

УДК 537.523

## ОБОСТРЕНИЕ ЗАДНЕГО ФРОНТА КВАЗИИСКРОВОГО РАЗРЯДА В ИМПУЛЬСНОМ ПЛАЗМОТРОНЕ

**А. Н. Власов**, д.т.н., профессор кафедры ОиЭФ РГПТУ, Рязань, Россия;  
orcid.org/0000-0002-6298-0433, e-mail: oief@rsreu.ru

*Рассмотрена возможность обострения заднего фронта квазиискрового разряда, создающего импульс магнитного поля в импульсном плазмотроне с индукционным разрядом, возбуждаемым в тороидальном плазменном вихре в полукрытой цилиндрической камере, на боковой стенке которой размещены электрически взрывающиеся проволочки, а вблизи противоположных торцов – катод и анод, подключённые к ёмкостному накопителю. Обострение заднего фронта достигается посредством включения в цепь анода электровзрывного прерывателя тока. Цель работы заключается в оценке длительности заднего фронта квазиискрового разряда при использовании электровзрывного прерывателя тока и расчёте поперечного сечения используемого в нём проводника, а также в экспериментальной проверке результатов расчётов.*

**Ключевые слова:** импульсный плазмотрон, тороидальный плазменный вихрь, квазиискровой разряд, электровзрывной прерыватель тока, импульсное магнитное поле, индукционный разряд.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2023-84-225-233

### Введение

Известно [1], что импульсные плазмотроны с полукрытой разрядной камерой, в которой электроды подключены к ёмкостному накопителю, при импульсном истечении плазменной струи в воздух создают плазменные тороидальные вихри с высокой светимостью [2]. Это представляет интерес для создания импульсных источников мощного оптического излучения, плазмохимии, а также для получения автономных плазменных образований (АПО), удалённых как от стенок разрядной камеры, так и от источников энергии. Время жизни таких АПО, получаемых в известных импульсных плазмотронах, лежит в пределах нескольких миллисекунд, что недостаточно для решения некоторых задач, в частности, для моделирования природных грозных явлений.

В качестве одного из возможных способов повышения времени жизни АПО рассматривалось возбуждение индукционного разряда при действии импульсного магнитного поля внутри тороидального плазменного вихря [3], так как, в этом случае, если плазменный вихрь захватит часть действовавшего магнитного поля, то может сформироваться плазмод – АПО, включающее ограниченную конфигурацию магнитных полей и плазмы [4]. При этом если захваченное магнитное поле поддерживается тороидальным токовым слоем в вихре, то время жизни АПО, согласно расчётам [5], может существенно возрасти (плоть до нескольких секунд).

В импульсном плазмотроне, в котором тороидальный плазменный вихрь создавался с помощью электрического взрыва тонких медных проволочек, установленных на боковой стенке полукрытой цилиндрической камеры, а импульсное тороидальное магнитное поле создавалось с помощью электрически взрывающихся толстых медных проводников, экспериментально удалось получить АПО с временем жизни порядка 50 мс [3]. Проведённые доработки, касающиеся использования колебательного режима генерации импульсного тороидального магнитного поля с использованием квазиискрового разряда [6] и введения импульсного полоидального магнитного поля для дополнительного прогрева плазмы [7], позволили несколько увеличить время жизни АПО (до 75 мс), но это существенно меньше ожидавшихся результатов (более 3 с). Предположительно это связано не только с недостаточностью первоначального прогрева плотной плазмы, но и с недостаточной величиной вихревого элек-

трического поля внутри плазменного тороидального вихря из-за относительно большой длительности заднего фронта импульса магнитного поля. По оценкам [7] при типичной длительности заднего фронта импульса тороидального магнитного поля (70 мкс) напряженность вихревого электрического поля в тороидальном плазменном вихре составляет величину порядка 1 В/см, что явно недостаточно для возникновения интенсивного индукционного разряда; нужна напряженность электрического поля не менее 12 В/см, т.е. как в высокочастотном индукционном разряде [8]. Поэтому обострение заднего фронта квазиискрового разряда, создающего магнитное поле в импульсном плазмотроне, является актуальной задачей.

### Оценка напряжённости вихревого электрического поля при действии заднего фронта импульса магнитного поля

Ранее было показано [3], что при изменении во времени  $t$  индукции магнитного поля  $B$  внутри тороидального плазменного вихря возможно возбуждение индукционного разряда в виде токового кольца тороидальной формы, в которой  $D$  – большой диаметр, а  $r$  – малый радиус. Однако, чтобы сформировался тороидальный токовый слой [5], плазма должна быть хорошо прогрета и при этом должна быть достаточно высокая напряжённость вихревого электрического поля  $E$  [7].

Чтобы определить  $E$ , запишем уравнение Максвелла

$$\oint_{2\pi r} \vec{E} d\vec{l} = - \int_{\pi r^2} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{s} \quad (1)$$

и соотношение, применимое для заднего фронта импульса магнитного поля с длительностью  $\tau_b$  и амплитудой индукции  $B_{\max}$ , обеспечиваемой разрядным током квазиискрового разряда с амплитудой  $I_{\max}$ :

$$-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \frac{\vec{B}_{\max}}{\tau_b} = \frac{\mu_0}{\pi D} \frac{I_{\max}}{\tau_b}; \quad (2)$$

в этом случае с учётом (1) и (2) напряжённость поля  $E$  может быть оценена по формуле

$$E = \frac{\mu_0 r}{2\pi D} \frac{I_{\max}}{\tau_b}. \quad (3)$$

Для формирования тороидального токового слоя актуальным является именно задний фронт, и при параметрах, приведенных в [7]:  $r = 0,5$  см,  $D = 6$  см,  $I_{\max} = 530$  кА,  $\tau_b = 70$  мкс, напряжённость вихревого электрического поля согласно (3) составит  $E = 126$  В/м, или 1,26 В/см. Этого явно недостаточно для полноценного индукционного разряда, необходима величина как минимум на порядок больше.

### Об использовании электровзрывного прерывателя тока

Физическая идея, позволяющая достигнуть желаемого результата по сокращению длительности заднего фронта квазиискрового разряда, состоит в том, что в цепи этого разряда можно установить электрически взрываеваемый проводник [9], прерывающий разрядный ток в момент достижения максимума величины тока. На рисунке 1 представлена эквивалентная электрическая схема контура квазиискрового разряда с использованием электровзрывного прерывателя тока.

В этом случае, как показано на схеме (рисунок 1), после возникновения квазиискрового разряда (замыкание ключа  $K_1$ ) ток конденсаторной батареи  $C$  через некоторое время приводит к электрическому взрыву проводника в электровзрывном прерывателе тока и образованию электропроводящего плазменного облака, шунтирующего контур квазиискрового разряда: на схеме (рисунок 1) это отображается тем, что переключатель  $K_2$  размыкает цепь квазиискрового разряда и замыкает конденсаторную батарею на общий электрод. В этом случае устраняется влияние со стороны конденсаторной батареи  $C$ , индуктивности  $L_2$  и сопротивления  $R_2$  на формирование заднего фронта квазиискрового разряда. В результате задний фронт

импульса тока квазиискрового разряда полностью определяется элементами  $L_1$ ,  $R_1$  и  $R_3$ . В этом случае можно полагать  $\tau_b = \tau$ , где  $\tau$  – постоянная времени затухания тока в  $LR$  цепи:

$$\tau = \frac{L_1}{R_1 + R_3}. \quad (4)$$

Суммарное сопротивление  $R_1$  и  $R_3$  представим в виде:

$$R_1 + R_3 = \frac{U_\Sigma}{I_{\max}}, \quad (5)$$

где  $U_\Sigma$  – суммарное напряжение на разрядных промежутках квазиискрового разряда и электровзрывного прерывателя тока.

Подставляя (5) в (4), получаем формулу для оценки длительности заднего фронта квазиискрового разряда при использовании электровзрывного прерывателя тока:

$$\tau = \frac{L_1 I_{\max}}{U_\Sigma}. \quad (6)$$

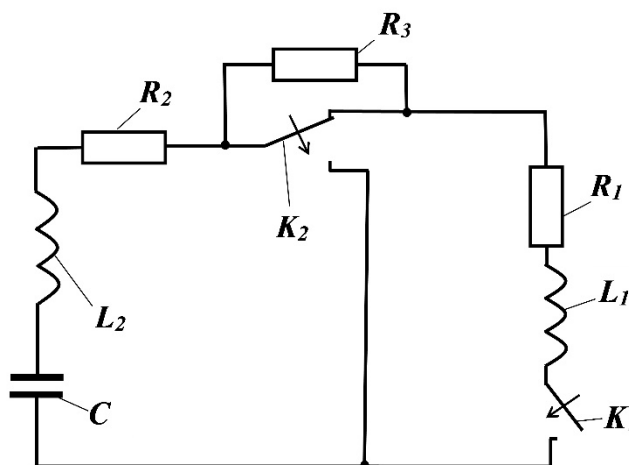


Рисунок 1 – Эквивалентная электрическая схема контура квазиискрового разряда при использовании электровзрывного прерывателя тока:  $C$  – высоковольтная конденсаторная батарея;  $K_1$  – ключ, отображающий возникновение квазиискрового разряда;

$K_2$  – переключатель, отображающий срабатывание электровзрывного прерывателя тока;  $L_1$  – индуктивность квазиискрового разряда и проводников в полукрытой цилиндрической камере;  $L_2$  – индуктивность проводников конденсаторной батареи;

$R_1$  – сопротивление квазиискрового разряда;  $R_2$  – сопротивление подводящих проводников;  $R_3$  – сопротивление электровзрывного прерывателя тока

Figure 1 – Equivalent electrical circuit of quasi-spark discharge circuit when using electric explosive current interrupter:  $C$  – high-voltage capacitor bank;  $K_1$  – the key displaying the occurrence of quasi-spark discharge;  $K_2$  – the switch displaying the operation of electric explosive current interrupter;  $L_1$  – inductance of quasi-spark discharge and conductors in a semi-open cylindrical chamber;  $L_2$  – capacitor bank conductors inductance;  $R_1$  – quasi-spark discharge resistance;  $R_2$  – supply conductors resistance;  $R_3$  – electro-explosive current interrupter resistance

Проведём численную оценку величины  $\tau$ .

Индуктивность  $L_1$  проводников полукрытой цилиндрической камеры может быть найдена как индуктивность одновитковой тороидальной катушки с прямоугольным поперечным сечением  $a \cdot b = 2 \cdot 8 = 16 \text{ см}^2 = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  и длиной магнитной линии  $l_m = \pi D = 3,14 \cdot 6 = 19 \text{ см} = 1,9 \cdot 10^{-1} \text{ м}$ . В этом случае  $L_1 = \mu_0 ab / l_m = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}$ . В соответствии с ранее полученными результатами [7] и [3] примем  $I_{\max} = 530 \text{ кА} = 5,3 \cdot 10^5 \text{ А}$ ,  $U_\Sigma = 1000 \text{ В}$ ; тогда в соответствии с (6) имеем  $\tau = 5,8 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 5,8 \text{ мкс}$ .

Проведём численную оценку величины вихревого электрического поля с учётом  $\tau_b = \tau$ .

В этом случае при  $\tau_b = 5,8$  мкс и параметрах, приведенных ранее  $r=0,5$  см,  $D=6$  см,  $I_{\max}=530$  кА, напряжённость вихревого электрического поля согласно (3) составит  $E = 1523$  В/м, или 15 В/см. Этого должно быть вполне достаточно для формирования импульсного индукционного разряда в импульсном плазмотроне, поскольку, как известно [8], типичная напряжённость вихревого электрического поля  $E$  для индукционных разрядов составляет около 12 В/см.

### Расчёт поперечного сечения проводника в электровзрывном прерывателе тока

Проводник в электровзрывном прерывателе тока находится под действием переднего фронта токового импульса квазиискрового разряда с длительностью  $\tau_f$ . Как правило, функция нарастания тока  $I$  за время  $0 \leq t \leq \tau_f$  близка к линейной зависимости и может быть выражена формулой:

$$I = \frac{I_{\max}}{\tau_f} \cdot t. \quad (7)$$

За время  $dt$  в этом случае с учётом (7) в проводнике с длиной  $l$ , поперечным сечением  $s$  и удельным сопротивлением  $\rho$  выделится энергия  $dW$ :

$$dW = \frac{\rho l}{s} \left( \frac{I_{\max} t}{\tau_f} \right)^2 dt. \quad (8)$$

Этот проводник объёмом  $sl$ , обладая удельной теплоёмкостью  $q$  и плотностью материала  $\delta$ , нагревается, его температура увеличивается на величину  $dT$  за счёт поглощения энергии в виде тепла  $dQ$ :

$$dQ = q\delta s l dT. \quad (9)$$

Поскольку нагрев происходит очень быстро (за время порядка 30 мкс), посторонними потерями энергии можно пренебречь, полагая

$$dW = dQ. \quad (10)$$

При этом следует учесть, что удельное сопротивление  $\rho$  зависит от температуры, для медного проводника  $\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta T)$ , где  $\rho_0$  – удельное сопротивление при нормальной температуре,  $\Delta T$  – изменение температуры,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления. Выражение в скобке можно переписать в виде  $(1 + \alpha \Delta T) = (\alpha T_0 + \alpha \Delta T) = \alpha(T_0 + \Delta T)$ , тогда  $T_0 = 1/\alpha$ . Поэтому для абсолютных температур  $0 < T \leq T_{\max}$  для дальнейшего анализа можно записать

$$\rho = \rho_0 \alpha T. \quad (11)$$

Следует заметить, что соотношение (11) справедливо для медных проводников, при этом в дальнейшем при интегрировании следует использовать диапазон абсолютных температур от  $T_0$  до  $T_{\max}$ , причём  $T_0 = 1/\alpha$ .

Подстановка в (10) соотношений (9) и (8) с учётом (11) приводит к дифференциальному уравнению

$$\frac{\rho_0 \alpha T I_{\max}^2 t^2}{s \tau_f^2} dt = q \delta s dT. \quad (12)$$

После разделения переменных уравнение (12) интегрируется:

$$\int_{T_0}^{T_{\max}} \frac{dT}{T} = \frac{\rho_0 \alpha I_{\max}^2}{s^2 \tau_f^2 q \delta} \int_0^{\tau_f} t^2 dt. \quad (13)$$

В результате из (13) с учётом  $T_0 = 1/\alpha$  получаем соотношение для поперечного сечения  $s$ :

$$s = I_{\max} \sqrt{\frac{\rho_0 \alpha \tau_f}{3q \delta \ln(\alpha T_{\max})}}. \quad (14)$$

Проведём численную оценку величины  $s$ .

Расчёт проведём для медной проволоки, имеющей параметры:  $\rho_0 = 1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;  $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>;  $q = 3,85 \cdot 10^2$  Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $q = 8,96 \cdot 10^3$  кг·м<sup>-3</sup>;  $T_{\max} = 1,38 \cdot 10^3$  К – температура плавления меди. Согласно [7] примем параметры:  $I_{\max} = 5,3 \cdot 10^5$  А;  $\tau_f = 3 \cdot 10^{-5}$  с. Подстановка указанных величин в формулу (14) даёт результат:  $s = 5,75 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup> = 5,75 мм<sup>2</sup>.

Полученный результат следует отнести к общему сечению всех проводников в 16 каналах импульсного плазмотрона. Для проводника, который следует использовать в одном канале, сечение составит  $s_1$ :

$$s_1 = \frac{s}{16}. \quad (15)$$

В нашем случае, согласно (15),  $s_1 = 5,75/16 = 0,36$  мм<sup>2</sup>.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для проверки корректности проведенных расчётов были проведены испытания на доработанном макете импульсного плазмотрона с квазиискровым разрядом, описанном ранее в работе [6]. Макет имел 1 канал (из 16-ти в штатной конструкции [3]), он был доработан в части, касающейся введения электровзрывного прерывателя тока в цепь анода разрядного контура квазиискрового разряда. Доработанный макет встраивался в электрофизическую установку ИНГИР-Мега-15 [10]. Используемая экспериментальная установка содержала следующие блоки (рисунок 2): 1 – полуоткрытая цилиндрическая камера импульсного плазмотрона; 2 – анод; 3 – катод; 4 – электрически взрывающиеся медные проволоочки для создания торoidalного плазменного вихря; 5 – электровзрывной прерыватель тока; 6 – входной электрод; 7 – электрически взрываемый проводник с поперечным сечением 0,35 мм<sup>2</sup>, согласно формуле (14); 8 – выходной электрод; 9 – обостряющий электрод; 10 – высоковольтная конденсаторная батарея; 11 – низковольтная конденсаторная батарея; 12 – тиристорный замыкатель; 13 – блок управления, 14 – измерительно-регистрирующая аппаратура. Блоки 10, 11, 12, 13 и 14 входят в состав электрофизической установки ИНГИР-Мега-15.

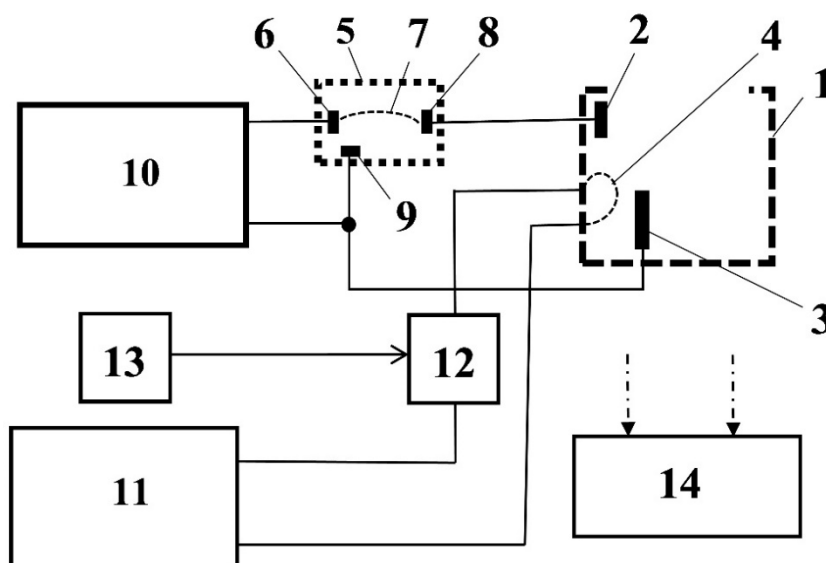


Рисунок 2 – Блок-схема экспериментальной установки  
Figure 2 – Block diagram of experimental installation

Испытания проводились при атмосферном давлении в двух режимах:

«1» – при коротком замыкании электродов 6 и 8 в плазменном прерывателе тока;

«2» – при соединении электродов 6 и 8 медным проводником 7 длиной около 2 см и поперечным сечением  $s_1 = 0,35 \text{ мм}^2$ , согласно (15).

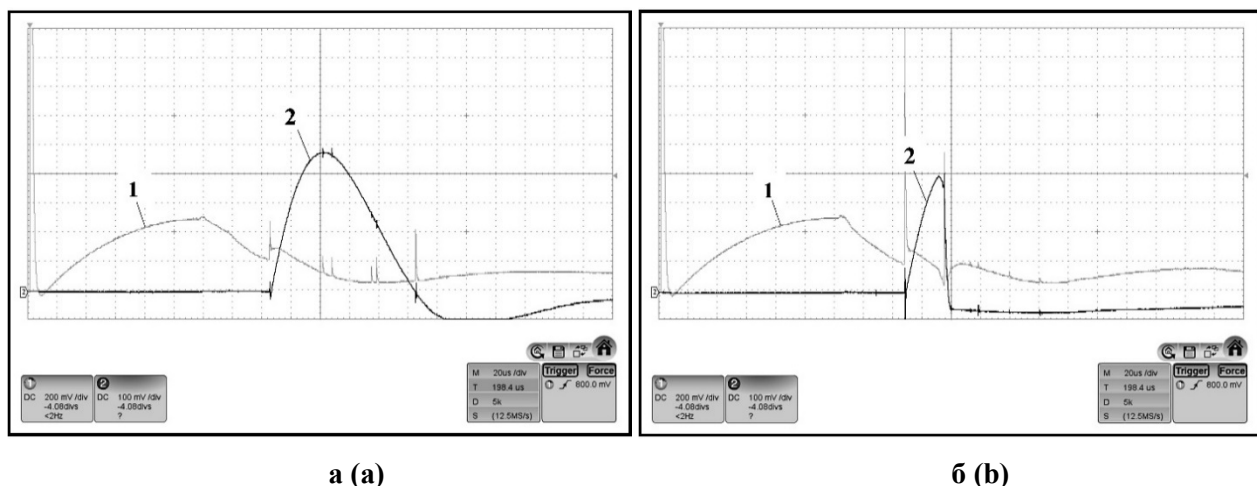
В режиме «1» экспериментальная установка работала следующим образом (рисунок 2).

После заряда конденсаторной батареи 10 (3 кВ, 600 мкФ) и конденсаторной батареи 11 (340 В, 150000 мкФ) замыкался ключ запуска 13, приводя к срабатыванию тиристорного замыкателя 12, в результате чего конденсаторная батарея 11 разряжалась на электрически взрывающиеся проводники 4, установленные на боковой стенке полуоткрытой камеры 1. Ток через проводники 4 вначале нарастает, а затем сразу после электрического взрыва падает (кривая 1, рисунок 3, а). Примерно через 40 мкс, судя по кривой 2 на рисунке 3, а, образуемый плазменный сгусток приводит к возникновению квазиискрового разряда в разрядном промежутке между катодом 3 и анодом 2 в полуоткрытой цилиндрической камере 1.

Таким образом, в режиме «1» контур квазиискрового разряда во время спада разрядного тока включал конденсаторную батарею 10 с соединительными проводами, короткозамкнутый прерыватель тока 5 и канал квазиискрового разряда в полуоткрытой цилиндрической камере 1. При этом задний фронт импульса тока анода был относительно пологим (кривая 2, рисунок 3, а).

В режиме «2» экспериментальная установка работала на переднем фронте импульса разрядного тока так же как и в режиме «1»: передний фронт при этом имел длительность примерно такую же, как и в режиме «1» (кривая 2 на рисунке 3, б). Такую же форму имел импульс разряда через проводники 4 (кривая 1 на рисунке 3, б). Отличие возникло вблизи момента достижения максимального значения импульса разрядного тока – в этом случае в электровзрывном прерывателе тока 5 (рисунок 2) происходил электрический взрыв проводника 7, ток через электроды 6 и 8 обрывался, а образовавшееся плазменное облако замыкало электроды 6 и 9, продолжая разряжать конденсаторную батарею 10.

Таким образом, в режиме «2» контур квазиискрового разряда во время спада разрядного тока включал лишь канал квазиискрового разряда в полуоткрытой цилиндрической камере 1 и электровзрывной прерыватель тока 5. При этом задний фронт импульса тока анода резко обострялся (кривая 2, рисунок 3, б).



а (a)

б (b)

**Рисунок 3 – Осциллограммы токов: а – в режиме «1», б – в режиме «2»: 1 – ток электрически взрывающихся проводников в полуоткрытой камере; 2 – ток в контуре квазиискрового разряда.**

Цена деления по горизонтали – 20 мкс/дел, по вертикали – 200 мВ/дел для контура электрически взрывающихся проводников и 100 мВ/дел для контура квазиискрового разряда  
**Figure 3 – Current waveforms: a is in mode «1», b is in mode «2»: 1 is current of electric exploding conductors in a semi-open chamber; 2 is current in a quasi-spark discharge circuit.**

Horizontal division price is 20  $\mu\text{s}/\text{div}$ , vertically is 200 mV/div for the circuit of electrically exploding conductors and 100 mV/div is for quasi-spark discharge circuit

С точки зрения эквивалентной схемы (рисунок 1) в режиме «1» ключ  $K_1$  замкнут, а переключатель  $K_2$  находится в верхнем положении. В этом случае разрядный контур во время действия как переднего, так и заднего фронта импульса состоит из следующих элементов:  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $R_1$  и  $R_2$ . Согласно полученной осциллограмме, импульс анодного тока имел передний фронт длительностью около 30 мкс, а задний фронт – около 70 мкс (кривая 2, рисунок 3, а), т. е. значения того же порядка, как ранее в работе [6].

В режиме «2» с точки зрения эквивалентной схемы (рисунок 1) во время действия переднего фронта ключ  $K_1$  замкнут, а переключатель  $K_2$  находится в верхнем положении и разрядный контур состоит из следующих элементов  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $R_1$  и  $R_2$ . В этом случае, согласно полученной осциллограмме (рисунок 3, б), импульс анодного тока имел передний фронт такой же, как и в режиме «1», его длительностью составляла около 30 мкс. Но во время действия заднего фронта переключатель  $K_2$  находится в нижнем положении и контур квазиискрового разряда перестраивается: ключ  $K_1$  остаётся замкнутым, а контур квазиискрового разряда состоит из элементов:  $L_1$ ,  $R_1$  и  $R_3$ . Длительность заднего фронта в этом случае составляла около 2 мкс (кривая 2, рисунок 3, а), т. е. существенно меньше значения, полученного в режиме «1» (70 мкс).

Таким образом, включение электровзрывного прерывателя тока в разрядный контур квазиискрового разряда позволяет более чем на порядок уменьшить длительность заднего фронта генерируемого магнитного поля в импульсном плазмотроне с индукционным разрядом.

Следует отметить, что теоретическая оценка для длительности заднего фронта импульса квазиискрового разряда в проведенном эксперименте с доработанным макетом требует уточнения. Дело в том, что для одного канала амплитуда тока составляет  $I_{\max} = 33$  кА, а индуктивность  $L_m$  должна рассчитываться как индуктивность провода радиуса  $r_m$ , свёрнутого в виде плоского витка радиусом  $R_m$ :

$$L_m = \mu_0 R_m \left( \ln \frac{8R_m}{r_m} - \frac{7}{4} \right). \quad (16)$$

Подставляя (16) в (6) получаем ожидаемую длительность заднего фронта импульса  $\tau_m$  для испытываемого макета:

$$\tau_m = \mu_0 R_m \left( \ln \frac{8R_m}{r_m} - \frac{7}{4} \right) \frac{I_{\max}}{U_{\Sigma}}. \quad (17)$$

В используемом макете  $R_m = 0,02$  м, а  $r_m = 0,003$  м,  $I_{\max} = 33000$  А,  $U_{\Sigma} = 1000$  В, и согласно (17) теоретически вычисленная продолжительность заднего фронта составляет  $\tau_m = 1,8$  мкс, что хорошо согласуется с результатом эксперимента (2 мкс, кривая 2 на рисунке 3, б).

### Заключение

В настоящей работе была поставлена и решена задача теоретического обоснования возможности обострения заднего фронта квазиискрового разряда в импульсном плазмотроне. Это достигнуто путём включения в контур квазиискрового разряда электровзрывного прерывателя тока. Даны оценки требуемого значения длительности заднего фронта импульса квазиискрового разряда и расчёты поперечного сечения проводника в электровзрывном прерывателе тока. Эксперимент, проведённый на макете 1/16 от мощности штатного импульсного плазмотрона, подтвердил корректность проведенных расчётов. Это позволяет провести модернизацию импульсного плазмотрона с индукционным разрядом с целью улучшения его параметров и, прежде всего, повышения времени жизни автономных плазменных образований.

Модернизированный импульсный плазмотрон предполагается использовать для получения и изучения долгоживущих автономных плазменных образований, в частности для изучения плазмохимических реакций при действии токовых слоёв в тороидальных плазменных вихрях. Также интерес представляет использование созданного импульсного плазмотрона

для испытания радиоаппаратуры и изделий электронной техники на воздействие электромагнитного излучения, подобного тому, что имеет место при природных грозовых явлениях.

*Использованная в данной работе электрофизическая установка ИНГИР-Мега-15 [10] была создана при поддержке Министерства науки и высшего Образования РФ, государственный контракт № 14.518.11.7002 от 19 июля 2012 г.*

#### Библиографический список

1. Александров А. Ф., Тимофеев И. Б., Черников В. А., Юсупалиев У. Плазменный тороидальный вихрь в воздухе // Теплофизика высоких температур. 1988. Том 26. № 4. С. 639-643.
2. Буланов С. С., Есиев Р. У., Камруков А. С., Козлов Н. П., Морозов М. И., Росляков И. А. Взрывные плазменно-вихревые источники оптического излучения // Журнал технической физики. 2010. Том 80. Вып. 11. С. 87-94.
3. Власов А. Н., Дубков М. В., Черкасова Ю. В., Николаев А. В. Создание и исследование импульсного плазматрона с индукционным разрядом для получения автономных плазменных образований // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 78. С. 153-161.
4. Шафранов В. Д. О равновесных магнитогидродинамических конфигурациях // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1957. Т. 33. С. 710-722.
5. Власов А. Н. О возможности формирования тороидального токового слоя при искровом разряде // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1990. Т. 97. С. 468-475.
6. Власов А. Н. Об особенностях колебательного режима генерации магнитного поля в импульсном плазматроне // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 79. С. 114-123.
7. Власов А. Н. О дополнительном индукционном нагреве плазмы в импульсном плазматроне // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 81. С. 81-88.
8. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. 736 с.
9. Бурцев В. А., Калинин Н. В., Лучинский А. В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990. 289 с.
10. Власов А. Н., Дубков М. В., Буробин М. А. и др. (всего 10 человек). Проведение исследований индукционного разряда при быстром спаде сильного магнитного поля в горячей плазме с использованием установки типа «ИНГИР-Мега», имеющей индуктивный накопитель для генерирования индукционного разряда при накачке мегаваттными импульсами // Отчет о НИР (заключ.): 28-12 / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; рук. Власов А.Н. – Рязань. – 2013. № ГР 01201272674. Инв. № 02201450296.

UDC 537.523

## SHARPENING OF REAR FRONT OF QUASI-SPARK DISCHARGE IN PULSED PLASMATRON

**A. N. Vlasov**, Dr. Sc. (Tech.), full professor, Department of general and experimental physics, RSREU, Ryazan, Russia;  
orcid.org/0000-0002-6298-0433, e-mail: oief@rsreu.ru

*The possibility of sharpening the rear front of quasi-spark discharge which creates a magnetic field pulse in a pulsed plasmatron with induction discharge excited in a toroidal plasma vortex in semi-open cylindrical chamber on the side wall of which electrically exploding wires are placed, and near the opposite ends – cathode and anode connected to a capacitive storage is considered. The sharpening of rear front is achieved by including electro-explosive current interrupter in anode circuit. **The aim of the work** is to estimate the duration of trailing edge for quasi-spark discharge when using electro-explosive current interrupter and to calculate the cross section of the conductor used in it, as well as to experimentally verify the results of the calculations.*

**Key words:** *pulsed plasmatron, toroidal plasma vortex, quasi-spark discharge, electro-explosive current interrupter, pulsed magnetic field, induction discharge.*

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2023-84-225-233

### References

1. **Aleksandrov A. F., Timofeev I. B., Chernikov V. A., Yusupaliev U.** Plazmennyy toroidal'nyy vihr' v vozduhe. *Teplofizika vysokih temperatur*. 1988, vol. 26, no. 4, pp. 639-643. (in Russian).
2. **Bulanov S. S., Esiev R. U., Kamrukov A. S., Kozlov N. P., Morozov M. I., Roslyakov I. A.** Vzryvnye plazmenno-vihrevye istochniki opticheskogo izlucheniya. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2010, vol. 80, no. 11, pp. 87-94. (in Russian).
3. **Vlasov A. N., Dubkov M. V., Cherkasova Yu. V., Nikolaev A. V.** Sozdanie i issledovanie impul'snogo plazmotrona s indukcionnym razryadom dlya polucheniya avtonomnyh plazmennyyh obrazovaniy. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2021, no. 78, pp. 153-161. (in Russian).
4. **Shafranov V. D.** O ravnovesnyh magnitogidrodinamicheskikh konfiguratsiyah. *ZHETF*. 1957, vol. 33, pp. 710-722. (in Russian).
5. **Vlasov A. N.** O vozmozhnosti formirovaniya toroidal'nogo tokovogo sloya pri iskrovom razryade. *ZHETF*. 1990, vol. 70, no. 2, pp. 259-262. (in Russian).
6. **Vlasov A. N.** Ob osobennostyakh kolebatel'nogo rezhima generatsii magnitnogo polya v impul'snom plazmotrone. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2022, no. 79, pp. 114-123. (in Russian).
7. **Vlasov A. N.** O dopolnitel'nom induktsionnom nagreve plazmy v impul'snom plazmotrone. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2022, no. 81, pp. 81-88. (in Russian).
8. **Raizer Yu. P.** *Fizika gazovogo razryada*. Dolgoprudny: Intellect Publishing House. 2009. 736 p. (in Russian).
9. **Burtcev V. A., Kalinin N. V., Luchinskij A. V.** *Elektricheskij vzryv provodnikov i ego primeneniye v elektrofizicheskikh ustanovkakh*. Moskva: Energoatomizdat. 1990. 289 p. (in Russian).
10. **Vlasov A. N., Dubkov M. V., Burobin M. A., Manoshkin A. B., Nikolaev A. V. and others** (10 people in total). *Provedenie issledovaniy indukcionnogo razryada pri bystrom spade sil'nogo magnitnogo polya v goryachej plazme s ispol'zovaniem ustanovki tipa «INGIR-Mega», imeyushchej induktivnyy nakopitel' dlya generirovaniya indukcionnogo razryada pri nakachke megavattnymi impul'sami. Otchet o NIR (zaklyuch.): 28-12 / Ryazan. gos. radiotekhn. un-t; ruk. Vlasov A.N. Ryazan'. 2013, no. GR 01201272674. Inv. no. 02201450296.* (in Russian).