

УДК 537.523

О ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ В ИМПУЛЬСНОМ ПЛАЗМОТРОНЕ

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

*Рассмотрена возможность дополнительного индукционного нагрева плазмы в импульсном плазмотроне с индукционным разрядом, содержащем полуоткрытую цилиндрическую камеру, в которой вблизи торцов установлены катод и анод, а около боковой стенки расположены электрически взрывающиеся медные проволочки. Принцип действия плазмотрона основан на создании плотной плазмы между катодом и анодом при электровзрыве проволочек, в результате чего формируется квазиискровой разряд, создающий импульсное тороидальное магнитное поле, возбуждающее основной индукционный разряд. Дополнительный нагрев плазмы осуществляется при помощи дополнительного индукционного разряда, возбуждаемого импульсным полоидальным магнитным полем, создаваемым взрывающимися медными проволочками, установленными под некоторым углом к боковой стенке камеры. Экспериментально показано, что при таком способе ввода энергии в плазму формируется короткоживущий плазмод, после взрыва которого возникают автономные плазменные образования с аномально большим временем послесвечения 75 мс. **Цель работы** заключается в оценке параметров полоидального магнитного поля, необходимого для дополнительного нагрева плазмы в импульсном плазмотроне с индукционным разрядом, и экспериментальной проверке работоспособности макета такого импульсного плазмотрона.*

Ключевые слова: импульсный плазмотрон, электрический взрыв металла, квазиискровой разряд, индукционный разряд, плазмод, автономные плазменные образования.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-81-81-88

Введение

Импульсные плазмотроны представляют интерес для создания импульсных источников мощного оптического излучения, плазмохимии, а также для получения автономных плазменных образований (АПО), удаленных как от стенок разрядной камеры, так и от источников энергии [1]. Сформировать АПО возможно, если создать плотную плазму посредством электрического взрыва металлических проволочек в полуоткрытой цилиндрической камере и затем инициировать в этой плазме азимутальный индукционный разряд под действием импульсного магнитного поля с тороидальной геометрией [2]. При этом, как показано в [3], генерация импульсного магнитного поля возможна в колебательном режиме с использованием импульсного квазиискрового разряда между катодом и анодом, установленными вблизи торцов разрядной камеры (термин «квазиискровой разряд» заимствован из работы [4]). Предварительные эксперименты, рассмотренные с использованием одного разрядного канала [3], продемонстрировали принципиальную возможность предложенного метода. Однако эффективность этого метода при использовании большого числа параллельных каналов для создания импульсного магнитного поля с тороидальной геометрией не представляется очевидной из-за возможного развития неустойчивостей энергонапряженного импульсного газового разряда [5], в частности сжатия разряда в шнур (контракция) и пинчевания (дополнительного сжатия разряда магнитным полем). Одним из способов подавления неустойчивостей такого вида служит использование полоидального магнитного поля [6], линии которого в нашем случае направлены вдоль оси цилиндрической камеры и перпендикулярны к линиям тороидального магнитного поля, создаваемого квазиискровым разрядом. Следует отметить, что комбинация тороидального и полоидального полей способствует получению устойчивой магнитогидродинамической (МГД) конфигурации [7] в АПО. При этом получение МГД кон-

фигурации с тороидальным токовым слоем [8], обеспечивающим большое время жизни АПО, требует повышенной температуры плазмы в процессе наложения на неё импульсного тороидального поля. Однако, как оказалось, электровзрыв металла не обеспечивает необходимую температуру в импульсном плазмотроне [2] даже с учётом использования квазиискровой разряды [3]. Необходимый подогрев предположительно может быть обеспечен использованием дополнительного индукционного нагрева плазмы с помощью импульсного полоидального магнитного поля. В этом случае некоторая часть полоидального магнитного поля может быть захвачена формируемой МГД конфигурацией, обеспечивая её устойчивость согласно [7], что способствует повышению времени жизни АПО.

Цель настоящей работы заключается в теоретическом обосновании и экспериментальной проверке эффекта дополнительного индукционного нагрева плазмы в импульсном плазмотроне с использованием импульсного полоидального магнитного поля и экспериментальной проверке работоспособности макета такого импульсного плазмотрона.

Проблема ввода энергии в плазму при индукционном разряде

Известно, что индукционный разряд происходит за счёт вихревых электрических полей с напряженностью E при изменении индукции магнитного поля $\partial B/\partial t$ [9]. Согласно уравнению Максвелла для контура с площадью S и длиной линии L , ограничивающей контур, имеем

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{s}. \quad (1)$$

Рассмотрим в первом приближении однородное магнитное поле, пронизывающее контур в виде круга радиусом ρ . Тогда, интегрируя (1) и опуская знак минус, получаем:

$$E = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{\partial B}{\partial t}. \quad (2)$$

Рассмотрим МГД-конфигурацию с поверхностным током в виде тонкого кольца с большим радиусом тора R и малым радиусом r . Допустим, что кольцо находится под действием двух магнитных полей: тороидального с индукцией B_1 и полоидального с индукцией B_2 . Тогда напряженности соответствующих электрических полей составят

$$E_1 = \frac{r}{2} \cdot \frac{\partial B_1}{\partial t}, \quad (3)$$

$$E_2 = \frac{R}{2} \cdot \frac{\partial B_2}{\partial t}. \quad (4)$$

В нашем случае $R \gg r$ и вихревое электрическое поле E_2 (4), создаваемое изменяющимся полоидальным полем B_2 , может существенно превосходить поле E_1 (3), создаваемое изменяющимся тороидальным полем B_1 при сопоставимых скоростях изменений этих полей.

Численные оценки величин вихревых электрических полей будут приведены далее.

Таким образом, использование изменяющегося полоидального магнитного поля для дополнительного индукционного нагрева плазмы представляется целесообразным. Кроме того, возникающий электрический ток под действием вихревого электрического поля E_2 способствует выравниванию локальных температур в плазме, первоначально создаваемой электрически взрывающимися проводниками в рассматриваемом импульсном плазмотроне.

Конструкция и принцип работы импульсного плазмотрона с дополнительным нагревом плазмы

Ранее в конструкции импульсного плазмотрона [2] для формирования индукционного разряда использовалось импульсное магнитное поле с тороидальной геометрией, создаваемое электрически взрывающимися медными проводниками большого сечения. В усовершен-

стованной конструкции импульсное тороидальное магнитное поле создаётся квазиискровым разрядом [3] при использовании 16-ти параллельных каналов. Чтобы уменьшить и, по возможности, исключить влияние выше названных неустойчивостей в виде контракции и пинчевания, на основе анализа литературных данных [9] предусмотрено следующее.

1. Каждый из каналов питается от отдельной конденсаторной батареи.
2. В каждом из каналов используется отдельная двухпроводная линия.
3. Размещается стабилизирующий цилиндр по оси разрядной камеры.

Фото исследуемого импульсного плазматрона показано на рисунке 1, а, а фото этого плазматрона без анодного узла показано на рисунке 2, а.

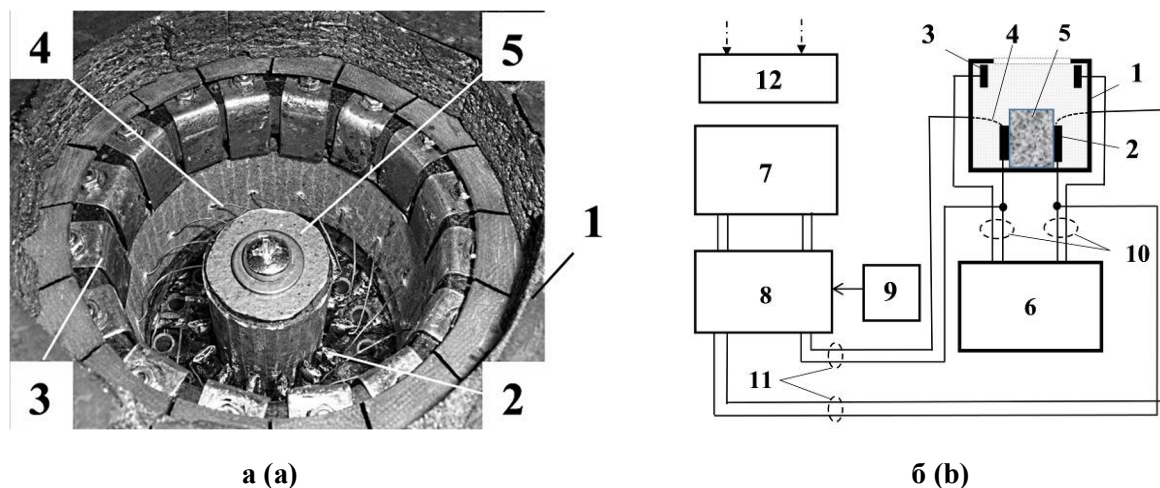


Рисунок 1 – Импульсный плазматрон с дополнительным нагревом плазмы: а – фото импульсного плазматрона, б – схема электропитания плазматрона: 1 – полуоткрытая цилиндрическая камера; 2 – катод; 3 – анод; 4 – электрически взрывающиеся медные проволочки; 5 – стабилизирующий цилиндр; 6 – высоковольтная конденсаторная батарея; 7 – низковольтная конденсаторная батарея; 8 – тиристорный коммутатор; 9 – блок запуска; 10 – витые высоковольтные пары; 11 – витые низковольтные пары; 12 – контрольно-регистрирующая аппаратура

Figure 1 – Pulsed plasmatron with additional plasma heating: a – photo of pulse plasmatron, b – plasmatron power supply circuit: 1 – semi-open cylindrical chamber; 2 – cathode; 3 – anode; 4 – electrically exploding copper wires; 5 – stabilizing cylinder; 6 – high voltage capacitor bank; 7 – low voltage capacitor bank; 8 – thyristor switch; 9 – start-up unit; 10 – twisted high voltage pairs; 11 – twisted low-voltage pairs; 12 – control and recording equipment

Импульсный плазматрон с дополнительным нагревом плазмы имеет полуоткрытую покрытую слюдой цилиндрическую камеру (рисунок 1, а), диаметр которой составляет 76 мм, а длина – 70 мм. Количество параллельных разрядных каналов равно 16, каждый из них состоит из катода, анода и электрически взрывающейся проволочки. Проволочки имеют диаметр 0,5 мм, длину – 40 мм, материал – медь.

Устройство работает следующим образом.

После заряда конденсаторных батарей 6 и 7 (рисунок 1, б) производится активация тиристорного коммутатора 8 с помощью блока запуска 9, и от низковольтной конденсаторной батареи 7 через витые пары 11 поступает напряжение на электрически взрывающиеся проволочки 4 в полуоткрытой цилиндрической камере 1. После электровзрыва проволочек между катодом 2 и анодом 3 образуется плотная плазма, через которую посредством витых пар 10 разряжается высоковольтная конденсаторная батарея 6.

Стабилизирующий цилиндр 5 способствует повышению устойчивости квазиискрового разряда. Контрольно-регистрирующая аппаратура 12 включает двухканальный осциллограф и видеокамеру.

Импульсное полоидальное магнитное поле в описываемом импульсном плазматроне создаётся благодаря наклонному расположению взрывающихся медных проволочек, как показано

на рисунке 2, а. В этом случае создаётся полоидальное магнитное поля аналогичное магнитному полю замкнутого кругового контура с током, величина которого в рассматриваемом здесь случае составляет 1/8 часть разрядного тока, протекающего через взрывающиеся проволоочки. Это связано с тем, что наклон проволоочек составляет 2 пролёта между 16 электродами (рисунок 2, а).

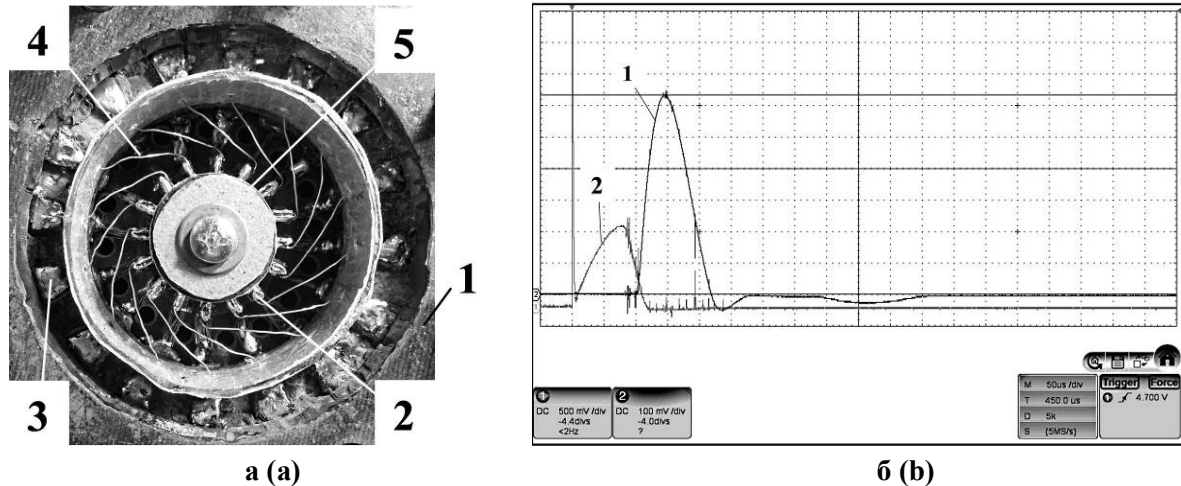


Рисунок 2 – Импульсный плазматрон и токи разряда: а – фото импульсного плазматрона без анодного узла: 1 – полуоткрытая цилиндрическая камера; 2 – катод; 3 – подводящие низковольтные электроды; 4 – электрически взрывающиеся медные проволоочки; 5 – стабилизирующий цилиндр; б – осциллограммы: 1 – ток, создающий тороидальное магнитное поле; 2 – ток, создающий полоидальное магнитное поле

Figure 2 – Pulsed plasmatron and discharge currents: а – photo of a pulsed plasma torch without anode node: 1 – semi-open cylindrical chamber; 2 – cathode; 3 – low-voltage supply electrodes; 4 – electrically exploding copper wires; 5 – stabilizing cylinder; б – oscillograms: 1 – current creating toroidal magnetic field; 2 – current creating poloidal magnetic field

Процесс ввода энергии в плазму рассматриваемого импульсного плазмоида может быть условно разбит на три фазы.

Фаза 0 (подготовительная) – период времени между моментом подачи напряжения на электрически взрывающиеся проволоочки и моментом их электровзрыва под действием тока I_2 (рисунок 2, б).

Фаза 1 – период времени между моментом электрического взрыва проволоочек и моментом достижения максимума разрядного тока между катодом и анодом I_1 (рисунок 2, б). На этом этапе формируется плазменный тороидальный вихрь из материала взорвавшихся проволоочек и окружающих газов, и образовавшая плазма дополнительно подогревается индукционным током при действии вихревого электрического поля E_2 (4) и далее нагревается индукционным током, возникающим при нарастании индукции магнитного поля, создаваемого разрядным током I_1 . Здесь основную роль играют газодинамические и электромагнитные процессы в низкотемпературной плазме.

Фаза 2 – это период времени, охватывающий период спада разрядного тока I_1 . При достаточно быстром спаде этого тока внутри плазменного тороидального вихря возникает сильное вихревое электрическое поле и может индуцироваться вторичный ток за счёт явления взаимной индукции. В этом случае может образоваться плазмоид – МГД-конфигурация в виде кольца с поверхностным винтовым током [7] или в виде тороидального токового слоя внутри плазменного вихря [8].

Внешне плазмоид выглядит как АПО, но плазмоид может взрываться из-за потери равновесия МГД-конфигурации, поскольку захваченное плазмой тороидальное магнитное поле само по себе неустойчиво [7]. После взрыва плазмоида могут образоваться новые АПО.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исследуемый импульсный плазмотрон устанавливался в электрофизической установке ИНГИР-Мега-15 [10], в состав которой входили указанные на рисунке 1, б блоки 6, 7, 8, 9 и 12.

Осциллограммы токов, полученные в эксперименте, приведены на рисунке 2, б. Они позволяют оценить параметры разрядных токов: амплитуда тока квазиискрового разряда, создающего тороидальное магнитное поле, составляет $I_1 = 530$ кА, передний фронт имеет длительность $\tau_{1f} = 30$ мкс, а задний фронт имеет длительность $\tau_{1b} = 70$ мкс; амплитуда тока электрически взрывающихся проволочек составляет $I_2 = 80$ кА, при этом лишь 1/8 часть тока I_2 создаёт полоидальное магнитное поле, а длительность фронта импульса тока $I_2/8$ определяется процессом электровзрыва металла и составляет $\tau_2 = 2$ мкс (по оценке осциллограммы фототока в работе [2]).

Процессы формирования и эволюции АПО фиксировались видеокамерой с частотой 240 кадров в секунду, некоторые из видеокадров приведены на рисунке 3.

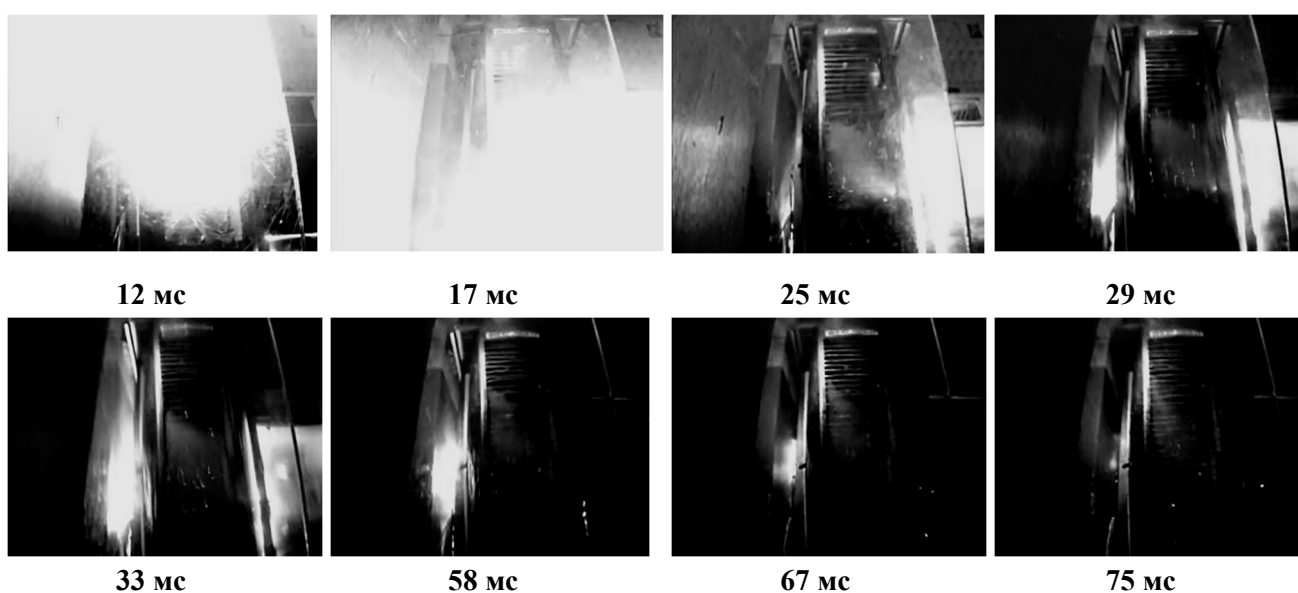


Рисунок 3 – Видеокадры процесса формирования и эволюции автономного плазменного образования (АПО). На 17 мс произошел взрыв АПО и распад на два других АПО.

Цифрами указано время от начала процесса формирования АПО

Figure 3 – Video frames of formation and evolution of autonomous plasma formation (APF).

At 17 ms, there was an explosion of APF and the decay into two other APF.

The numbers indicate the time from the beginning of APF formation process

На основе анализа видеокадров (рисунок 3) видно, что на выходе исследуемого импульсного плазмотрона действительно получилось АПО (видеокадр 12 мс, первые два видеокадра были полностью засвечены). Однако процесс эволюции этого АПО существенно отличается от ранее полученных результатов в работе [2]. Если ранее АПО в целом сохраняло свою форму, близкую к шарообразной с интенсивным световым излучением в течение 40 мс, то в рассматриваемом случае на 17 мс АПО взорвалось и распалось на два других АПО (справа и слева на рисунке 3, кадры 25, 29 и 33 мс). Необычным является и то, что эти два новых АПО наблюдались вне взрывной камеры, проникнув в щель размером около 1 см (слева на рисунке 3) и технологическое отверстие диаметром около 3 см (справа на рисунке 3). Объяснить этот феномен может кластерная гипотеза [11], согласно которой АПО может состоять из кластеров в виде прочно связанных соединений положительного или отрицательного ионов с оболочкой из нейтральных частиц. Кластерная оболочка, состоящая из 3 – 5 молекул воды, имеет энергию связи около 4 эВ, и она не должна разрушаться от соударений при температу-

ре ниже 1000 К [11, с. 170]. Следует отметить, что в описываемом эксперименте в полуоткрытой камере (рисунок 1, а) снизу были выполнены отверстия, через которые пропусклся водяной пар.

Представляется вполне вероятным, что в данном эксперименте, судя по видеокадру 12 мс (рисунок 3), был получен плазмоид – МГД-конфигурация в виде плазменного сгустка, удерживающего магнитное поле. Подтверждением этого может служить видеокадр 17 мс, на котором зафиксирован взрыв АПО-плазмоида. Малое время жизни этого плазмоида может быть объяснено тем, что не были в полной мере выполнены условия устойчивости [7] или [8]. Выделенная при взрыве плазмоида энергия могла быть достаточной для образования кластеров [11].

Вернёмся к вопросам прогрева плазмы.

Максимальная индукция тороидального магнитного поля в рассматриваемом случае составляет

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi R}, \quad (5)$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

Напряженность вихревого электрического поля с учётом (5) и (3) на переднем фронте составляет

$$E_{1f} = \frac{r}{R} \cdot \frac{\mu_0 I_1}{4\pi\tau_{1f}} = \frac{0,5}{3} \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 530 \cdot 10^3}{4\pi \cdot 30 \cdot 10^{-6}} = 293 \text{ В/м} = 2,93 \text{ В/см}, \quad (6)$$

а на заднем фронте –

$$E_{1b} = \frac{r}{R} \cdot \frac{\mu_0 I_1}{4\pi\tau_{1b}} = \frac{0,5}{3} \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 530 \cdot 10^3}{4\pi \cdot 70 \cdot 10^{-6}} = 127 \text{ В/м} = 1,27 \text{ В/см}. \quad (7)$$

Результаты вычислений по формулам (6) и (7) показывают, что для развития индукционного разряда при таких напряженностях вихревого электрического поля требуется довольно высокая температура плазмы порядка 12000 К [9].

Рассмотрим действие полоидального магнитного поля. Его максимальная индукция составляет

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2 / 8}{2R}. \quad (8)$$

Напряженность вихревого электрического поля при действии полоидального магнитного поля с учётом (8) и (4) составляет

$$E_2 = \frac{\mu_0 I_2}{16\tau_2} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 80 \cdot 10^3}{16 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 3142 \text{ В/м} = 31,4 \text{ В/см}. \quad (9)$$

Полученное значение напряженности вихревого электрического поля (9) достаточно для успешного развития индукционного разряда [9], это поле E_2 вполне может вызвать индукционные токи, которые могут нагреть плазму начиная с температуры порядка 6000 К до температуры порядка 12000 К, подготавливая эту плазму к действию вихревых электрических полей E_{1f} и E_{1b} .

Заключение

В настоящей работе была поставлена и решена задача теоретического обоснования и экспериментальной проверки эффекта дополнительного индукционного нагрева плазмы в импульсном плазмотроне с использованием импульсного полоидального магнитного поля. Это поле создавалось посредством наклонного расположения электрически взрывааемых проволок, первоначально создающих плотную плазму, которая затем подогревается индукционным разрядом.

Проведенные теоретические оценки напряженности вихревых полей показали целесообразность использования индукционного разряда под воздействием импульсного полоидаль-

ного поля перед тем, как вводить энергию в плазму при помощи индукционного разряда, возбуждаемого импульсным тороидальным магнитным полем. Сделанные оценки позволяют наметить пути дальнейшего усовершенствования конструкции импульсного плазмотрона с индукционным разрядом.

Проведенные эксперименты показали, что на выходе созданного макета импульсного плазмотрона могут формироваться автономные плазменные образования (АПО) разного типа: предположительно в начале в виде плазмоида – плазменного сгустка, удерживающего магнитное поле, а затем – АПО, состоящего из кластеров – прочно связанных соединений положительных или отрицательных ионов с оболочкой из нейтральных частиц – молекул воды.

Созданный импульсный плазмотрон с индукционным разрядом и дополнительным нагревом плазмы предполагается использовать для изучения плазмохимических реакций при действии сильного импульсного магнитного поля, а также для напыления металлических плёнок на поверхность различных материалов при воздействии на них автономными плазменными образованиями, формируемыми созданным импульсным плазмотроном. Практический интерес представляет использование созданного импульсного плазмотрона для испытания радиоаппаратуры и изделий электронной техники на воздействие электромагнитного излучения и плазменных образований, возникающих 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. **Фуров Л. В.** Получение автономных долгоживущих плазменных образований в свободной атмосфере // Журнал технической физики. 2005. Том 75. Вып. 3. С. 98-101.
2. **Власов А.Н., Дубков М.В., Черкасова Ю.В., Николаев А.В.** Создание и исследование импульсного плазмотрона с индукционным разрядом для получения автономных плазменных образований // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 78. С. 153-161.
3. **Власов А. Н.** Об особенностях колебательного режима генерации магнитного поля в импульсном плазмотроне // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 79. С. 114-123.
4. **Лебедева Е. В., Микушев В. М., Чирцов А. С., Швагер Д. А.** Моделирование плазменного факела в низкотемпературном аргоне // Современные наукоёмкие технологии. 2017. № 2. С. 41-47.
5. **Климкин В.М.** Повторная контракция энергонапряженных импульсно-периодических разрядов // Письма в ЖТФ. 2003. Том 29. Вып. 18. С. 16-21.
6. **Кенро Миямото.** Основы физики плазмы и управляемого синтеза / пер. с англ. под общ. ред. В.Д. Шафранова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 424 с.
7. **Шафранов В. Д.** О равновесных магнитогидродинамических конфигурациях // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1957. Т. 33. С. 710-722.
8. **Власов А. Н.** О возможности формирования тороидального токового слоя при искровом разряде // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1990. Т. 97. С. 468-475.
9. **Райзер Ю. П.** Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. 736 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.
11. **Стаханов И. П.** О физической природе шаровой молнии. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.

UDC 537.523

ON ADDITIONAL INDUCTION HEATING OF PLASMA IN PULSED PLASMATRON

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

*The possibility of additional induction heating of plasma in a pulsed plasmatron with induction discharge containing semi-open cylindrical chamber in which a cathode and an anode are installed near the ends and electrically exploding copper wires are located near the side wall. The operating principle of plasma torch is based on the creation of dense plasma between cathode and anode during electric explosion of wires, because of which quasi-spark discharge is formed, creating pulsed toroidal magnetic field that excites main induction discharge. Additional induction plasma heating is carried out by means of additional induction discharge excited by pulsed poloidal magnetic field created by exploding copper wires installed at some angle to the side wall of a chamber. It has been experimentally shown that with this method of energy input into plasma, a short-lived plasmoid is formed, after the explosion of which autonomous plasma formations with abnormally long afterglow time of 75 ms arise. **The aim of the work** is to evaluate the parameters of polar magnetic field required for additional plasma heating in a pulsed plasma torch with induction discharge, and to experimentally verify the operability of layout for such pulsed plasmatron.*

Key words: pulsed plasmatron, electric explosion of metal, quasi-spark discharge, induction discharge, plasmoid, autonomous plasma formations.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-81-81-88

References

1. **Furov L. V.** Poluchenie avtonomnyh dolgozhivushchih plazmennyyh obrazovaniy v svobodnoj atmosfere. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2005, vol. 75, issue. 3. pp. 98-101. (in Russian).
2. **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).
3. **Vlasov A. N.** Ob osobennostyah kolebatel'nogo rezhima generacii magnitnogo polya v impul'snom plazmotrone. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2022, no. 79, pp. 114-123. (in Russian).
4. **Lebedeva E. V., Mikushev V. M., Chirtsov A. S., Schweiger D. A.** Modelirovanie plazmennogo fakela v nizkotemperaturnom argone. *Sovremennye naukoymkie tekhnologii*. 2017, no. 2, p. 41-47. (in Russian).
5. **Klimkin V. M.** Povtornaya kontrakciya energonapryazhennyh impul'sno-periodicheskikh razryadov. *Pis'ma v ZHTF*. 2003, vol. 29, issue 18, pp. 16-21. (in Russian).
6. **Kenro Miyamoto.** *Fundamentals of Plasma Physics and Controlled Synthesis* / Translated from English under the general editorship of V.D. Shafranov. Moscow: FIZMATLIT. 2007, 424 p. (in Russian).
7. **Shafranov V. D.** O ravnovesnyh magnitogidrodinamicheskikh konfiguraciyah. *Zhurnal eksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki*. 1957, vol. 33, pp. 710-722. (in Russian).
8. **Vlasov A. N.** O vozmozhnosti formirovaniya toroidal'nogo tokovogo sloya pri iskrovom razryade. *Zhurnal eksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki*. 1990, vol. 70, no. 2, pp. 259-262. (in Russian).
9. **Raizer Yu. P.** *Fizika gazovogo razryada* (Gas discharge physics). Dolgoprudny: Intellect Publishing House, 2009. 736 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 induktivnyj 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).
11. **Stakhanov I. P.** O fizicheskoy prirode sharovoj molnii (On the physical nature of ball lightning). 2nd ed., reprint. and additional. Moscow: Energoatomizdat. 1985, 208 p. (in Russian).