

УДК 621.316.5:537.529

О ГРАНИЦАХ БЕСПЛАЗМЕННОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОВЗРЫВА ФОЛЬГИ

В. А. Демидов, В. И. Скоков

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607190 Саров

Приведены результаты экспериментальных исследований коммутационных характеристик электровзрывного размыкателя тока при нагреве медной фольги импульсом тока длительностью $\tau \approx 1$ мкс. Найдены зависимости напряженности электрического поля и удельной мощности размыкателя при электровзрыве фольги от удельной мощности источника $P_{\text{и}}$, и показано, что переход бесплазменного режима электровзрыва фольги в плазменный имеет место при $P_{\text{и}} = 30 \div 40$ ГВт/г.

Введение. Известно, что при нагреве фольги импульсами тока длительностью $\tau \approx 1$ мкс ее электровзрыв (ЭВФ) может протекать в основном в двух режимах. При первом [1] после ЭВФ сопротивление фольги $R \rightarrow \infty$, а ток $I \rightarrow 0$. Такой режим ЭВФ (назовем его бесплазменным) нашел применение в электровзрывных размыкателях тока (ЭВРТ) [2].

Исходя из температуры жидкой меди в начальной точке ЭВФ [3] при $\tau \approx 1$ мкс процесс нагревания фольги характеризуется скоростью увеличения ее температуры $dT/dt \geq 10^9$ К/с. Согласно расчетным оценкам [2, 4] в этом случае достигается значительная степень перегрева (метастабильности) жидкого металла и ЭВФ (переход в двухфазное состояние жидкость — пар) осуществляется путем гомогенного парообразования (объемного вскипания), сопровождающегося резким уменьшением давления и плотности металла. Например, в [5] при $\tau \approx 1$ мкс зарегистрирована скорость расширения продуктов электровзрыва алюминиевой фольги $v \approx 4$ км/с, что предопределяет высокую скорость роста сопротивления фольги, так как $v \sim d\gamma/dt \sim dR/dt$, где γ — плотность фольги. По модели, используемой в [2], эта скорость более чем на порядок меньше. Измерения [6] в ПММА (оргстекло) ударной волны, вызванной электровзрывом медной фольги толщиной 40 мкм в течение $\tau \approx 1$ мкс, показали, что профиль давления продуктов ЭВФ близок к треугольной форме с амплитудой порядка 10 ГПа и длительностью менее 1 мкс. При этом происходит уменьшение плотности и давления.

Высокая скорость роста сопротивления фольги, резкое уменьшение плотности и давления, сопровождающее ЭВФ при $\tau \approx 1$ мкс, облегчает развитие в продуктах электровзрыва ионизационных (плазменных) процессов. Эти процессы зависят от степени ионизации и сопровождаются квазипаузой тока [1, 2, 7] и дальнейшим нарастанием тока после ЭВФ [8], который используется для генерации и исследования плазменных режимов после электровзрыва.

Для использования ЭВФ при $\tau \approx 1$ мкс в ЭВРТ и получения его максимальных коммутационных характеристик (достижения высоких значений напряжения, мощности и короткого времени коммутации) необходим бесплазменный режим. В настоящее время интервалы мощности вводимой энергии, обеспечивающие такие режимы, не установлены. Решению этой задачи посвящена данная работа.

Выбор параметра, определяющего режимы ЭВФ. При выборе параметра, при котором анализируются режимы ЭВФ, использованы следующие соображения. В [1] в качестве параметра, определяющего на стадии нагрева степень метастабильности жид-

кой фазы и последующий рост сопротивления фольги при электровзрыве, использовалась удельная мощность ввода тепловой энергии в фольгу, определенная в начальной точке ЭВФ. Этот параметр может быть определен как с помощью некоторых расчетов, так и по мощности источника.

Действительно, для источника энергии ЭВРТ представляет собой активно-индуктивную LR -нагрузку. Энергия источника расходуется на создание магнитной энергии, связанной с индуктивностью, и нагрев фольги до состояния перегретой жидкости. Следовательно, баланс мощности источника $P_{\text{и}}$, приведенный к массе фольги $m_{\text{ф}}$, на стадии нагрева фольги и накопления магнитной энергии имеет вид $P_{\text{и}} = g + p$, $g = LI(dI/dt)/m_{\text{ф}}$, $p = I^2R/m_{\text{ф}}$, где L — индуктивность контура; I — сила тока. В начале работы источника ($R \approx R_0$) необходимо, чтобы мощность источника расходовалась на накопление в контуре магнитного потока, т. е. $P_{\text{и}} \approx g$, $P_{\text{и}} \gg p$, $R_0 \ll L(dI/dt)/I$. Однако в начальной точке ЭВФ ($t = 0$) $R \approx (25 \div 30)R_0$ [1], $I = I_{\text{max}} = I_0$, $dI/dt = 0$, и, следовательно, $P_{\text{и}} = p$. Таким образом, в этой точке величина удельной мощности энергопоглощения фольги равна удельной мощности источника.

При $t = 0$ зададим линейный закон нарастания сопротивления размыкателя и определим его коммутационные характеристики: максимальные значения напряжения U_m , мощности P_m , время коммутации t_E . Обычно на бесплазменной стадии ЭВФ изменение сопротивления фольги описывают экспоненциальной зависимостью [1], однако коммутационная способность размыкателя определяется интегралом $\int R(t) dt$, который мало зависит от вида $R(t)$. Поэтому при $t > 0$ зададим сопротивление размыкателя в виде

$$R = kt, \quad (1)$$

где k — коэффициент быстрогодействия размыкателя. Согласно [1] с увеличением квадрата плотности тока j_0^2 в начальной точке ЭВФ при бесплазменном режиме k возрастает. При ЭВФ сопротивление фольги возрастает на 2–3 порядка [2], поэтому значением R при $t = 0$ пренебрегаем.

В случае произвольной зависимости сопротивления размыкателя R от времени сила тока изменяется по закону

$$I = I_0 \exp\left(-\int \frac{R}{L} dt\right). \quad (2)$$

Поскольку напряжение U и мощность P на размыкателе определяются как

$$U(t) = I(t)R(t), \quad P(t) = I^2(t)R(t), \quad (3)$$

то, подставляя (1) в (2), а затем в (3) и дифференцируя U и P по t , получим максимальные напряжение на размыкателе и мощность

$$U_m = 0,6\Phi_0\sqrt{k/L}, \quad P_m = 0,43\Phi_0I_0\sqrt{k/L}, \quad (4)$$

где $\Phi_0 = LI_0$. Из (4) следует, что U_m пропорционально величинам \sqrt{k} и Φ_0 , а P_m — величинам \sqrt{k} , Φ_0^2 . Максимальные напряженность электрического поля в фольге и удельная мощность ЭВРТ при ЭВФ определяются следующим образом: $E = U_m/l$, $P_y = P_m/m_{\text{ф}}$, где l — длина фольги.

Процесс переброса энергии с индуктивного накопителя в нагрузку сопровождается выделением части запасенной энергии в размыкателе в виде тепла, и время коммутации t_E определяется его мощностью. При бесконечно большой нагрузке вся энергия $Q_0 = LI_0^2/2$ выделяется в размыкателе и $t_E = Q_0/P_m = 1,17\sqrt{L/k}$.

Влияние мощности источника на выходные напряжение и мощность ЭВРТ при бесплазменном режиме схематично показано на рис. 1, на котором представлена зависимость

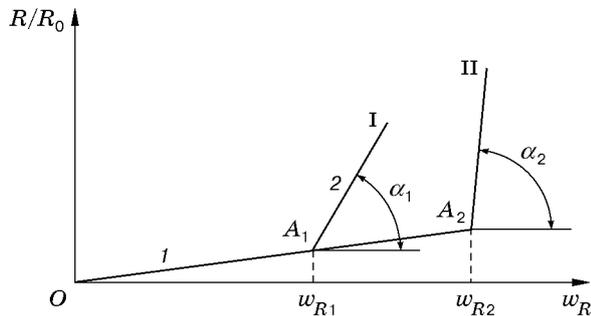


Рис. 1. Зависимость R/R_0 от удельной поглощенной энергии w_R при различных значениях мощности источника: I — удельная мощность $P_{и1}$, II — $P_{и2}$ ($P_{и2} > P_{и1}$); 1 — участок нагрева фольги, 2 — собственно электровзрыв

относительного сопротивления фольги R/R_0 от удельной поглощенной энергии w_R при различных значениях мощности источника. Зависимость $R/R_0 = f(w_R)$ состоит из двух участков, существенно отличающихся углом наклона к оси w_R . Участки нагрева фольги OA_1 и OA_2 аппроксимируются линейной зависимостью [2] $R/R_0 = 1 + \beta w_R$, где β — постоянная, и соответствуют нагреванию металла в твердом состоянии, его плавлению и нагреванию жидкого металла до начала парообразования. Изменение плотности металла на этой стадии сравнительно невелико, металл находится в конденсированном состоянии. Стадия собственно электровзрыва (участок 2) характеризуется резким и значительным расширением фольги, сопровождающимся возрастанием ее сопротивления на несколько порядков: $R/R_0 \approx 100$ (α_1 и α_2 — углы наклона зависимостей $R/R_0 = f(w_R)$ к оси w_R после электровзрыва). Точки A_1 и A_2 на рис. 1 соответствуют началу ЭВФ.

Как показано в [1], при увеличении $P_{и}$ наблюдается два существенных изменения в зависимости $R/R_0 = f(w_R)$: 1) начальная точка электровзрыва (точка A_1) сдвигается в сторону больших значений w_R и R/R_0 (точка A_2), $w_{R2} > w_{R1}$; 2) быстрее растет сопротивление фольги на стадии собственно электровзрыва, $\alpha_2 > \alpha_1$. Так как $P_{и} = p = j_0^2 \rho / \gamma$, где ρ — удельное сопротивление; γ — плотность, то с повышением $P_{и}$ в начальной точке ЭВФ увеличивается плотность тока. Вначале, при малых j_0 , согласно [1] это приводит к увеличению коэффициента быстродействия k размыкателя, одновременно при прочих равных условиях в контуре с ЭВРТ увеличивается разрываемый магнитный поток Φ_0 . Из (4) следует, что с увеличением k и Φ_0 также увеличиваются U_m и P_m . В то же время при некотором значении $P_{и}$ и j_0 характер зависимости $R(t)$ при ЭВФ должен измениться в связи с переходом продуктов электровзрыва в плазменное состояние [7–9]. Однако, так как разрываемый магнитный поток продолжает расти и зависимость U_m , P_m ЭВРТ от Φ_0 более сильная, чем от k , то, по-видимому, напряжение и мощность ЭВРТ будут также продолжать увеличиваться, на графиках зависимостей напряженности электрического поля $E(P_{и})$ и удельной мощности размыкателя $P_y(P_{и})$ должен появиться характерный излом и уменьшиться угол наклона кривых данных зависимостей. Эти соображения положены в основу определения по экспериментальным данным предельного значения $P_{и}$ бесплазменного режима ЭВФ.

Отметим, что функция $P_y(P_{и})$, по существу, является коэффициентом усиления мощности размыкателя.

Схема экспериментов. Экспериментальные исследования влияния удельной мощности источника на коммутационные характеристики ЭВРТ проводились на стенде, электрическая схема которого приведена на рис. 2. Начальный поток в накопительной индуктивности L_0 создавался при разряде конденсаторной батареи C после пробоя разрядника P . Зарядное напряжение батареи выбиралось таким, чтобы максимальная сила тока I_0 составляла $23 \div 25$ кА. В момент достижения максимума I_0 срабатывал взрывной размыкатель тока ВРТ и одновременно подключалась цепь с ЭВРТ с помощью взрывного ключа ВК. При разрыве накопительной индуктивности L_0 ВРТ формировал на ЭВРТ импульс тока треугольной формы длительностью примерно 1 мкс с амплитудой порядка 10 кА.

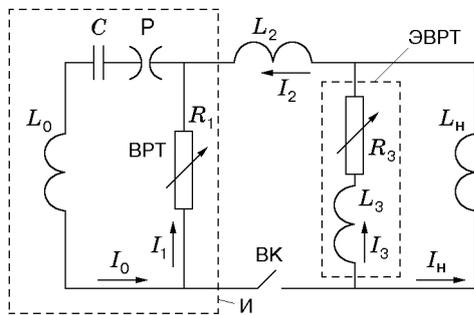


Рис. 2

Рис. 2. Электрическая схема экспериментального стенда:

$L_0 = 4,40$ мкГн — индуктивность накопительного контура; $L_2 = 0,51$ мкГн — буферная индуктивность; $L_3 = 0,16$ мкГн — индуктивность ЭВРТ; $L_н = 0,64$ мкГн — индуктивность нагрузки; ВРТ, ЭВРТ — взрывной и электровзрывной размыкатели тока; P — разрядник; ВК — взрывной ключ; $C = 240$ мкФ — конденсаторная батарея; И — источник энергии для зарядки ЭВРТ; R_1, R_3 — сопротивление ВРТ и ЭВРТ; $I_0, I_1, I_2, I_3, I_н$ — токи в накопительном контуре, ВРТ, буферной индуктивности, ЭВРТ и нагрузке

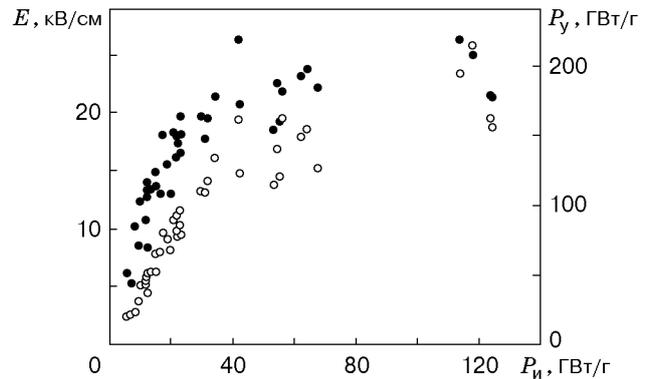


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость максимальной напряженности электрического поля ЭВРТ и удельной мощности ЭВРТ при ЭВФ от удельной мощности источника энергии:

темные точки — экспериментальная зависимость $E(P_и)$; светлые — $P_y(P_и)$

Во всех экспериментах в ЭВРТ использовалась медная фольга толщиной 20 мкм и сечением $S_ф = 0,02$ мм², длина фольги изменялась от 10 до 75 мм. Начальное сопротивление фольги R_0 составляло 8,6–65,0 мОм. Мощность источника в экспериментах изменялась от 70 до 220 МВт за счет применения различных типов ВРТ. Таким образом, удельная мощность источника варьировалась от 5 до 125 ГВт/г. Исследования зависимости напряженности электрического поля E и удельной мощности P_y при ЭВФ от удельной мощности источника $P_и$ проводились при плотности тока до $7 \cdot 10^7$ А/см². Электровзрыв фольги производился в среде кварцевого песка с размерами зерна не более 0,5 мм.

В экспериментах интегрирующими поясами Роговского регистрировались токи во всех цепях схемы, дифференцирующими поясами Роговского — производные тока dI_3/dt , $dI_н/dt$. Полное напряжение на ЭВРТ U_3 измерялось с помощью омического делителя, набранного из сопротивлений ТВО-10, или рассчитывалось по измеренной $dI_н/dt$. Точность измерения указанных величин в единичном опыте составляла не менее 10%. По измеренным $U_3, I_3, dI_3/dt$ и $dI_н/dt$ на стадии накопления магнитного потока в контуре ЭВРТ и нагрева фольги, а также на стадии собственно электровзрыва определялись $P_и, R_3, E$ и P_y (см. [1]).

Результаты экспериментов. Экспериментальные зависимости $E(P_и)$ и $P_y(P_и)$ приведены на рис. 3. Экспериментальная зависимость $E(P_и)$ в диапазоне $P_и = 5 \div 125$ ГВт/г удовлетворительно аппроксимируется выражением

$$E = 5,68 \ln P_и - 1,55, \quad (5)$$

где E измеряется в киловольтах на сантиметр, $P_и$ — в гигаваттах на грамм.

Полученная зависимость $E(P_и)$ является монотонно возрастающей функцией, имеющей два характерных интервала с существенно различной скоростью нарастания E . При $P_и = 5 \div 28$ ГВт/г эта зависимость имеет линейный характер, величина

$k_E = dE/dP_{\text{и}} \approx 0,8$; при $P_{\text{и}} = 28 \div 35$ ГВт/г на кривой имеется излом; на интервале $P_{\text{и}} = 40 \div 125$ ГВт/г среднее значение $k_E \approx 0,1$.

Экспериментальные точки $P_y(P_{\text{и}})$ в исследованном диапазоне $P_{\text{и}}$ аппроксимируются зависимостью, аналогичной (5). Монотонно возрастающая функция имеет также два интервала с заметным различием коэффициентов усиления мощности $k_p = dP_y/dP_{\text{и}}$. Длины первых интервалов, на которых величины k_E и k_p существенно выше, чем на вторых, примерно одинаковы ($P_{\text{и}} = 5 \div 35$ ГВт/г). На этих интервалах ЭВРТ работает в режиме усилителя мощности с постоянным коэффициентом усиления $k_p = dP_y/dP_{\text{и}} \approx 4$. При $P_{\text{и}} = 35 \div 40$ ГВт/г зависимость $P_y(P_{\text{и}})$ имеет излом, а при $P_{\text{и}} = 45 \div 125$ ГВт/г ЭВРТ работает в режиме ослабления мощности ($dP_y/dP_{\text{и}} \approx 0,7$).

Из проведенных экспериментов следует, что для получения максимальных напряжений и мощности ЭВРТ необходимо повышать мощность источника энергии. Эффективность функционирования размыкателя существенно зависит от величины $P_{\text{и}}$.

При $P_{\text{и}} \leq 30$ ГВт/г коэффициенты усиления мощности k_p и напряжения k_E имеют максимальное значение и являются постоянными параметрами размыкателя. Амплитудные значения U_m, P_m в зависимости от мощности источника энергии $W = P_{\text{и}}m_{\text{ф}}$ определяются следующим образом: $U_m = k_E W, P_m = k_p W$. При $P_{\text{и}} > 45$ ГВт/г k_E и k_p заметно уменьшаются. Выясним возможные причины этого явления. На основе экспериментальных зависимостей $E(P_{\text{и}})$ и $P_y(P_{\text{и}})$ и высказанных нами соображений по методике постановки эксперимента можно полагать, что при $P_{\text{и}} = 30 \div 40$ ГВт/г происходит изменение характера зависимости $R(t)$, связанное с переходом продуктов электровзрыва в плазменное состояние. На рис. 4 приведены осциллограммы $I_3(t)$ и $U_3(t)$ одного из опытов при $P_{\text{и}} = 69$ ГВт/г и $j_0 = 6,04 \cdot 10^7$ А/см².

Характер изменения сопротивления фольги в опыте аналогичен экспериментальным кривым $R_3(t)$, полученным в [7–9]. Сопротивление фольги $R_3(t)$ при ее нагревании до начальной точки ЭВФ медленно растет, затем резко, в течение примерно 0,1 мкс, нарастает до максимума и далее плавно, приблизительно за 1 мкс, уменьшается почти до нуля. В ЭВРТ наблюдается стадия квазипаузы тока: ток размыкателя после ЭВФ не прерывается, а остается достаточно большим (5 ÷ 6 кА) в течение более 3 мкс при почти нулевом напряжении.

Подробные исследования [2] ЭВФ алюминиевой фольги, помещенной в пылевидный кварц, подтвердили связь формирования квазипаузы тока с развитием световых ионизационных (плазменных) явлений. В режимах, в которых квазипауза тока не наблюдалась, световые ионизационные явления в [2] не регистрировались.

Оценку величины $P_{\text{и}}$, при которой происходит переход электровзрыва алюминиевой фольги в плазменный режим, можно провести исходя из следующих соображений:

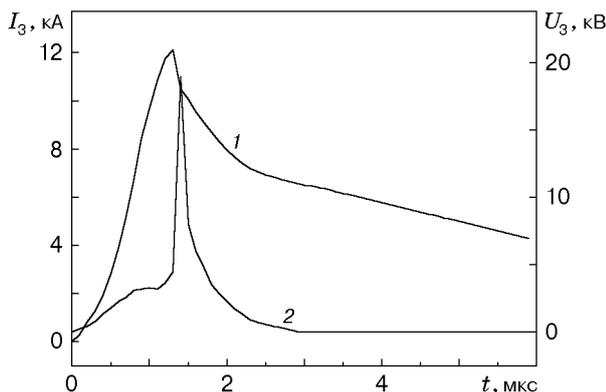


Рис. 4. Осциллограммы электровзрыва фольги при $P_{\text{и}} = 69$ ГВт/г:
1 — $I_3(t)$; 2 — $U_3(t)$

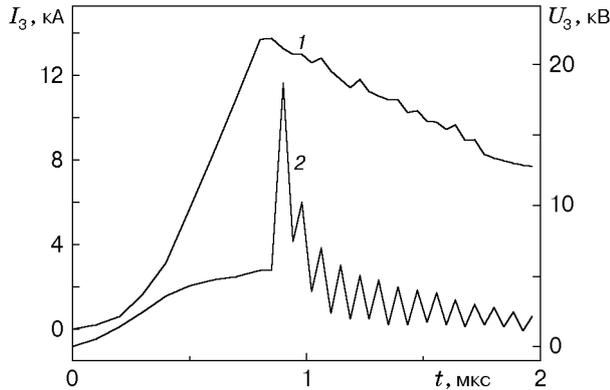


Рис. 5. Осциллограммы электровзрыва фольги при $P_{\text{и}} = 118$ ГВт/г:
1 — $I_3(t)$; 2 — $U_3(t)$

$P_{\text{и}}^{\text{Al}} = P_{\text{и}}^{\text{Cu}} Z$, где Z — коэффициент редукции. Поправочный коэффициент равен

$$Z = \frac{j_{\text{Al}}^2 \rho_{\text{Al}} \gamma_{\text{Cu}}}{j_{\text{Cu}}^2 \rho_{\text{Cu}} \gamma_{\text{Al}}}. \quad (6)$$

В начальной точке электровзрыва сомножители в (6) определяются через электрофизические свойства алюминия и меди [10, 11] в жидком состоянии. Первый сомножитель определяется удельным интегралом действия тока алюминия и меди в жидком состоянии [10] и приблизительно равен 0,4. Второй и третий сомножители примерно равны 1,6 и 3. Таким образом, $Z \approx 2$ и по порядку величины значения $P_{\text{и}}$, обеспечивающие плазменный режим, для алюминия совпадают со значением $P_{\text{и}}$ для медной фольги.

При переходе ЭВФ в плазменный режим обнаружено также явление пульсации напряжения на фольге. На рис. 5 приведены осциллограммы $I_3(t)$ и $U_3(t)$ при $P_{\text{и}} = 118$ ГВт/г. Частота затухающих колебаний составляет примерно 12 МГц, а их длительность — более 3 мкс. Поскольку в этом режиме активная составляющая напряжения примерно равна нулю ($R_3 \approx 0$), то колебания напряжения после ЭВФ могут быть связаны только с изменением собственной индуктивности фольги. При расширении продуктов ЭВФ давление в них резко уменьшается, в то время как давление магнитного поля практически остается постоянным ($I_3 \approx \text{const}$), что вызывает торможение и обратное движение плазмы. Фаза расширения продуктов ЭВФ сменяется их сжатием. При их осесимметричном торможении вновь происходит увеличение внутреннего давления и расширение продуктов электровзрыва.

Для обоснования данного предположения проведем расчетные оценки величины $I_3(dL_3/dt)$. Согласно [12] выражение для индуктивности одиночного провода прямоугольного сечения при высокой частоте можно приближенно записать в виде

$$L_3 \simeq \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{nl}{\delta + b} - 1 \right), \quad (7)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость; l , b , δ — длина, ширина и толщина фольги; n — постоянная. Продифференцируем (7) по t , предполагая, что при ЭВФ изменение L_3 происходит только при изменении толщины фольги, и умножим полученное выражение на I_3 . Тогда

$$I_3 \frac{dL_3}{dt} \simeq -I_3 \frac{\mu_0 l}{2\pi} v (b + \delta)^{-1}, \quad (8)$$

где $v = d\delta/dt$ — скорость расширения фольги. Подставляя в (8) $I_3 = 10^4$ А, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $l = 25 \cdot 10^{-3}$ м, $b + \delta = 10^{-3}$ м, $v = 10^6$ м/с, получим, что на стадии собственно электровзрыва фольги в выражении U_3 слагаемое, связанное с изменением индуктивности фольги, может составлять примерно 5 кВ. Полученная оценка удовлетворительно согласуется с экспериментальной зависимостью U_3 (рис. 5), амплитуда колебаний которой после ЭВФ относительно среднего положения также составляет несколько киловольт.

Необходимо отметить, что ток $I_3(dL_3/dt)$ может появляться только при плазменном режиме ЭВФ. Кроме того, указанная оценка $I_3(dL_3/dt)$ и возможная нестабильность от опыта к опыту ее величины из-за изменения картины электрического разряда позволяют объяснить заметный разброс экспериментальных точек $E(P_{и})$ и $P_y(P_{и})$ при плазменном режиме, поэтому регистрация и анализ коммутационных характеристик ЭВРТ в этом режиме, по-видимому, не имеют смысла.

Выводы. В исследованном диапазоне удельной мощности источника $P_{и} = 5 \div 125$ ГВт/г для режима нагрева медной фольги при плотности тока $j \approx 10^7$ А/см² и длительности импульса тока $\tau \approx 10^{-6}$ с напряженность электрического поля E и удельная мощность ЭВРТ P_y при ЭВФ монотонно растут соответственно от 5,4 до 25,0 кВ/см и от 20 до 214 ГВт/г. В интервалах $P_{и} = 5 \div 28$ ГВт/г и $P_{и} = 5 \div 35$ ГВт/г с увеличением $P_{и}$ быстро увеличиваются E и P_y соответственно. При $P_{и} < 30$ ГВт/г зависимости $E(P_{и})$ и $P_y(P_{и})$ имеют линейный характер, а ЭВРТ имеет постоянный коэффициент усиления мощности. Уменьшение угла наклона кривых зависимостей $E(P_{и})$ и $P_y(P_{и})$ при $P_{и} > 45$ ГВт/г и $j > 6 \cdot 10^7$ А/см² в ЭВРТ наступает после ЭВФ вследствие перехода медной фольги в плазменное состояние. Бесплазменный режим ЭВФ осуществляется при удельной мощности источника $P_{и} < 30$ ГВт/г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрезен А. Б., Бурцев В. А., Водовозов В. М., Дроздов А. А. Исследование коммутационных свойств электрически взрывааемых фольг в дугогасящих средах // Журн. техн. физики. 1980. Т. 50, вып. 11. С. 2283–2294.
2. Бурцев В. А., Калинин Н. В., Лучинский А. В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Мартынюк М. М., Пантелейчук О. Г. Определение критической температуры металлов методом электрического взрыва проводников под давлением // Теплофизика высоких температур. 1976. Т. 14, № 6. С. 1201–1205.
4. Мартынюк М. М. Роль испарения и кипения жидкого металла в процессе электрического взрыва проводника // Журн. техн. физики. 1974. Т. 44, № 6. С. 1262–1270.
5. Байков А. П., Белого В. А., Искольдский А. М. и др. Исследование электрического взрыва фольг // Физика горения и взрыва. 1973. № 2. С. 286–290.
6. Павловский А. И., Кашинцов В. И., Глушак Б. Л., Новиков С. А. Генерирование механического импульса электровзрывом проводника // Физика горения и взрыва. 1983. № 3. С. 124–126.
7. Байков А. П., Герасимов Л. С., Искольдский А. М. Экспериментальное исследование электрической проводимости алюминиевой фольги в процессе электрического взрыва // Журн. техн. физики. 1975. Т. 45, № 1. С. 49–55.
8. Бурцев В. А., Бездольный А. М., Дубянский В. А. и др. Исследование электрического взрыва цилиндрических фольг в воздухе. 3. Сильноточный расходящийся разряд // Журн. техн. физики. 1980. Т. 50, № 6. С. 1216–1225.
9. Байков А. П., Искольдский А. М., Нестерихин Ю. Е. Электрический взрыв проволочек при высоких скоростях ввода энергии // Журн. техн. физики. 1973. Т. 43, вып. 1. С. 136–141.
10. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
11. Gathers G. R. Thermophysical properties of liquid copper and aluminum // Intern. J. Thermophys. 1983. V. 4, N 3. P. 209–226.
12. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справ. кн. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.

Поступила в редакцию 1/IV 1998 г.,
в окончательном варианте — 22/IX 1998 г.