума тока определим из (8), по полученному выражению (20) найдем:

$$a_m = \left(\frac{(\gamma-1)^2 A_s U_0^2 C^2 k_{am} k^* \sigma_0 \left(1 + \frac{v_{am}}{c_0} \right)^2}{25\pi^2 (\gamma + \frac{1}{3}) r_{эл} \rho_0^2 v_{am}^3} \right)^{1/4}. \quad (21)$$

По аналогии с определением параметров волны сжатия по параметрам плазменной полости [13] на расстоянии r от оси сферической симметрии (центра радиуса закругления электрода) в акустическом приближении получим распределение давления в момент достижения максимума мощности:

$$P_m = \frac{P_{am}}{\bar{r}}, \quad (22)$$

где $\bar{r} = \frac{r}{a_m}$, r меняется от a_m до объекта технологической обработки.

Тогда при запасаемой энергии в емкостном накопителе $W_0 = \frac{CU_0^2}{2}$ получим следующее выражение:

$$P_m = \frac{(\gamma - 1)}{2\pi r} \left(\frac{2A_s W_0 k k^* \sigma_0}{(\gamma + \frac{1}{3}) r_{эл} v_{ам} L} \right)^{1/2}. \quad (23)$$

Анализ зависимости (23) показывает, что давление на фронте волны сжатия растет с увеличением запасенной энергии W_0 , электропроводности жидкости σ_0 , с уменьшением индуктивности L и начального радиуса электрода $r_{эл}$, что соответствует известным экспериментальным фактам. Также обращает на себя внимание тот факт, что для сферической симметрии, которая соответствует СПО при ИКР, при распространении волны сжатия с расстоянием давление уменьшается по закону $\frac{1}{r}$, что существенно быстрее, чем для цилиндрической симметрии канала подводно-искрового разряда, для которого соответствует закон $\frac{1}{\sqrt{r}}$ [13]. Таким образом, для поддержания соответствующего давления в технологиях с ИКР рабочий электрод необходимо как можно больше приближать к объекту обработки.

Проверку полученного выражения проведем по результатам сравнения расчета с экспериментальными данными из [14] (рис. 2). По представленным результатам наблюдается хорошее совпадение расчетных данных с экспериментальными как минимум при низких напряжениях заряда емкостного накопителя, что также говорит о правильности полученных зависимостей (20) и (21), которые входят в (23). Для напряжений порядка $U_0 \sim 50$ кВ не существует надежных экспериментальных данных по определению давления в ближней зоне ИКР с СПО.

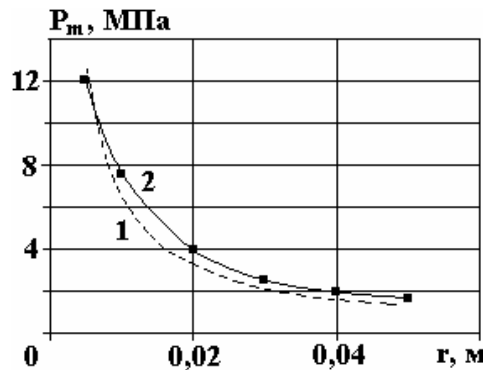


Рис. 2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных давления на фронте ударной волны для параметров $U_0=15$ кВ, $C=1$ мкФ, $L=2,4$ мкГ, $r_{эл}=5$ мм, $\sigma_0=5$ См/м. 1 – расчет; 2 – эксперимент

Электроакустический КПД ИКР, показывающий долю энергии, переведенную в акустическую $W_{ак}$, определяется как [14]

$$\eta = \frac{W_{ак}}{W_0}, \quad (24)$$

где W_0 – запасенная энергия емкостного накопителя. Акустическая энергия вычисляется по формуле:

$$W_{ак} = \frac{4\pi r^2}{\rho_0 c_0} \int_0^{\infty} P^2(t) dt. \quad (25)$$

В [13] получена зависимость для акустической энергии от P_m для времени, когда давление падает в 10 раз:

$$W_{ак} = \frac{4\pi r^2}{\rho_0 c_0} \frac{P_m^2 0,74 \tau \sqrt[4]{r}}{2 \ln(10)}, \quad (26)$$

где τ – время выделения энергии.

При подстановке в (24) выражений (26), (21) и (23) при $\tau = \sqrt{LC} \sqrt{\delta^2 - 1}$ для аperiodического разряда получим для электроакустического КПД ИКР:

$$\eta = \frac{0,32(\gamma - 1)^2 A_s k k^* \sigma_0 r^{\frac{1}{4}} \sqrt{\delta^2 - 1}}{\left(\gamma + \frac{1}{3}\right) \rho_0 c_0 r_{эл} v_{ам} a_m^{\frac{1}{4}} \sqrt{\frac{L}{C}}}. \quad (27)$$

Инженерная методика расчета. Начальными параметрами, определяющими режим ИКР, выступают: U_0 – напряжение заряда емкостного накопителя, C – емкость накопителя, W_0 – запасенная энергия накопителя, L – индуктивность разрядного контура, σ_0 – электропроводность электролита, $r_{эл}$ – радиус закругления острия электрода, r – расстояние от центра симметрии до места обработки, ρ_0 – плотность электролита.

Константы и физические параметры, используемые в расчете: $A_s = 10^5 (\text{В}^2 \cdot \text{с}) / \text{м}^2$ – искровая постоянная, $c_0 = 1400$ м/с – скорость звука в воде, $\gamma = 1,26$ – показатель ударной адиабаты, $k^* = 0,126$ м/См – коэффициент, учитывающий влияние электропроводности электролита, $v_{ам} = 10^3$ м/с – скорость расширения СПО к моменту максимума тока.

Расчет характеристик ИКР

Шаг I. Расчет условия получения ИКР с СПО по данным [16]:

$$\beta = \frac{\sigma_0 U_0^2 (LC)^{\frac{2}{3}}}{\rho_0 r_{эл}^4}.$$

Если $\beta > 0,2$, будет получен ИКР с СПО, если $\beta < 0,2$, необходимо изменить внешние регулируемые параметры U_0 , C , $r_{эл}$ для получения ИКР с СПО.

Шаг II. Расчет режима электрического разряда (12):

$$\delta = \frac{1}{4\pi\sigma_0 r_{эл}} \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

Если $\delta \approx 1$, то следует выбрать коэффициент $k = e^{-2}$; если $\delta > 1$, то – коэффициент $k = B \frac{-\delta}{\sqrt{\delta^2 - 1}}$, где $B = \delta + \sqrt{\delta^2 - 1}$.

Шаг III. Расчет максимума давления на стенке СПО (20):

$$P_{ам} = \left(\frac{25(\gamma - 1)^2 A_s U_0^2 k \rho_0^2 v_{ам} k^* \sigma_0}{16\pi^2 \left(\gamma + \frac{1}{3}\right) L^2 r_{эл} \left(1 + \frac{v_{ам}}{c_0}\right)^2} \right)^{1/4}.$$

Шаг IV. Расчет радиуса СПО, соответствующего максимуму мощности (21):

$$a_m = \left(\frac{(\gamma-1)^2 A_s U_0^2 C^2 k_{am} k * \sigma_0 \left(1 + \frac{v_{am}}{c_0}\right)^2}{25\pi^2 (\gamma + \frac{1}{3}) r_{эл} \rho_0^2 v_{am}^3} \right)^{1/4}$$

Шаг V. Расчет максимального давления на фронте волны сжатия (22):

$$P_m(r) = \frac{P_{am}(a_m + r_{эл})}{r}$$

Шаг VI. Расчет электроакустического КПД ИКР с СПО (27):

$$\eta = \frac{0,32(\gamma-1)^2 A_s k k * \sigma_0 r^{\frac{1}{4}} \sqrt{\delta^2 - 1}}{\left(\gamma + \frac{1}{3}\right) \rho_0 c_0 r_{эл} v_{am} a_m^{\frac{1}{4}} \sqrt{\frac{L}{C}}}$$

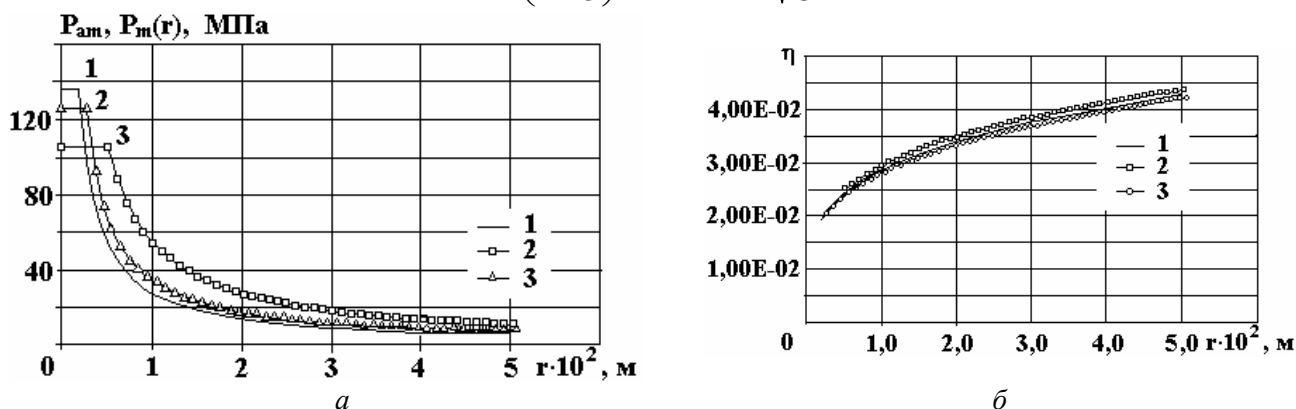


Рис. 3. Расчетные максимальные давления на стенке плазменной полости $P_{ам}$ и на фронте волны сжатия $P_m(r)$ (а) и электроакустический КПД ИКР (б) для различных радиусов электрода в зависимости от расстояния до СПО при $C=2$ мкФ, $U_0=50$ кВ, $L=6$ мкГ, $\sigma_0=2,2$ См/м. 1 – $r_{эл} = 1,75E-03$; 2 – $r_{эл} = 2,50E-03$; 3 – $r_{эл} = 5,00E-03$ м

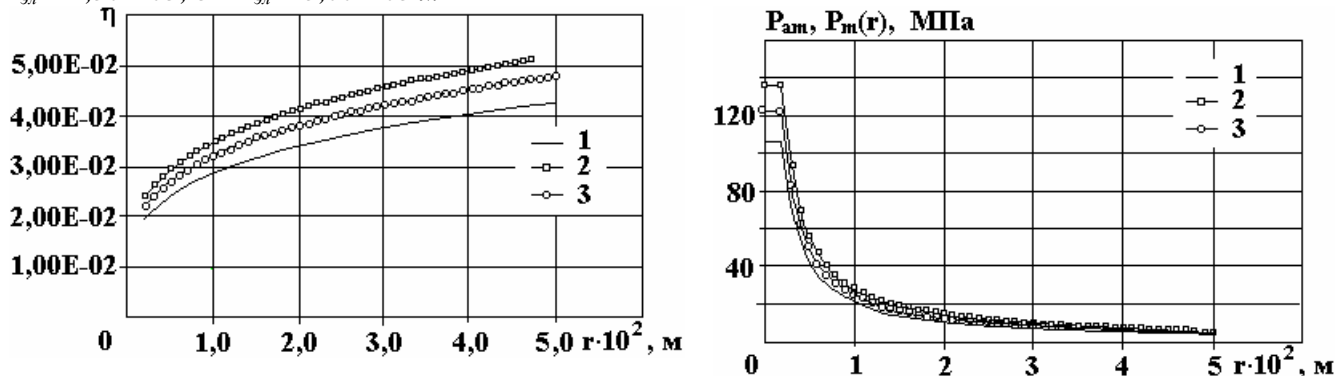


Рис. 4. Электроакустический КПД ИКР для различных емкостей накопителя в зависимости от расстояния до СПО при $r_{эл}=0,00175$ м, $U_0=50$ кВ, $L=6$ мкГ, $\sigma_0=2,2$ См/м. 1 – $C = 2,00E-06$; 2 – $C = 4,00E-06$; 3 – $C = 6,00E-06$ Ф

Рис.5. Расчетные максимальные давления на стенке плазменной полости $P_{ам}$ и на фронте волны сжатия $P_m(r)$ при $r_{эл}=0,00175$ м, $C=2$ мкФ, $U_0=50$ кВ, $L=6$ мкГ, $\sigma_0=2,2$ См/м для различных зарядных напряжений. 1 – $U_0 = 30000$; 2 – $U_0 = 40000$; 3 – $U_0 = 50000$ В

Результаты расчетов по предложенной методике представлены на рис. 3 для распределения максимума давления на стенке плазменной полости ИКР (полочка на зависимостях) и на фронте ударной волны (рис. 3,а) и электроакустического КПД разряда (рис. 3,б) при различных радиусах острия-электрода. Для параметров разрядного контура и среды выполняются условия $\beta > 0,2$ и $\delta > 1$, что соответствует выбранной модели СПО. Увеличение радиуса острия приводит к снижению амплитуды давления в СПО, хотя при этом более высокое давление распространяется на более дальнее расстояние от СПО. Электроакустический КПД разряда слабо зависит от радиуса электрода, увеличива-

ется с расстоянием от СПО и находится в пределах 2–4%. На рис. 4 приведены зависимости электроакустического КПД разряда от емкости конденсаторов накопителя генератора импульсных токов. Импульсы давлений ни по амплитуде, ни по распространению в пространстве практически не зависят от емкости. Электроакустический КПД существенным образом определяется емкостью и при $C = 6$ мкФ может достигать 8% для электрода малого радиуса. На рис. 5 приведены зависимости давлений для различных зарядных напряжений, из которых видно, что с увеличением напряжения растет давление. В целом характер изменения полученных расчетных данных соответствует известным экспериментальным зависимостям [5, 14].

Выводы. Полученные в работе аналитические зависимости основных технологических параметров ИКР со СПО – максимального давления на границе СПО и его радиуса, максимального давления на фронте волны сжатия на удалении от СПО и электроакустического КПД разряда – свидетельствуют о хорошем совпадении с известными экспериментальными результатами. Представленная инженерная методика расчета характеристик ИКР по внешним регулируемым параметрам импульсного генератора в составе технологической электроразрядной установки позволяет провести прогнозную оценку результатов воздействия ИКР на объект обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Остроумов Г.А.* Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М.: Наука, 1970. 320 с.
2. *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде М.: Наука, 1971. 155с.
3. *Богуславский Л.З., Кривицкий Е.В., Петриченко В.Н.* Электрогидродинамические явления при коронном импульсном разряде в сильных водных электролитах // Электронная обработка материалов. 1991. № 5. С. 51–54.
4. *Богуславский Л.З., Бристецкий Е.В., Кривицкий Е.В., Петриченко В.Н.* Исследование зажигания многофакельного коронного разряда в слабопроводящих электролитах// Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий. 2002. Вып. 4. С. 7–15.
5. *Богуславский Л.З., Кучеренко В.В., Кривицкий Е.В.* Динамика импульсного коронного разряда в водных электролитах. Николаев, 1993. 41с.(Препринт НАН Украины, ИИПТ №22).
6. *Петриченко С.В.* Протяженный коронный разряд в сильных водных электролитах// Электронная обработка материалов. 2005. № 2. С. 58–63.
7. *Шамко В.В., Богуславский Л.З.* Математическое моделирование коронного разряда в сильных водных электролитах // Теория, эксперимент, практика электроразрядных технологий. 2002. Вып. 4. С. 34–44.
8. *Богуславский Л.З., Хайнацкий С.А., Щербак А.Н.* Оптические исследования переходного слоя плазма-жидкость при импульсном коронном разряде в сильных водных электролитах // Журнал технической физики. 2001. Т. 71. Вып.2. С. 43–47.
9. *Кривицкий Е.В., Шамко В.В.* Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде. Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
10. *Акуличев В.А.* Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. М.: Наука, 1978. 280 с.
11. Техніка та електрофізика високих напруг / За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова. Харків: НТУ "ХП" - Торнадо, 2005. 930 с.
12. *Хайнацкий С.А., Шамко В.В., Богуславский Л.З.* Определение скорости прорастания импульсной короны в сильных электролитах // Электронная обработка материалов. 2005. № 5. С. 42–47.
13. *Шамко В.В., Кучеренко В.В.* Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда. Николаев, 1991. 51с. (Препринт НАН Украины, ИИПТ №18).
14. *Кучеренко В.В., Ищенко Ж.Н., Сидорук В.В., Богуславский Л.З.* Определение гидродинамических характеристик в ближней зоне искрового и коронного разрядов в жидкостях. Физическая модель // Электронная обработка материалов. 2001. № 3. С. 17–22.
15. *Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л.* Сейсмоакустические исследования на акваториях. М.: Недра, 1983. 204 с.
16. *Шамко В.В., Кривицкий Е.В., Кучеренко В.В.* Приближенное подобие электрофизических и кинематических процессов при импульсном коронном разряде в сильных водных электролитах // Журнал технической физики. 1999. Т. 69. Вып. 5. С. 30–34.

Summary

It is offered an engineering calculation method of technological parameters of pulse corona discharge - maximal pressure on the continuous plasma formation boundary and its radius, maximal pressure at the compression wave-front and discharge electroacoustic efficiency for the selectable external adjustable parameters of pulse generator in composition the technological electrical discharge equipment. The parameters calculation for the single-point is resulted at the first part of the work.
