

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 533.9.03+621.793

## О ВЫБОРЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ

Ю.М. Гришин, М.В. Рыдкин, С.А. Яриков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

e-mail: ygrishin@power.bmstu.ru; maks.rydkin@gmail.com; ser.yarikov@gmail.com

*Исследовано влияние основных электротехнических и геометрических параметров импульсного плазменного ускорителя второй ступени гибридной двухступенчатой импульсно-периодической плазменной установки атмосферного давления на параметры генерируемого высокоэнергетического импульсного плазменного образования. Исследование процессов на стадии импульсного высокопоточного разряда проведено на основе системы уравнений электродинамического приближения. Выполнены численные расчеты и определены особенности ускорения плазменного образования в канале импульсного плазменного ускорителя. Показана связь между основными электротехническими и геометрическими параметрами импульсного плазменного ускорителя и скоростью плазменного образования. Сформулированы основные рекомендации по выбору схемного исполнения емкостного накопителя импульсного плазменного ускорителя. Показано, что для двухступенчатых импульсно-периодических плазменных установок атмосферного давления оптимальной является одно- или двухзвенная LC-цепь емкостного накопителя. Определены параметры разрабатываемых технологических установок, обеспечивающих формирование плазменных образований со скоростями до 5...6 км/с.*

**Ключевые слова:** импульсная плазменная технологическая установка, модификация свойств поверхностных слоев, импульсный плазменный ускоритель, методы расчета, электродинамическая модель, параметры емкостного накопителя.

## ON THE CHOICE OF PARAMETERS OF PULSED PLASMA PROCESS FACILITY

Yu.M. Grishin, M.V. Rydkin, S.A. Yarikov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

e-mail: ygrishin@power.bmstu.ru; maks.rydkin@gmail.com; ser.yarikov@gmail.com

*The article describes the study of the influence of the basic electrical and geometrical parameters of a pulsed plasma accelerator of the second stage hybrid pulse-periodic plasma system under the atmospheric pressure on the parameters of generated high-powered pulsed plasma formation. Investigation of the processes at the stage of pulsed high-current discharge was carried out on the basis of an electrodynamic approximation equation system. Numerical simulations are performed and characteristics of the plasma formation acceleration in the channel of the pulsed plasma accelerator are obtained. The relationship between the basic electrical and geometrical parameters of the pulsed plasma accelerator and the speed of the plasma*

*formation is shown. The basic guidelines for choosing a scheme of the capacitive storage for the pulsed plasma accelerator are defined. It is shown that for the double-stage pulse-periodic plasma system under the atmospheric pressure one or two-circuits LC capacitive storage is optimal. The main parameters of the developed technological systems, ensuring generating plasma formations with the speed of 5–6 km/s, are determined.*

**Keywords:** pulsed plasma process facility, modification of surface layer properties, pulse plasma accelerator, calculation methods, electrodynamic model, parameters of capacity storage.

В настоящее время импульсные сильноточные разряды, генерирующие высокоскоростные плазменные образования, находят применение для решения различных технологических задач, связанных с модификацией свойств поверхностных слоев конструкционных материалов. Они используются как для импульсной термообработки поверхностей металлов, так и для технологий высокоскоростного импульсного напыления. Однако существующие источники высокоэнергетических импульсных плазменных потоков нормально функционируют либо в вакууме, либо в условиях пониженного давления окружающей среды (1...10 торр) [1–3]. Создание плазменных установок, работающих в среде атмосферного давления, связано с трудностями организации импульсного разряда при относительно низких начальных напряжениях и с высокой (до 5 Гц) частотой повторения импульсов.

Одним из направлений при создании технологических установок, генерирующих высокоэнергетические импульсные плазменные образования, работающих при нормальных атмосферных давлениях, является применение двухступенчатых импульсно-периодических плазменных установок (ИППУ).

В качестве первой ступени ИППУ в одних случаях [4] используют специальные импульсные генераторы плазмы (ИГП), в других [5] — постоянно работающая система стационарных плазмотронов (ССП). Плазменные системы первой ступени создают плазму пониженной (относительно плотности окружающей атмосферы) плотности в электродном канале коаксиального импульсного плазменного ускорителя (ИПУ), являющегося во всех случаях второй ступенью ИППУ.

Известные экспериментальные данные [4, 5] показывают, что предварительное создание разреженной низкотемпературной плазмы в канале ИПУ обеспечивает, во-первых, возможность относительно низковольтного пробоя, во-вторых, снижение массы ускоряемого плазменного образования при мощном сильноточном импульсном разряде ИПУ и, в-третьих, отсутствие эффекта спицеобразования и формирование плазменного образования с азимутальной симметрией.

В этой подготовленной среде низкотемпературной плазмы осуществляется мощный импульсный разряд, инициируемый в начале электродного канала. Формирующееся при разряде плазменное образование распространяется под действием электромагнитных (и газоди-

намических) сил по электродному каналу ИПУ, на выходе которого скорость плазмы может достигать значений 3...5 км/с и более.

После завершения сильноточного импульсного разряда (длительностью порядка 0,1 мс) непрерывно работающая ССП или ИГП обеспечивают повторное заполнение низкотемпературной разреженной плазмой канала ИПУ и работающая в периодическом режиме высоковольтная система электропитания (включающая высоковольтный блок зарядки) с заданной скважностью осуществляет следующий импульсный сильноточный разряд и т.д.

В качестве высоковольтной системы электропитания ИПУ как правило используются емкостные накопители энергии, причем на практике рассматриваются различные варианты их реализации, начиная от использования одиночной емкости [4] и заканчивая многозвенными емкостными формирующими линиями [5]. Очевидно, что число звеньев, значения емкости и индуктивности звена накопителя энергии ИПУ могут оказывать определяющее влияние на все основные параметры ИППУ. Поэтому расчет и выбор оптимальных схемных вариантов и параметров источника электропитания и электродного канала ИПУ для различных технологических ИППУ является актуальной задачей.

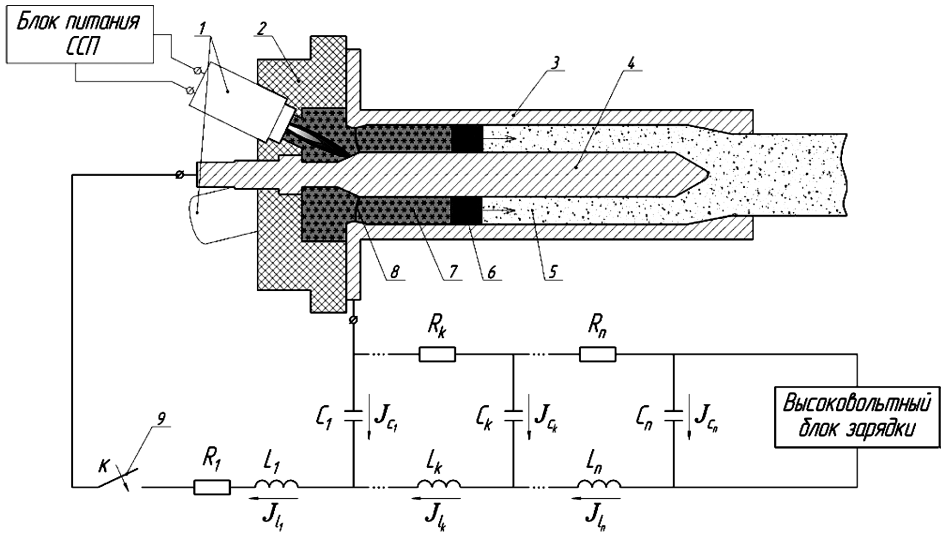
**Постановка задачи.** В работе [6] разработана приближенная модель, описывающая динамику формирования и ускорения плазменного образования в двухступенчатой ИППУ с использованием ССП в качестве генератора низкотемпературной плазмы первой ступени (рис. 1).

В рамках модели [6] на основе численного решения трехмерной стационарной системы уравнений тепломассообмена получены данные о пространственном распределении плотности плазмы, генерируемой ССП и заполняющей электродный канал ИПУ перед осуществлением импульсного сильноточного разряда. По результатам расчетов было установлено, что распределение массы плазмы по длине канала  $z$  может быть аппроксимировано квадратичной функцией:

$$\frac{m(z)}{m_0} = \left( \frac{z(t)}{l} \right)^2, \quad (1)$$

где  $l$  — длина электродного канала;  $m_0 = m(l)$  — полная масса газа в канале. Как показали расчеты, полная масса газа в канале зависит от мощности плазмотронов в ССП, расхода и температуры плазмообразующего газа, длины и поперечных размеров электродного канала.

В работе [6] описание процессов формирования и ускорения плазменного образования в электродном канале ИПУ на стадии импульсного сильноточного разряда проведено на основе электродинамической модели “snowplow” [7–9], в которой плазменное образование рассматривается как плоский азимутально симметричный поршень, по которому протекает ток разряда (см. рис. 1, поз. 6). Считается, что



**Рис. 1. Схема ИППУ с ССП:**

1 – стационарные электроды; 2 – межэлектродная вставка; 3 – анод; 4 – катод; 5 – область невозмущенного стационарного течения плазмы; 6 – формируемое плазменное образование; 7 – газ слева от движущегося плазменного образования; 8 – зона инициации импульсного разряда; 9 – коммутатор импульсного сильноточного разряда

поршень переменной массы  $m(z)$  движется под действием силы магнитного давления, а силами газостатического давления среды можно пренебречь. Такое допущение оправдано [8] наличием перетока части нагретой плазмы через поршень, так что ускоряется лишь часть газа, выталкиваемая поршнем, а другая часть попадает обратно в область слева от поршня, образуя область нагретого (до температуры 3...4 кК) газа с приблизительно атмосферным давлением.

Следует обратить внимание на то, что ускорение магнитного поршня осуществляется до скоростей  $v_n$ , превышающих скорость звука в разреженной плазме. Поэтому перед поршнем формируется ударная волна (УВ), движущаяся со скоростью  $D$  и вовлекающая в движение

дополнительную к  $m(z(t))$  массу газа  $\Delta m_{yb}(t) \approx \rho_n S \int_0^t (D - v_n) dt$

(здесь  $\rho_n$  – плотность ударно сжатого газа в поршне,  $S$  – площадь поперечного сечения канала ИПУ). Учитывая, что для сильной УВ:  $D \approx \frac{\gamma + 1}{2} v_n$ , а значение показателя адиабаты  $\gamma$  в области температур разреженной плазмы  $T_n \approx 3$  кК составляет 1,2–1,25 (для воздуха), то, следовательно, масса вытесненного поршнем га-

за  $m(z(t)) = \rho_n S \int_0^t v_n dt$  существенно больше, чем  $\Delta m_{yb}(t) \approx$

$\approx \frac{\gamma - 1}{2} m(z(t)) \approx (0,1 - 0,125) m(z(t))$ . Таким образом, в первом приближении можно считать, что масса движущегося ударно-волнового образования определяется в каждый момент времени  $t$  как масса  $m(z)$  вытесненного поршнем газа из канала на участке с координатами от 0 до  $z(t)$  и рассчитывается по формуле (1) с учетом коэффициента уменьшения ускоряемой массы газа  $\beta$  за счет эффекта перетока газа:

$$m(z) = \beta m_0 (z(t)/l)^2,$$

где  $\beta$  приблизительно оценивается как 0,6–0,8.

В работе [5] количественный анализ динамики ускорения плазменного образования в электродном канале ИПУ выполнен для импульсного сильноточного разряда с одиночным емкостным накопителем энергии.

В настоящей работе на основе модели [6] сформулирована расчетная модель и проведено исследование процессов в ИПУ на стадии сильноточного импульсного разряда, когда в качестве источника электропитания использована  $n$ -звенная емкостная формирующая линия (см. рис. 1).

**Расчетная модель.** Система уравнений, описывающая стадию сильноточного импульсного разряда, включает в себя уравнение движения поршня под действием электромагнитной силы:

$$\frac{d}{dt} \left( m \frac{dz}{dt} \right) = \frac{J_{L_1}^2}{2} \frac{dL_{\text{пл}}}{dz}, \quad (2)$$

а также систему уравнений (на основе законов Кирхгофа) разрядного электрического контура, представляющего многозвенную формирующую LC-цепочку [7]:

$$\sum_{k=1}^{i-1} \left\{ C_k \sum_{j=k+1}^n \left( L_j \frac{d^2 J_{L_j}}{dt^2} + R_j \frac{dJ_{L_j}}{dt} \right) + \frac{C_k}{C_n} J_{L_n} \right\} - J_{L_1} + J_{L_i} = 0,$$

$$i = 2 \dots n;$$

$$C_n \left[ \sum_{j=1}^n \left( L_j \frac{d^2 J_{L_j}}{dt^2} + R_j \frac{dJ_{L_j}}{dt} \right) + \frac{d^2 (L_{\text{пл}} J_{L_1})}{dt^2} + R_{\text{пл}} \frac{dJ_{L_1}}{dt} \right] + J_{L_n} = 0, \quad (3)$$

где  $n$  — число LC-звеньев в формирующей линии;  $J_{L_j}$  — ток через индуктивность  $j$ -го звена,  $C_j$ ,  $L_j$ ,  $R_j$  — соответственно емкость, индуктивность и активное сопротивление элементов контура  $j$ -го звена,  $L_{\text{пл}} = bz(t)$  — индуктивность плазменного образования ( $b = 2 \times 10^{-7} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \text{ Гн/м}$ ),  $R_{\text{пл}}$  — активное сопротивление плазмы.

Система (2), (3) дополняется следующими начальными условиями ( $t = 0$ ):

$$z = 0, \quad \frac{dz}{dt} = 0 \quad (\text{для } j = 1, \dots, n); \quad \frac{dJ_{L_1}}{dt} = \frac{U_0}{L_1} \quad (\text{для } j = 2 \dots n),$$

где  $U_0$  – начальное напряжение зарядки конденсаторов.

В настоящей работе исследование проведено для случая

$$\begin{aligned} R_1 &= R_0; \\ R_2 &= \dots = R_k = \dots = R_n = 0; \\ C_1 &= \dots = C_k = \dots = C_n = C_0; \\ L_1 &= \dots = L_k = \dots = L_n = L_0. \end{aligned} \tag{4}$$

Вводя следующие безразмерные переменные:

$$\tilde{z} = \frac{z}{z_{\text{хар}}}, \quad \tau = \frac{t}{t_{\text{хар}}}, \quad \widetilde{J}_L = \frac{J_L}{J_{\text{хар}}}, \tag{5}$$

где характерные масштабы определены как

$$z_{\text{хар}} = l, \quad t_{\text{хар}} = \sqrt{L_0 C_0}, \quad J_{\text{хар}} = U_0 \sqrt{\frac{C_0}{L_0}},$$

систему (2), (3) с учетом (4), (5) можно записать в безразмерном виде

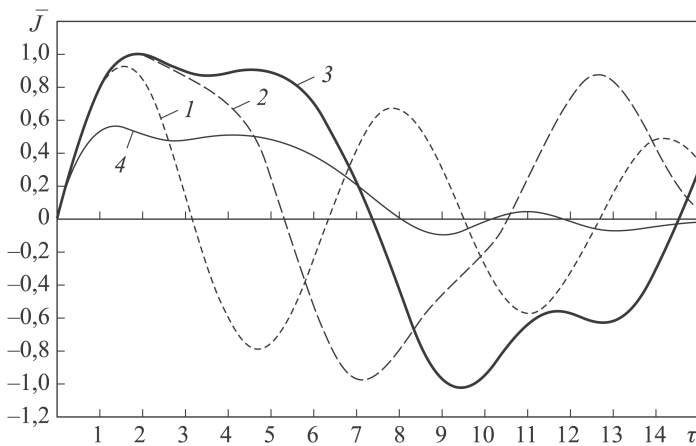
$$\begin{cases} \frac{d^2}{d\tau^2} (\tilde{z}^3) = \frac{3}{2} A \widetilde{J}_{L_1}^2; \\ \sum_{k=1}^{i-1} \left\{ \sum_{j=k+1}^n \left( \frac{d^2 \widetilde{J}_{L_j}}{d\tau^2} \right) + \widetilde{J}_{L_n} \right\} - \widetilde{J}_{L_1} + \widetilde{J}_{L_i} = 0, \quad i = 2, \dots, n; \\ \sum_{j=1}^n \left( \frac{d^2 \widetilde{J}_{L_j}}{d\tau^2} \right) + \theta \frac{d^2 (\tilde{z} \widetilde{J}_{L_1})}{d\tau^2} + \varepsilon \frac{d\widetilde{J}_{L_1}}{d\tau} + \widetilde{J}_{L_n} = 0 \end{cases} \tag{6}$$

с начальными условиями ( $\tau = 0$ )

$$\tilde{z} = 0, \quad \frac{d\tilde{z}}{d\tau} = 0 \quad (\text{для } j = 1, \dots, n),$$

$$\frac{d\widetilde{J}_{L_1}}{d\tau} = 1, \quad \frac{d\widetilde{J}_{L_j}}{d\tau} = 0 \quad (\text{для } j = 2, \dots, n).$$

В системе (6) выделены следующие безразмерные комплексные параметры:  $A = \frac{bC_0^2 U_0^2}{\beta m_0 l}$ ,  $\varepsilon = R_{\Sigma} \sqrt{C_0/L_0}$ ,  $\theta = \frac{bl}{L_0}$ , где  $R_{\Sigma} = R_0 + R_{\text{пл}}$  – полное активное сопротивление первого звена формирующей линии. При расчетах полагали, что активное сопротивление плазмы является постоянной величиной.



**Рис. 2.** Зависимость безразмерного тока от безразмерного времени для  $A = 0,1$ ,  $\theta = 0,01$ :

1 –  $n = 1$ ,  $\varepsilon = 0, 1$ ; 2 –  $n = 2$ ,  $\varepsilon = 0, 1$ ; 3 –  $n = 3$ ,  $\varepsilon = 0, 1$ ; 4 –  $n = 3$ ,  $\varepsilon = 1$

Следует обратить внимание на то, что безразмерные комплексные параметры  $A$  и  $\varepsilon$  определяются по емкости  $C_0$  одиночного звена формирующей линии.

Система уравнений (6) решалась численно при вариации безразмерных критериев в диапазонах:  $A = (0,01 \dots 10)$ ,  $\varepsilon = (0,01 \dots, 2)$ ,  $\theta = (0,01 \dots 1)$ .

**Результаты расчета.** На рис. 2 приведены зависимости безразмерного тока разряда  $\tilde{J}$  от безразмерного времени  $\tau$  при вариации числа звеньев  $n$  емкостной формирующей линии от одного до трех. Видно, что уровень максимального тока  $\tilde{J}_m$  и время его достижения  $\tau_m \approx 1,5$  практически не зависят от  $n$ . Параметр  $\tilde{J}_m$  зависит от декремента затухания  $\varepsilon$  и приближенно может быть аппроксимирован зависимостью  $\tilde{J}_m = \exp(-0,7\varepsilon)$ . Размерные значения времени возрастания тока разряда ( $\approx 1,5\sqrt{L_0C_0}$ ) и уровня его максимального значения ( $\approx \tilde{J}_m U_0 \sqrt{C_0/L_0}$ ) определяются параметрами первого звена формирующей линии.

Увеличение числа звеньев  $n$  формирующей линии при прочих равных условиях ведет к увеличению длительности первого полупериода тока  $\tau_{1/2}$ . Так, для трехзвенной линии  $\tau_{1/2} \approx 7$ , а для двухзвенной –  $\tau_{1/2} \approx 5$ . Увеличение декремента затухания  $\varepsilon$  несколько увеличивает длительность первого полупериода тока.

Здесь также отметим, что параметры  $A$  и  $\theta$  на ток разряда не оказывают заметного влияния. Так, увеличение  $\theta$  от 0,01 до 1 приводит к незначительному (до 10...20%) снижению тока разряда.

В зависимости от значений параметров  $A$ ,  $\varepsilon$  и  $\theta$  возможна реализация двух различных режимов ускорения формируемого плазменного образования.

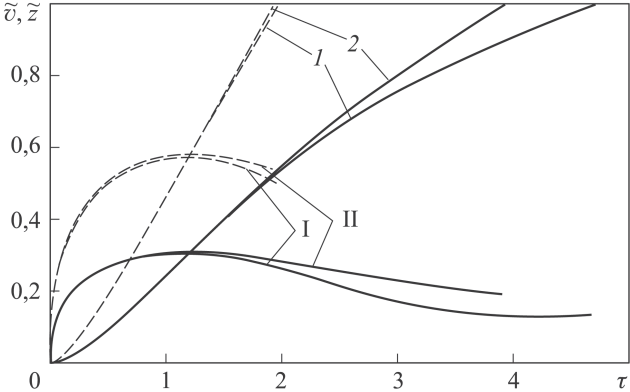
Первый режим — режим немонотонного ускорения характеризуется тем, что максимум скорости плазменного образования достигается внутри канала в точке с координатой  $\tilde{z}_m \leq 1$ . При дальнейшем движении плазменный поршень тормозится из-за возрастания массы движущейся плазмы при уменьшении (или постоянстве) ускоряющей электромагнитной силы.

Второй режим характеризуется непрерывным возрастанием скорости в течение всего времени пребывания плазменного поршня в канале ускорителя. В этом случае максимум скорости достигается (при формальном продолжении зоны ускорения) в точках  $\tilde{z}_m > 1$ , т.е. вне ускорителя.

Как следует из приведенных расчетов, реализация того или иного режима ускорения определяется в основном силовыми параметрами  $A$  и декремента затухания  $\varepsilon$ , но слабо зависит от числа звеньев  $n$  формирующей линии. Было установлено, что при значениях параметра  $A = A_{кр} \approx 5 + 17\varepsilon$  реализуется пограничный режим, когда максимум скорости достигается при вылете плазменного поршня из канала ( $\tilde{z}_m = 1$ ). При  $A \leq A_{кр}$  реализуется режим немонотонного ускорения, при  $A \geq A_{кр}$  — режим непрерывного ускорения. Параметры большинства технологических ИППУ таковы, что они практически все работают в режиме немонотонного ускорения, т.е. при  $A \leq A_{кр}$ .

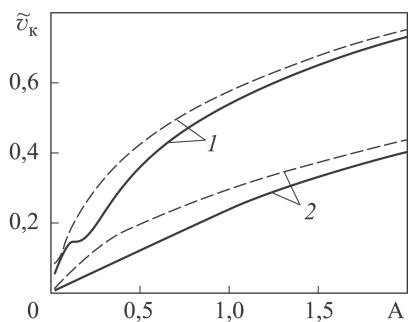
На рис. 3 приведены зависимости безразмерных скоростей  $\tilde{v}$  и координат  $\tilde{z}$  плазменного образования от безразмерного времени  $\tau$  при различном числе  $n$  звеньев емкостной формирующей линии и заданных значениях основных безразмерных параметров  $A$  и  $\varepsilon$  ( $\theta = 0,01$ ), соответствующих режиму немонотонного ускорения.

Как видно, во всех случаях динамика ускорения такова, что плазменное образование ускоряется только на фазе роста тока разряда, достигая максимальных значений скорости  $\tilde{v}_m$  в моменты времени



**Рис. 3. Зависимость безразмерных координаты и скорости от безразмерного времени ( $\varepsilon = 0,1, \theta = 0,01$ ):**  
 — —  $A = 0,15$ ; ---- —  $A = 1$ ; I —  $\tilde{v}_k, n = 1$ ; 2 —  $\tilde{v}_k, n = 2$ ; I —  $\tilde{z}, n = 1$ ; II —  $\tilde{z}, n = 2$





**Рис. 4. Зависимость безразмерной скорости вылета от силового параметра  $A$  ( $\theta = 0,01$ ):**  
 — —  $n = 1$ ; --- —  $n = 2$ ; 1 —  $\varepsilon = 0,01$ ; 2 —  $\varepsilon = 1$

рис. 3). Скорости  $\tilde{v}_k$  и  $\tilde{v}_m$  могут различаться в разы. При этом становится существенной роль источника электропитания ИПУ. Так, например, при использовании однозвенного емкостного накопителя ( $n = 1$ ) при  $A = 0,15$  —  $\tilde{v}_k = 0,12$ , а  $\tilde{v}_m = 0,27$ . Применение  $n$ -звенной формирующей линии при малых  $A$  ( $A \leq 0,3 \dots 0,4$ ) позволяет уменьшить темп снижения скорости плазмы, так что на выходе из электродного канала скорость плазмы  $\tilde{v}_k$  (при  $A = 0,15$ ) может составлять: 0,12 — для  $n = 1$ , и 0,2 — для  $n \geq 2$ .

Следует обратить внимания на то, что при любых  $A$  и  $\varepsilon$  применение многозвенных ( $n = 3$  и более) формирующих линий уже не приводит к увеличению скорости плазмы на выходе из электродного канала ИПУ.

Зависимости скорости  $\tilde{v}_k$  от  $A$  представлены на рис. 4 для одно- и двухзвенных емкостных накопителей ( $\varepsilon = \text{var}$ ).

При  $A \geq 1$  скорость плазменного образования  $\tilde{v}_k$  при одинаковых значениях параметра  $A$  относительно слабо зависит от числа звеньев формирующей линии источника электропитания разряда. Видно, что рост  $\tilde{v}_k$  происходит с увеличением  $A$  и с уменьшением декремента затухания  $\varepsilon$ . Зависимость  $\tilde{v}_k$  от  $A$  с точностью  $\pm 5\%$  может быть аппроксимирована степенной функцией  $A^{0,4}$ .

Выбор типа источника электропитания разряда ИПУ можно проводить с использованием показателя энергетической эффективности  $\varphi_n$  импульсного ускорителя, связанного с кинетическим КПД преобразования запасенной в емкостном накопителе энергии  $W_\Sigma = nC_0U_0^2/2$  в кинетическую энергию ускоренного плазменного образования  $E_k = \beta m_0 \tilde{v}_k^2 /:$

$$\eta_k = \frac{E_k}{W_\Sigma} = \theta \frac{\tilde{v}_k^2}{nA} = \theta \varphi_n(A, \varepsilon). \quad (7)$$

Как показали расчеты, при малых значениях  $\theta \leq 0,1$  (наиболее часто реализуемый на практике диапазон значений  $\theta$ ) можно считать,

$\tau = 1 \dots 1,5$ . Во все последующие моменты времени скорость плазмы снижается, так что на выходе из электродного канала скорость плазмы  $\tilde{v}_k$  всегда меньше  $\tilde{v}_m$ . Значения скоростей плазмы  $\tilde{v}_k$  зависят от параметра  $A$ , декремента затухания  $\varepsilon$  и числа звеньев  $n$  формирующей линии.

При  $A \geq 1$  скорость  $\tilde{v}_k$  лишь незначительно уступает  $\tilde{v}_m$  (см. рис. 3), причем максимум скорости имеет место в выходной области электродного канала. Ситуация меняется при малых значениях параметра  $A \leq 0,3 \dots 0,4$  (см.

что  $\varphi_n$  не зависит от  $\theta$ . Зависимости  $\varphi_n$  от  $A$  (рис. 5) при фиксированных  $n$  и  $\varepsilon$  носят немонотонный характер.

При  $A = A_{opt}^n$  параметр  $\varphi_n$  достигает максимального значения  $\varphi_{n,max}$  (при этом  $\eta_k = \eta_{k,max}$ ). Значения  $A_{opt}^n$  зависят от числа звеньев  $n$  формирующей линии и для  $\varepsilon = 0,01 \dots 0,1$  равны  $A_{opt}^1 \approx 1$  (при  $n = 1$ ),  $A_{opt}^n \approx 0,4$  (при  $n \geq 2$ ).

Выбирая параметры ИПУ из условия

$$\frac{bC_0^2 U_0^2}{\beta m_0 l} = A_{opt}^n,$$

можно осуществить ускорение плазмы с максимальной энергетической эффективностью. Но следует понимать, что при этом безразмерное значение скорости плазмы на выходе из канала ИПУ ограничено (см. рис. 4) значениями  $\tilde{v}_k \approx 0,56$  ( $n = 1$ ) и  $\tilde{v}_k \approx 0,18$  ( $n \geq 2$ ).

Рост  $\tilde{v}_k$  может быть обеспечен путем увеличения силового параметра  $A$ . Как следует из (7), размерное значение скорости плазменного образования  $v_k$  на выходе из канала ИПУ может быть определено по формуле

$$v_k = \left( 2\theta \frac{W_\Sigma}{\beta m_0} \varphi_n \right)^{0,5} = \left( \theta \frac{C_0 U_0^2}{\beta m_0} n \varphi_n \right)^{0,5}. \quad (8)$$

Согласно проведенным расчетам при  $A > 1$  величина  $n\varphi_n$ , а следовательно, и скорость  $v_k$  практически не зависят от  $n$ . Поскольку при  $A \geq 1$  параметр энергетической эффективности  $\varphi_1$  превышает  $\varphi_n$ , то факт независимости  $v_k$  от  $n$  свидетельствует о том, что в качестве источника энергии импульсного разряда следует использовать только накопители энергии с одиночной емкостью  $C_0$ . В этом случае ( $n = 1$ ,  $A > 1$ ), учитывая, что  $\varphi_1 = \frac{\tilde{v}_k^2}{A} \sim \frac{(A^{0,4})^2}{A} \sim A^{-0,2}$ , из (8) можно установить связь (с точностью  $\pm 5\%$ , соответствующей точности аппроксимации  $\tilde{v}_k(A) \sim A^{0,4}$ )  $v_k$  и основных параметров ИПУ:

$$v_k \sim C_0^{0,3} U_0^{0,8} l^{0,6} m_0^{-0,4}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что увеличение емкости  $C_0$  накопителя может обеспечить рост скорости не более чем в корень кубический раз. Наиболее сильным является влияние начального напряжения  $v_k \sim U_0^{0,8}$ . Увеличение длины электродного канала  $l$  в итоге (с учетом того, что  $m_0 \sim l$ ) влияет на скорость достаточно слабо  $v_k \sim l^{0,6} m_0^{-0,4} \sim l^{0,2}$ .

Если значение параметра  $A \leq A_{opt}^n \approx 0,4$ , то, как это видно из результатов, представленных на рис. 5, показатель энергетической эффективности  $\varphi_2$  превышает  $\varphi_1$ . В соответствии с (8) в этом случае

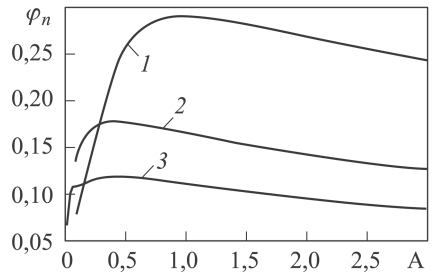


Рис. 5. Зависимость показателя энергетической эффективности  $\varphi_n$  от  $A$  ( $\theta = 0,01$ ):  
1 –  $n = 1$ ; 2 –  $n = 2$ ; 3 –  $n = 3$

при одинаковых значениях запасенной в накопителе энергии  $W_{\Sigma}$  и параметра  $A$  скорость плазменного образования в ИПУ с двухзвенной емкостной формирующей линией будет превышать скорость плазмы в ИПУ с одиночной емкостью. Здесь отметим, что двухзвенная формирующая линия в диапазоне изменения  $0,04 \leq A \leq 0,4$  представляется наиболее выгодной по сравнению с 3-звенными и более формирующими линиями (см. рис. 5).

Рассмотрение случаев со значениями параметра  $A \leq 0,04$  не представляет интереса по причинам малости скоростей генерируемых плазменных образований и нарушения работоспособности предложенной модели расчета.

В заключение проведем расчет оптимальных параметров ИППУ, описанных в работах [4, 5].

В установке [5] в качестве накопителя энергии ИПУ реализована 5-звенная емкостная формирующая линия. Полная емкость накопителя энергии выбрана равной  $C_{\Sigma} \approx 600$  мкФ, а емкость конденсатора первого звена равна  $C_0 = C_{\Sigma}/5 = 120$  мкФ. При напряжении зарядки  $U_0 = 4$  кВ запасаемая полная энергия накопителя  $W_{\Sigma} \approx 5$  кДж. Электродный канал представлял собой систему коаксиальных электродов с радиусом внутреннего электрода (катода)  $r_1 = 12,5$  мм, радиусом анода  $r_2 = 17,5$  мм и длиной канала  $l = 200$  мм. Полное активное сопротивление  $R_{\Sigma}$  и индуктивность  $L_0$  оцениваются как  $R_{\Sigma} \approx 5 \cdot 10^{-3}$  Ом и  $L_0 = 2$  мкГн. Значение ускоряемой массы  $m_0$  составляло  $2 \cdot 10^{-5}$  кг (при  $\beta \approx 0,5$ ).

Основные безразмерные электротехнические параметры равны:  $\varepsilon \approx 0,1$ ,  $\theta \approx 0,07$ . Значение силового параметра  $A \approx 0,04$ . При указанных параметрах безразмерная скорость плазменного образования на выходе из электродного канала может достигать значений не более 0,03, а следовательно, размерное значение скорости может составлять  $\sim 0,6$  км/с.

Из результатов настоящей работы следует, что в качестве накопителя энергии ИПУ следует выбрать (поскольку  $A \leq 0,4$ ) либо накопитель с одиночной емкостью, либо двухзвенную емкостную формирующую линию. Оценим параметры ИПУ для этих двух вариантов реализации.

Для накопителя с одиночной емкостью ( $n = 1$ )  $C_0 = C_{\Sigma} = 600$  мкФ силовой параметр можно увеличить до  $A_1 \approx 0,2$ , а соответствующее значение показателя энергетической эффективности до  $\varphi_1 \approx 0,2$ .

Для  $n = 2$  емкость конденсатора первого звена (для заданных  $W_{\Sigma}$  и  $U_0$ ) равна  $C_0 = C_{\Sigma}/2 = 300$  мкФ, а силовой параметр  $A_2 \approx 0,1$ . Показатель энергетической эффективности в этом случае  $\varphi_2 \approx 0,2$  приблизительно равен  $\varphi_1 \approx 0,2$ . Следовательно, скорость плазменного образования для обоих вариантов будет приблизительно одинакова и составит, как следует из (8),  $\sim 3$  км/с.

В установке [4] в качестве накопителя энергии ИПУ использован накопитель энергии с одиночной емкостью. Были исследованы два режима с двумя различными емкостями  $C_{\Sigma,1} \approx 750$  мкФ и  $C_{\Sigma,2} \approx 3000$  мкФ. При этом напряжении зарядки в обоих случаях  $U_0 = 3,5$  кВ запасаемая энергия накопителей соответственно была равна  $W_{\Sigma,1} \approx 4,6$  кДж и  $W_{\Sigma,2} \approx 16,3$  кДж. Электродный канал представлял собой систему коаксиальных электродов со средним радиусом внутреннего электрода (катода)  $r_1 = 12,5$  мм, радиусом анода  $r_2 = 20$  мм и длиной канала  $l = 80$  мм. Индуктивность  $L_0$  оценивается в 800 нГн, а декременты затухания соответственно  $\varepsilon_1 \approx 1$ ,  $\varepsilon_2 \approx 2$ . Ускоряемая масса  $m_0$  составила  $12 \cdot 10^{-5}$  кг (при  $\beta \approx 0,5$ ).

Силовой параметр составил  $A_1 \approx 0,15$ ,  $A_2 \approx 1,4$ . Следовательно, во втором режиме работы ИППУ (при указанном значении параметра  $A_2$ ) примененный в работе [4] накопитель с одиночной емкостью является оптимальным. Расчетное значение скорости плазменного образования, определенное по формуле (8), составило  $v_k \approx 6$  км/с. Данное значение удовлетворительно совпадает с экспериментально измеренной (5 км/с).

В первом режиме ( $A_1 \approx 0,15$ ) расчетная скорость составит  $v_k \approx 2,5$  км/с (экспериментальное значение составляло 3,3 км/с). При данном значении силового параметра  $A$  оптимальным вариантом схемного решения накопителя является двухзвенная формирующая линия. Применение такой двухзвенной линии при сохранении значения параметра  $A$  позволит при прочих равных условиях поднять значение скорости плазменного образования на выходе из ИПУ до  $\sim 5$  км/с.

**Заключение.** 1. Сформулирована физико-математическая модель процессов ускорения плазменного образования в ИППУ атмосферного давления с накопителями энергии в виде  $n$ -звенной емкостной формирующей линии.

2. На основе выполненных численных расчетов установлены особенности динамики ускорения формирующегося плазменного образования. Определены зависимости скорости генерируемого плазменного образования от основных электротехнических и энергетических параметров емкостного накопителя энергии ИППУ.

3. Сформулированы основные рекомендации по выбору схемного исполнения емкостного накопителя ИПУ. Показано, что для двухступенчатых ИППУ атмосферного давления оптимальной при безразмерном силовом параметре  $A \geq 1$  является однозвенная схема емкостного накопителя, а при  $A < 0,3-0,4$  — двухзвенная LC формирующая линия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гаркуша И.Е., Дереповский Н.Т., Казаков О.Е. Модификация конструкционных и инструментальных материалов при облучении плазменными потоками // Вопросы атомной науки и техники. 1997. С. 172–175.

2. *Usuba S., Heimann R.B.* // *J. Thermal Spray Technol.* 2006. Vol. 15 (3). P. 356–364.
3. *Овчинников П.А., Опекан А.Г., Протасов Ю.С., Камруков А.С.* Радиационная плазмодинамика. Т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 564–566.
4. *Камруков А.С., Денисов Е., Козлов Н.П., Лушников Е.А.* Анतिकоррозионная обработка низкоуглеродистой стали импульсными плазменными потоками // *Наука и образование: электронное научно-техническое издание.* 2013. № 12. <http://technomag.bmstu.ru/doc/670510.html> (дата обращения 20.11.2014).
5. *Grishin Y., Chivel Y., Bochkov V., Bochkov D., Suslov V., Vermel V.* // *Proceedings of Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), San Diego, CA, USA.* 2012. P. 215–217.
6. *Гришин Ю.М., Рыдкин М.В.* О расчете параметров плазмы в технологической импульсно-периодической плазменной установке атмосферного давления // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение.* 2014. № 3. С. 38–51.
7. *Александров В.В., Белан Н.В., Козлов Н.П., Маштылев Н.А., Попов Г.А., Протасов Ю.С., Хвесюк В.И.* Импульсные плазменные ускорители. Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1983. 247 с.
8. *Лебедев А.Д., Урюков Б.А.* Импульсные ускорители плазмы высокого давления / АН СССР СО. Ин-т теплофизики. Новосибирск. 1990.
9. *Колесников П.М.* Электродинамическое ускорение плазмы. М.: Атомиздат, 1971. 388 с.

## REFERENCES

- [1] Garkusha I.E., Derepovskiy N.T., Kazakov O.E. Modification of Structural and Tool Materials under Plasma Flow Irradiation. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki* [Problems of Atomic Science and Technology], 1997, pp. 172–175 (in Russ.).
- [2] *Usuba S., Heimann R.B. J. Thermal Spray Technol.*, 2006, vol. 15 (3), pp. 356–364.
- [3] *Ovchinnikov P.A., Opekan A.G., Protasov Yu.S., Kamrukov A.S.* Radiatsionnaya plazmodinamika. T. 1 [Radiation Plasmodynamics, vol. 1]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991, pp. 564–566.
- [4] *Kamrukov A.S., Denisov E., Kozlov N.P., Lushnikov E.A.* Corrosion Prevention Treatment of Low Carbon Steel with Pulsed Plasma Flows. *Jelekt. Nauchno-Tehn. Izd. "Nauka i obrazovanie"* [El. Sc.-Tech. Publ. "Science and Education"], 2013, no. 12. <http://technomag.bmstu.ru/doc/670510.html> (accessed 20.11.2014).
- [5] *Grishin Y., Chivel Y., Bochkov V., Bochkov D., Suslov V., Vermel V.* *Proc. of Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC)*, San Diego, CA, USA, 2012, pp. 215–217.
- [6] *Grishin Yu.M., Rydkin M.V.* About Calculation of Plasma Parameters in the Technological Atmospheric-Pressure Pulse-Periodic Plasma System. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2014, no. 3, pp. 38–51 (in Russ.).
- [7] *Aleksandrov V.V., Belan N.V., Kozlov N.P., Mashtylev N.A., Popov G.A., Protasov Yu.S., Khvesyuk V.I.* Pulsed Plasma Accelerators. Khar'kov, Kharkiv Aviation Institute, 1983. 247 p.
- [8] *Lebedev A.D., Uryukov B.A.* Pulsed High Pressure Plasma Accelerators. *AN SSSR SO. Institut teplofiziki* [Institute of Thermophysics]. Novosibirsk, 1990.
- [9] *Kolesnikov P.M.* Elektrodinamicheskoe uskorenie plazmy [Electromagnetic plasma acceleration]. Moscow, Atomizdat Publ., 1971. 388 p.

Статья поступила в редакцию 26.01.2015

Гришин Юрий Михайлович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 120 научных работ в области физики и техники низкотемпературной плазмы, высокотемпературной теплофизики.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Grishin Yu.M. — D.Sc. (Eng.), Professor of Engineering, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, specializes in the fields of low-temperature plasma physics and technology, high-temperature thermal physics.  
Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumannskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Рыдкин Максим Владимирович — аспирант кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор двух научных работ в области высокотемпературной теплофизики.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Rydkin M.V. — Ph.D. student, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, author of 2 research publications in the field of high-temperature thermal physics.  
Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumannskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Яриков Сергей Александрович — студент кафедры “Плазменные энергетические установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Yarikov S.A. — student, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University.  
Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumannskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

**Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Гришин Ю.М., Рыдкин М.В., Яриков С.А. О выборе параметров технологической импульсной плазменной установки // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 4. С. 86–99.

**Please cite this article in English as:**

Grishin Yu.M., Rydkin M.V., Yarikov S.A. On the choice of parameters of pulsed plasma process facility. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 4, pp. 86–99.