

УДК 533.9.03

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ КОАКСИАЛЬНОГО МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

Циммерман Александр Игоревич^{1,2},
alextsimmer@yandex.ru

Шаненков Иван Игоревич^{1,2},
i.i.shanenkov@utmn.ru

Насырбаев Артур Ринатович²,
arn1@tpu.ru

Никитин Дмитрий Сергеевич²,
nikitindmsr@yandex.ru

Сивков Александр Анатольевич²,
sivkov@tpu.ru

¹ Тюменский государственный университет,
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена широким спектром областей применения разнообразных видов генераторов плазмы, в том числе, в составе аналитических устройств, технологических установок и для создания токамаков, ионных и плазменных двигателей, спутников, лазерной техники, а также для нанесения пленок и покрытий на различные поверхности и синтеза микро- и нанопорошков.

Цель: определить наилучший способ инициирования дугового разряда в ускорительном канале коаксиального магнитоплазменного ускорителя, оценить влияние конфигурации канала формирования плазменной структуры на электродинамические нагрузки коаксиального магнитоплазменного ускорителя и рассчитать коэффициент полезного действия преобразования накопленной энергии в подведенную.

Объекты: коаксиальный магнитоплазменный ускоритель, инициирование дугового разряда, центральный электрод, электрод-ствол, канал формирования плазменной структуры.

Методы: плазмодинамический синтез, измерение и регистрация импульсных токов и напряжений, измерение электроэрозии посредством массы эродированного электрода-стола, высокоскоростная фоторегистрация плазменной струи.

Результаты. Рассмотрены два способа инициирования дугового разряда с использованием металлических проволочек и графитизации. Установлено, что они не влияют на энергетические параметры процесса плазмодинамического синтеза, однако применение графитизации выглядит предпочтительней в силу большей технологичности процедуры, которая обеспечивает простоту подготовки ускорителя и надежность его работы. Установлена возможность снижения амплитуды тока дугового разряда на 29 % при увеличении длины канала формирования плазменной структуры с 5,5 до 11,5 мм, что обеспечивает уменьшение электродинамических нагрузок на все узлы системы. Экспериментально определена оптимальная длина канала формирования плазменной структуры 9,5 мм, способствующая получению высокого коэффициента полезного действия преобразования накопленной энергии в подведенную и надежности работы системы.

Ключевые слова:

Плазмодинамический синтез, коаксиальный магнитоплазменный ускоритель, дуговой разряд, импульсная электроразрядная плазма, электроэрозия.

Введение

Интерес к генераторам плазмы (устройства, создающие потоки низкотемпературной плазмы) растет с каждым годом за счет широкого спектра областей их возможного применения: аналитические устройства (например, ионные микроскопы), технологические установки, токамаки, ионные и плазменные двигатели для спутников, нанесение пленок и покрытий на различные поверхности, синтез микро- и нанопорошков, лазерная техника [1–8]. В настоящее время многообразие генераторов плазмы весьма обширно. Если требуются потоки с кинетической энергией ионов E_i до 10 эВ, то они генерируются, например,

плазмотронами. Для многих задач нужны потоки с $E_i > 10$ эВ, которые можно получить с помощью ионных источников (ионные инжекторы) или плазменных ускорителей. Такие генераторы плазмы отличаются тем, что в ионных инжекторах происходит прямое ускорение одноименно заряженных ионов, движущихся вдоль электрического поля, созданного электродами, а в плазменных ускорителях плазма квазинейтральна, поскольку там находятся и ионы, и компенсирующие их объемный заряд электроны. Существует три основных типа плазменных ускорителей: тепловые (основным ускоряющим плазму фактором является градиент давления), термомагнитные

(ускорение за счет градиента давления и силы Ампера) и электромагнитные (ускорение за счет силы Ампера) [9–13].

Электромагнитные плазменные ускорители являются наиболее универсальными, так как магнитное поле в них может быть собственным, то есть создаваться токами, текущими в плазменном объеме между двумя электродами, и внешним, созданным с помощью внешней магнитной системы. Это обеспечивает перспективность применения данных устройств с точки зрения многообразия режимов работы и возможности их регулирования [12–16]. Выделяют два типа электромагнитных плазменных ускорителей: стационарные плазменные двигатели с внешним магнитным полем и коаксиальные (квази)стационарные сильноточные с собственным магнитным полем.

В этот класс генераторов плазмы входит и коаксиальный магнитоплазменный ускоритель (КМПУ), который относится к ускорителям типа Z-пинч, так как ток протекает между двумя электродами (центральный электрод и электрод-ствол) вдоль оси симметрии камеры z , а цилиндрический плазменный поток сжимается охватывающими ее по азимуту магнитными силовыми линиями поля [16–18]. Процесс начинается после подключения электродов к источнику энергии, при замыкании цепи происходит пробой промежутка между электродами и образование дугового разряда. Образовавшаяся плазменная структура дугового разряда ускоряется за счет силы Ампера до скоростей, близких к сверхзвуковым значениям (несколько км/с), затем происходит вынос материала вместе с плазменным потоком в камеру ускорителя, где давление и температура достигают критических значений [18].

Существует множество оригинальных модификаций КМПУ, адаптированных для решения конкретных прикладных задач, в том числе таких, как металание макротел, получение ультрадисперсных порошков различных материалов, нанесение покрытий на мишень [18–21]. Вне зависимости от назначения конкретной модификации КМПУ ключевую роль для конечной задачи играют процессы формирования и развития стабильного дугового разряда [21]. В коаксиальной электродной системе они определяются условиями инициирования разряда, конфигурацией канала формирования плазменной структуры и энергетическими параметрами режима работы ускорителя.

В работе исследованы способы инициирования дугового разряда в ускорительном канале КМПУ, влияние конфигурации канала формирования плазменной структуры на электродинамические нагрузки коаксиального магнитоплазменного ускорителя и коэффициент полезного действия преобразования накопленной энергии W_3 в подведенную W .

Экспериментальная часть

Установка плазмодинамического синтеза состоит из емкостного накопителя энергии (I), коаксиального магнитоплазменного ускорителя типа Z-пинч (II) и камеры-реактора (III). Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

Накопитель энергии позволяет осуществлять электропитание ускорителя с возможностью регулирования зарядных энергетических параметров (зарядное напряжение U_3 до 5,0 кВ, зарядная емкость C_3 до 28,8 мФ) и количества последовательных импульсов электропитания (до четырех). Это реализуется путем подачи управляющих сигналов от многоканального генератора задержанных импульсов (ГИ-1) на блоки управления (БУ) игнитронных управляемых разрядников (УР), подключенных к соответствующим секциям конденсаторных батарей. Регистрация энергетических параметров $U(t)$ и $I(t)$ осуществляется с использованием осциллографа Tektronix TDS2012, к которому подключаются выводы от омического делителя напряжения (ДН) и трансформатора Роговского (ТР).

Основными элементами КМПУ являются центральный электрод и электрод-ствол, жестко зафиксированные механически металлической обоймой и электрически соединенные разрушаемой токопроводящей перемычкой, которая может иметь два принципиально отличающихся варианта исполнения. Первый реализуется путем создания фонтанообразного пучка металлических проволочек, размещенных в канале формирования плазменной структуры (КФПС) в стеклопластиковом изоляторе у вершины центрального электрода. КФПС задает геометрию формирующейся плазменной структуры, которая зависит от диаметра и длины канала формирования плазменной структуры. Диаметр КФПС при проведении исследований оставался неизменным, а длину $l_{\text{КФПС}}$ варьировали от 5,5 до 11,5 мм. Второй вариант исполнения заключается в нанесении на стенки КФПС тонкого проводящего углеродного слоя путем распыления графитового аэрозоля.

В собранном виде КМПУ монтируется в герметичную камеру-реактор и подключается к шинам накопителя. Объем камеры-реактора заполняется кислородом при давлении 10^5 Па.

Емкостной накопитель энергии заряжается до необходимой величины U_3 . При запуске системы ГИ-1 подает импульсы на блоки управления игнитронными разрядниками, что вызывает их срабатывание, после чего батарея конденсаторов ЕНЭ начинает процесс разряда, что обуславливается появлением напряжения на электродах коаксиального магнитоплазменного ускорителя и протеканием разрядного тока по цепи. Далее ток достигает некоторого значения и происходит разрушение перемычки с возникновением дуговой стадии разряда в межэлектродном пространстве КФПС, за счет чего происходит образование плазменной структуры, ускоряющейся вдоль оси z , что приводит к электроэрозионной наработке электрода-ствола, выносу материала из ускорительного канала, его распылению в объеме камеры-реактора с формированием оксидов железа. Следовательно, электроэрозионная наработка является основным методом наработки прекурсоров для синтеза и определяет производительность системы по синтезу дисперсных продуктов, поэтому оценка влияния энергетических параметров на данный показатель является важным этапом при оценке эффективности работы системы.

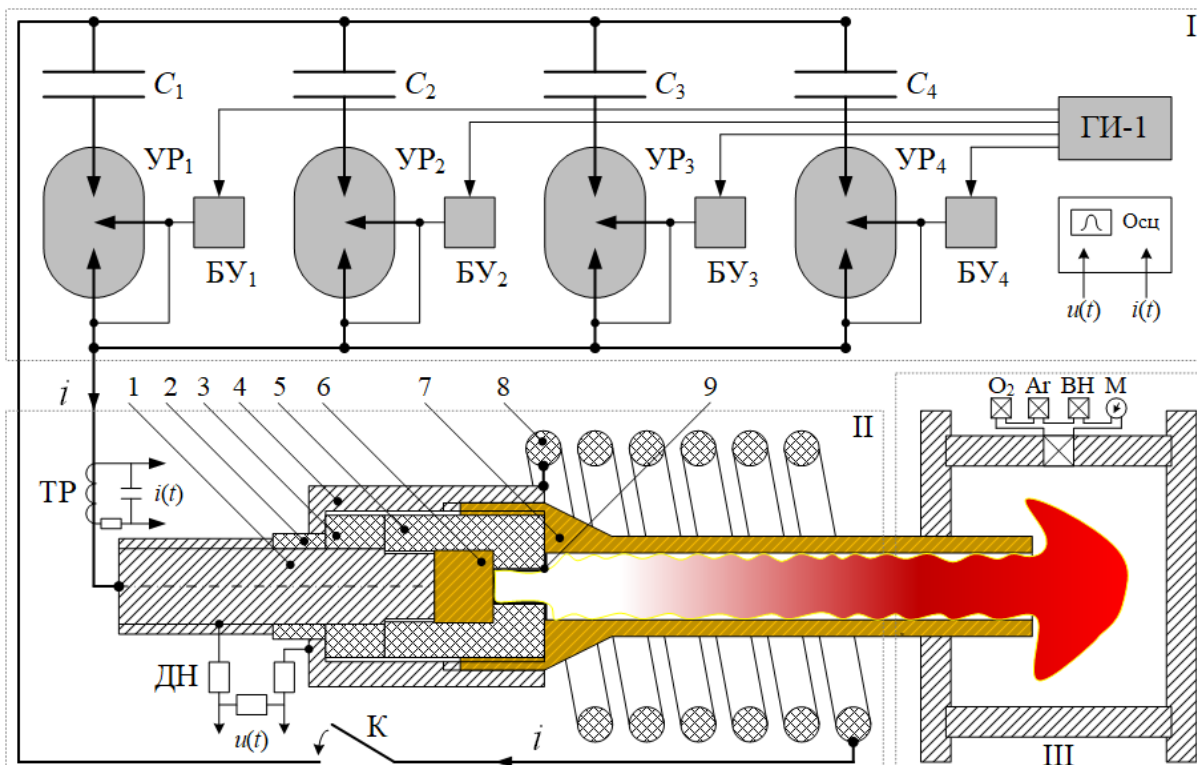


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: I – емкостной накопитель энергии, II – коаксиальный магнитоплазменный ускоритель (1 – хвостовик центрального электрода, 2 – проходной изолятор, 3 – опорный изолятор, 4 – металлическая обойма, 5 – изолятор наконечника, 6 – стальная вставка центрального электрода, 7 – стальной электрод-ствол, 8 – внешняя индуктивная система, 9 – разрушаемая перемычка), III – камера-реактор (ВН – вакуумный насос, М – манометр)

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup: I – capacitive energy storage, II – coaxial magnetoplasma accelerator (1 – central electrode shank, 2 – pass-through insulator, 3 – support insulator, 4 – metal holder, 5 – tip insulator, 6 – steel central electrode insertion, 7 – steel barrel electrode, 8 – external inductive system, 9 – destructible jumper), III – reactor chamber (ВН – vacuum pump, М – gauge)

Измерение электроэрозии электродов-стволов осуществлялось на аналитических весах HR-250AZ (A&D, Япония) с дискретностью 0,1 мг. Фотограммы плазменной струи размером кадра 128×128 пикселей были получены с помощью высокоскоростной фоторегистрации на установке Photron FastCAM SA1.1 (Photron Limited, Япония) с частотой 180000 кадров в секунду.

Результаты и обсуждение

Первым ключевым фактором, влияющим на процесс формирования и развития дугового разряда, является способ его инициирования. Как было отмечено ранее, в рассматриваемой системе принципиально возможно реализовать два варианта инициирования дугового разряда в ускорительном канале коаксиального магнитоплазменного ускорителя: с использованием металлических проволочек или с помощью графитизации. Первый вариант (рис. 2, а) – металлические проволочки, установленные между вставкой наконечника центрального электрода и электродом-стволом, второй вариант (рис. 2, б) – нанесение тонкого слоя графитового аэрозоля на внутреннюю поверхность КФПС. С целью определения наиболее эффективного способа инициирования дугового разряда в ускорительном канале КМПУ проведены сравни-

тельные экспериментальные исследования по оценке их влияния на энергетические параметры системы (рис. 3).

На рис. 3 представлены осциллограммы тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$, кривые мощности $P(t)$ и подведенной энергии $W(t)$ при рассматриваемых способах инициирования дугового разряда и прочих одинаковых условиях ($U_3=2,5$ кВ, $C_3=14,4$ мФ). Расчет мощности и энергии проводился по общеизвестным формулам (1) и (2) соответственно:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t), \quad (1)$$

$$w(t) = \sum (p(t) \cdot \Delta t), \quad (2)$$

где $i(t)$, $u(t)$, $p(t)$, $w(t)$ – мгновенные значения тока, напряжения, мощности и подведенной энергии; Δt – шаг времени.

При использовании металлических проволочек, сопротивление которых составляло около 1 мОм, при замыкании силовых ключей по контуру через перемычку в виде проволочек через несколько микросекунд начинает протекать ток разряда емкостного накопителя энергии, который определяется зарядным напряжением и параметрами контура. При достижении током некоторого значения, вероятно, происходит электровзрыв проволочек, сопровождающийся

скачкообразным изменением параметров [20–23], о чем свидетельствует характер плазменной струи на кадрах высокоскоростной фотосъемки (рис. 2, а), после чего и начинается формирование плазменной структуры дугового разряда. Напряжение электровзрывного импульса в течение нескольких микросекунд плавно снижается до уровня дуговой стадии

разряда. За счет протекания нарастающего тока по электроразрядной плазме происходит ускорение плазменной структуры, что сопровождается ростом мощности разряда $P(t)$ до амплитудного значения, после чего происходит плавное уменьшение мощности в связи с разрядом конденсаторных батарей.

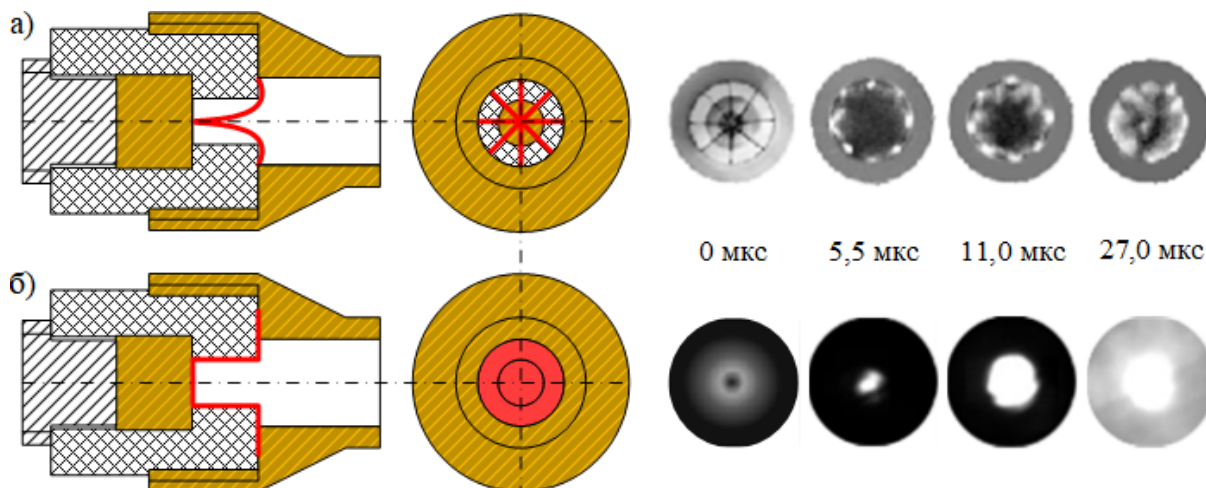


Рис. 2. Узел центрального электрода коаксиального магнитоплазменного ускорителя и высокоскоростные фотографии процесса инициирования дугового разряда: а) металлическими проволочками; б) графитизацией поверхности

Fig. 2. Coaxial magnetoplasma accelerator central electrode assembly and high-speed photograms of arc discharge initiation: а) metal wires; б) graphitized surface

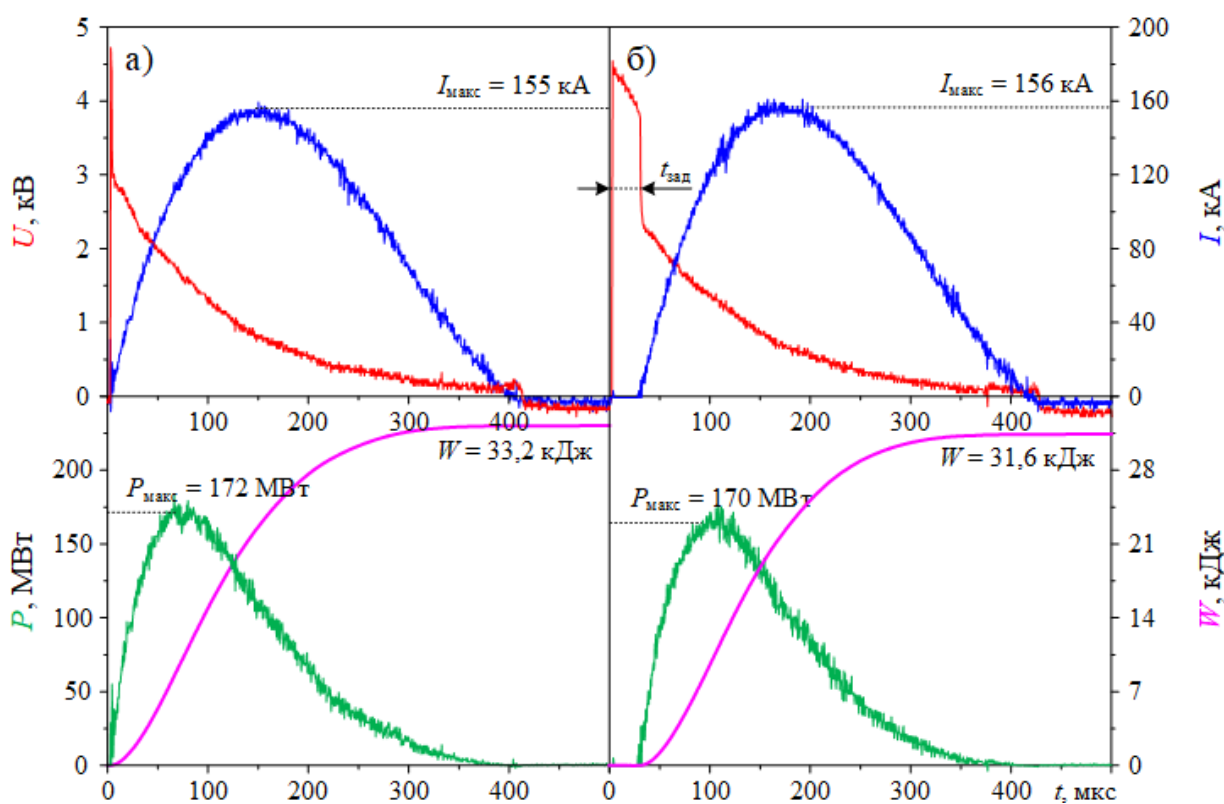


Рис. 3. Осциллограммы $I(t)$, $U(t)$, $P(t)$ и $W(t)$ процесса плазмодинамического синтеза при разных способах инициирования дугового разряда: а) металлические проволочки; б) графитизация поверхности

Fig. 3. Oscillograms of $I(t)$, $U(t)$, $P(t)$ and $W(t)$ of the plasma dynamic synthesis for different methods of arc discharge initiation: а) metal wires; б) surface graphitization

При использовании графитизации в качестве токопроводящей перемычки между электродами ускорителя наблюдается изменение в формировании дугового разряда. Подача напряжения на электроды ускорителя генерирует ток по углеродной перемычке, обусловленный величиной зарядного напряжения и общим сопротивлением контура, включающего сопротивление углеродной перемычки значением около 300 Ом. Под действием тока перемычка нагревается и электрически разрушается через некоторое время $t_{\text{зад}}$ – время задержки. Данный процесс можно описать с помощью теории теплового пробоя [24–27], обусловленного тепловыми процессами, протекающими в материале при воздействии на него электрического поля. Тепловой пробой происходит в случае выделения в диэлектрическом материале за счет высоких диэлектрических потерь большого количества энергии, превышающего значения, которые могут быть рассеяны в текущих условиях в окружающую среду. В рассматриваемом случае межэлектродное пространство, заполненное диэлектриком, электрически неоднородно, поскольку углеродный слой перемычки обладает повышенной проводимостью. При подаче напряжения возникает множество дискретных каналов повышенной проводимости, обеспечивающих Джоулев разогрев перемычки, что приводит к еще большему нарастанию тока в цепи, так как сопротивление межэлектродного участка резко уменьшается. Происходит нарушение теплового равновесия, процесс становится лавинообразным: проводимость и температура взаимно «разгоняют» друг друга. В итоге происходит дальнейшее нарастание тепла до момента, когда количество теплоты, выделяемое в объеме КФПС за счет диэлектрических потерь, превышает количество теплоты, рассеиваемое системой в текущих условиях. Это является моментом возникновения теплового пробоя с последующим формированием плазменной структуры дугового разряда [28–30], как это видно на кадрах высокоскоростной фотосъемки (рис. 2, б).

Судя по осциллограммам (рис. 3), оба способа иницирования плазменной струи являются сопоставимыми по энергетическим параметрам. Применение металлических проволочек образует процесс, близкий к электровзрыву проводников [31, 32]. Использование метода графитизации приводит к тепловому пробую межэлектродного промежутка и появлению времени задержки, которое требуется на разогрев. При сравнении рассматриваемых способов иницирования предпочтение следует отдать графитизации поверхности изолятора, так как этот метод является более технологичным и надежным, простым в исполнении, а также экономит время на подготовку наконечника, что подтверждено многочисленными экспериментами.

Другим немаловажным фактором, влияющим на процесс развития дугового разряда, является диаметр ускорительного канала электрода-ствола, поэтому с целью определения наиболее эффективного диаметра ускорительного канала (УК) с позиции минимизации энергетики процесса при сохранении массы синтезированного продукта проведены исследования при диаметрах 12, 16 и 22 мм.

Электрод-ствол в плазодинамическом методе является основным из расходных материалов. Во время процесса плазодинамического синтеза железа, эродируемое с поверхности УК, вовлекается в движение плазменного потока, после чего расплывается в объеме камеры-реактора со свободной границы сверхзвуковой плазменной струи, в результате чего происходит кристаллизация жидкофазного материала в кислородсодержащей атмосфере и образование микро- и наночастиц оксида железа. Масса синтезируемого материала в данном случае будет определяться параметрами газовой среды и, самое главное, количеством эродированного материала, зависящим от энергетических параметров процесса и геометрии ускорительного канала. Для изучения влияния энергетических параметров на продукты плазодинамического синтеза были проведены три экспериментальных серии с разными диаметрами ускорительных каналов (12, 16 и 22 мм) электродов-стволов. В каждой серии изменялось зарядное напряжение U_3 , а параметры газообразной среды (100 % O_2) и суммарная емкость конденсаторов C_3 оставались неизменными. Длина ускорительных каналов электрод-стволов $l_{\text{ук}}$ в серии экспериментов варьировалась незначительно. Исходные данные серии экспериментов, конструкционные параметры ускорительного канала (d – диаметр УК, $V_{\text{ук}}$ – объем УК) энергетические параметры (U_d – напряжение на электродах ускорителя в дуговой стадии разряда при максимальном значении тока, $I_{\text{макс}}$ – амплитуда тока дугового разряда, $P_{\text{макс}}$ – максимальная мощность, $t_{\text{имп}}$ – время импульса), массы электроэрозии электродов-стволов $\Delta m_{\text{ств}}$, а также удельные величины подведенной энергии $W/V_{\text{ук}}$ и электроэрозии $\Delta m/W$ представлены в табл. 1.

Сравнение результатов исследований при одинаковой удельной подведенной энергии (эксп. № 1.6, 2.1 и 3.1) свидетельствует о том, что уменьшение диаметра ускорительного канала электрода-ствола позволяет увеличить электроэрозионную наработку материала на ~65 % при более низких значениях подведенной энергии (№ 1.6 – 82,7 кДж, № 3.6 – 44,8 кДж).

На рис. 4 представлен график зависимости удельной электроэрозии от удельной подведенной энергии при разных диаметрах УК электродов-стволов. Из этой зависимости видно, что при уменьшении диаметра УК с 22 до 12 мм и при неизменной удельной энергии $W/V_{\text{ук}}=0,97\pm 0,02$ кДж/см³ удельная электроэрозия повышается, таким образом, использование стального электрода-ствола с внутренним диаметром $d=12$ мм позволяет увеличить наработку синтезированного материала относительно больших калибров, а также увеличить максимальную удельную подведенную энергию для еще большей наработки материала.

На рис. 5 представлены осциллограммы тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$, кривые мощности $P(t)$ и подведенной энергии $W(t)$, полученные в экспериментах с практически идентичной величиной удельной энергии $W/V_{\text{ук}}=0,97\pm 0,02$ кДж/см³ (эксп. № 1.6, 2.1 и 3.1). Данные эксперименты выбраны из соображений демонстрации преимуществ системы при работе с меньшим диаметром УК. Во всех экспериментах при указанной

величине удельной подведенной энергии удается достичь приблизительного равенства по удельной электроэрозионной наработке $\Delta m/W$ (№ 1.6 – 65,6 мг/кДж, № 2.1 – 68,8 мг/кДж и № 3.1 – 79,3 мг/кДж).

Таблица 1. Энергетические параметры серии экспериментов по выбору оптимального диаметра ускорительного канала

Table 1. Energy parameters of an experimental series on the choice of the optimal accelerating channel diameter

№ No.	d мм mm	$l_{ук}$ l_{ac}	$V_{ук}$ V_{ac}	U_3 U_c	C_3 C_c	W_3 W_c	U_d U_{ar}	$I_{макс}$ I_{max}	$P_{макс}$ P_{max}	W кДж kJ	$t_{имп}$ t_{pnl}	$\Delta m_{стb}$ Δm_b	$W/V_{ук}$ W/V_{ac}	$\Delta m/W$ мг/кДж mg/kJ
		мм mm	см ³ cm ³	кВ kV	мФ mF	кДж kJ	кВ kV	кА kA	МВт MW		мкс μs	г/г g/g	кДж/см ³ kJ/cm ³	
1.1	22	234,5	85,9	3,00	14,4	64,8	1,0	144	164	22,3	508	0,4	0,26	18,0
1.2		234,5	81,2	3,25	14,4	76,1	1,2	162	191	44,6	492	1,0	0,55	28,4
1.3		234,2	85,8	3,50	14,4	88,2	1,2	174	220	49,6	499	1,8	0,58	36,3
1.4		234,5	89,1	3,75	14,4	101,3	1,2	189	243	53,8	477	2,1	0,60	39,0
1.5		239,0	89,2	4,00	14,4	115,2	1,3	201	266	60,2	469	2,6	0,67	43,2
1.6		239,0	88,4	4,00	19,2	153,6	1,4	228	329	82,7	590	6,0	0,99	65,6
2.1	16	216,2	44,0	2,80	14,4	56,5	0,9	113	101	24,2	448	2,7	0,98	68,8
2.2		213,8	44,6	3,00	14,4	64,8	1,0	167	190	43,0	423	4,0	1,07	73,7
2.3		208,7	43,6	3,00	14,4	64,8	1,0	193	201	47,8	433	4,3	1,18	81,3
2.4		216,3	45,7	3,20	14,4	73,7	1,1	191	213	51,6	434	6,2	1,27	103,1
2.5		205,7	41,9	3,30	14,4	78,4	1,1	211	252	57,9	452	8,2	1,48	116,7
2.6		210,5	42,3	3,50	14,4	88,2	1,3	175	265	61,8	432	9,0	1,58	124,7
3.1	12	180,0	20,4	1,90	14,4	26,0	0,8	106	82	19,3	413	1,5	0,95	79,3
3.2		180,0	20,4	2,10	14,4	31,8	0,9	122	99	23,5	413	2,5	1,15	104,5
3.3		180,0	20,4	2,30	14,4	38,1	0,9	142	121	27,6	404	3,6	1,36	130,1
3.4		180,0	20,4	2,50	14,4	45,0	0,9	155	137	31,9	404	4,5	1,57	147,8
3.5		180,0	20,4	2,70	14,4	52,5	1,1	167	185	39,7	424	8,3	2,05	219,3
3.6		180,0	20,4	2,90	14,4	60,6	1,1	180	192	44,8	409	9,9	2,20	240,6

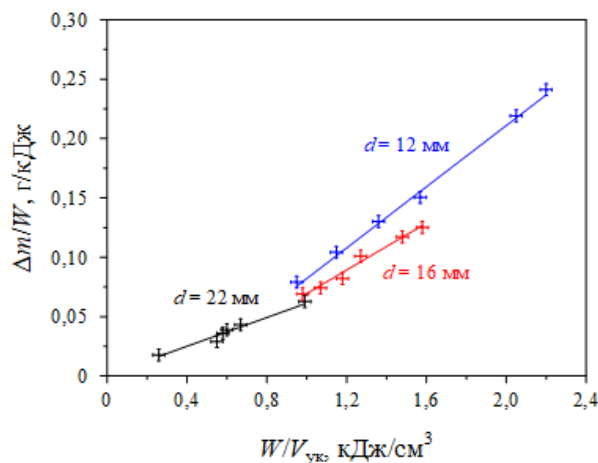


Рис. 4. График зависимости удельной электроэрозии $\Delta m/W$ от удельной подведенной энергии $W/V_{ук}$ при разных диаметрах ускорительных каналов электродов-стволов

Fig. 4. Graph of the dependence of specific electric erosion $\Delta m/W$ on the specific supplied energy W/V_{ac} at different acceleration channel diameters of barrel electrodes

Однако ключевым отличием является то, что достижение таких удельных показателей осуществляется при разных энергетических параметрах процесса. Так, из сравнения осциллограмм наглядно видно значительное уменьшение амплитуды тока дугового разряда в 2 раза, мощности дугового разряда в 4 раза и величины подведенной энергии в 5 раз (эксп. № 1.6 и 3.1). Согласно закону Ампера, представленному в формуле (3), уменьшение тока приводит к снижению электродинамических усилий на все узлы системы, что, несомненно, является положительным моментом,

поскольку позволяет продлить ресурс работы всех элементов конструкции.

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot L}{r}, \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м; I_1, I_2 – величины токов в проводниках (шинах), А; L – длина проводников, м; r – расстояние между проводниками (шинами), м.

Таким образом, уменьшение диаметра электрода-ствола в рассматриваемой системе является целесообразным как с позиции формирования дугового разряда с минимальным воздействием на элементы разрядного контура, так и с позиции повышения производительности по получению дисперсных материалов при меньших энергетических затратах.

Геометрические параметры канала формирования плазменной структуры также играют важную роль в процессе инициирования дугового разряда, поскольку задают конфигурацию плазменной структуры и, соответственно, влияют на её ускорение и энергетические характеристики процесса. Для оценки влияния геометрии КФС на электрические характеристики дугового разряда проведена серия экспериментов с изменением длины канала формирования плазменной структуры от 5,5 до 11,5 мм (рис. 6). Диаметр во всех случаях оставался неизменным, что обусловлено технологическими особенностями изготовления наконечника центрального электрода. Зарядное напряжение ($U_3=2,5$ кВ) и зарядная емкость накопителя энергии ($C_3=14,4$ мФ) были неизменны во всей серии экспериментов. За счет регистрации во время процесса синтеза значений тока дугового разряда $i(t)$ и напряжения на электродах $u(t)$ построены кривые $i(t)$ и $u(t)$, а также кривые мощности $p(t)$ и подведенной энергии $w(t)$, представленные на рис. 7.

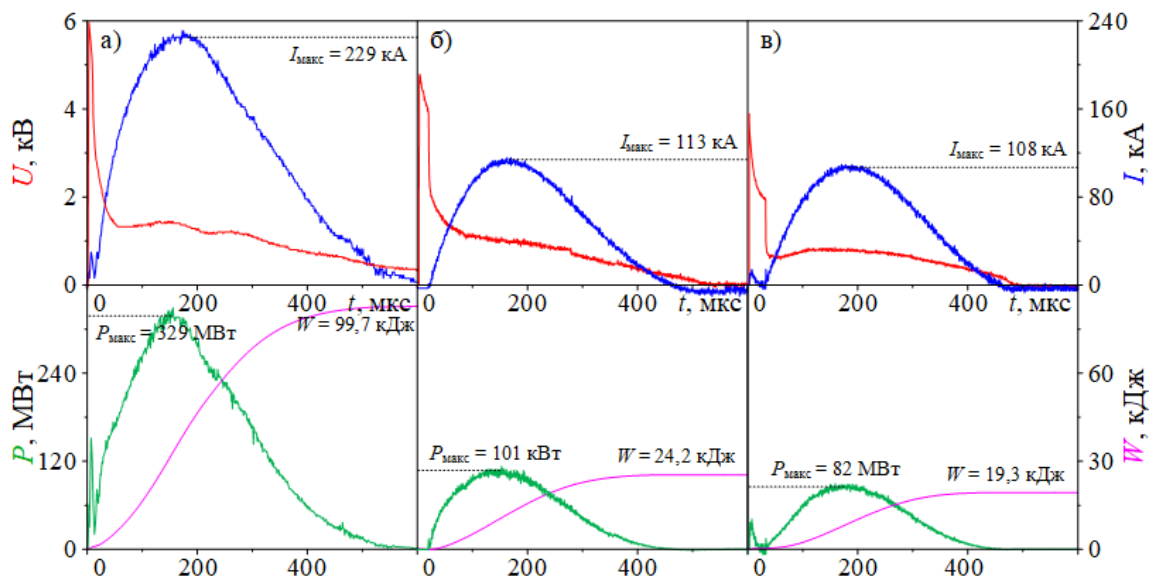


Рис. 5. Осциллограммы $I(t)$, $U(t)$, $P(t)$ и $W(t)$ процесса плазодинамического синтеза при удельной энергии $W/V_{\text{ж}} = 0,97 \pm 0,02$ кДж/см³ (а – эксн. № 1.6, б – эксн. № 2.1, в – эксн. № 3.1)

Fig. 5. Oscillograms of $I(t)$, $U(t)$, $P(t)$ and $W(t)$ of the plasma dynamic synthesis at the specific energy $W/V_{\text{ac}} = 0,97 \pm 0,02$ kJ/cm³ (а – experiment № 1.6, б – experiment № 2.1, в – experiment № 3.1)

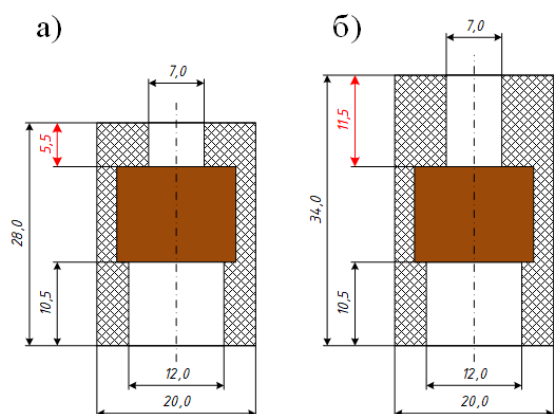


Рис. 6. Графическое изображение конструкции наконечника центрального электрода с разной длиной канала формирования плазменной структуры (мм): а) 5,5; б) 11,5

Fig. 6. Graphical representation of the central electrode tip design with different plasma formation zone lengths (mm): а) 5,5; б) 11,5

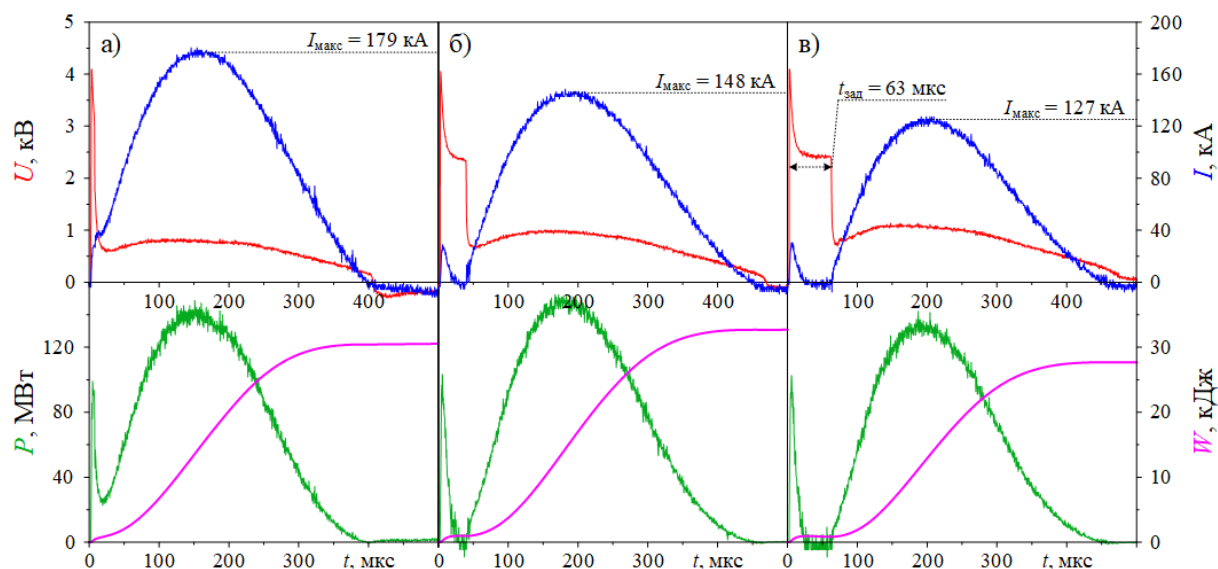


Рис. 7. Осциллограммы $I(t)$, $U(t)$, $P(t)$ и $W(t)$ процесса плазодинамического синтеза при разных длинах канала формирования плазменной структуры (мм): а) 5,5; б) 9,5; в) 11,5

Fig. 7. Oscillograms of $I(t)$, $U(t)$, $P(t)$, and $W(t)$ of the plasma dynamic synthesis at different lengths of the plasma formation zone (mm): а) 5,5; б) 9,5; в) 11,5

Основные энергетические параметры серии экспериментов представлены в табл. 2. Из представленных данных видно, что увеличение длины КФПС приводит к росту длительности времени задержки, что в основном обусловлено повышением величины сопротивления разрушаемой углеродной перемычки от 4,4 до 9,0 мОм. Помимо отмеченных особенностей характера осциллограмм, увеличение длины канала формирования плазменной структуры также сказыва-

ется на уменьшении амплитуды тока дугового разряда и приводит к увеличению напряжения дуги. Главным условием ограничения $I_{\text{макс}}$ дугового разряда является уменьшение разности напряжения источника питания U_3 и противоположно направленного падения напряжения на дуге U_d , что отображено в выражении (4):

$$U_3 - U_d = \Delta U \rightarrow 0. \quad (4)$$

Таблица 2. Энергетические параметры серии экспериментов по выбору оптимальной длины канала формирования плазменной структуры

Table 2. Energy parameters of an experimental series on the choice of the optimal length of plasma formation zone

$l_{\text{КФПС}}/l_{\text{PFZ}}$ мм/мм	U_3/U_c кВ/кВ	C_3/U_c мФ/мФ	U_d/U_{ar} кВ/кВ	$I_{\text{макс}}/I_{\text{max}}$ кА	$P_{\text{макс}}/P_{\text{max}}$ МВт/МВт	$t_{\text{имп}}/t_{\text{pul}}$ Мкс/μs	W кДж/кДж	η %	$t_{\text{зар}}/t_{\text{del}}$ Мкс/μs	R_d/R_{ar} мОм/мΩ
5,5	2,5	14,4	0,76	179	139	384	30,2	67,1	8	4,4
7,5			0,90	165	148	396	31,7	70,4	13	5,7
8,5			0,91	156	144	404	31,9	70,9	27	6,0
9,5			0,97	148	144	409	32,6	72,4	39	6,8
10,5			1,02	143	150	414	32,9	73,1	35	7,7
11,0			1,09	132	146	420	31,4	69,7	31	8,3
11,5			1,02	127	128	383	27,7	59,8	63	9,0

Прекращение нарастания рабочего тока происходит в момент времени, когда $U_d=U_3$. Поэтому рост $I_{\text{КФПС}}$, обеспечивающий повышение U_d , в котором определяющую долю составляет падение напряжения на участке КФПС, приводит к постоянному снижению $I_{\text{макс}}$. Однако на фоне монотонно растущих R_d , U_d и снижающегося $I_{\text{макс}}$, наблюдается появление максимума мощности разряда $P_{\text{макс}}$ и выделившейся в УК энергии W при длине КФПС 9,5–10,5 мм. Дальнейшее увеличение длины КФПС закономерно для данных условий сопровождается снижением мощности и энергии, выделяющейся в УК, и переходом процесса в «коммутационный» режим, близкий к режиму работ токоограничивающего выключателя. Поэтому часть накопленной энергии остается в ЕНЭ и не используется, о чем свидетельствует положительное значение остаточного напряжения (рис. 7, в). Наиболее очевидно это иллюстрирует кривая зависимости КПД преобразования накопленной энергии в ЕНЭ энергии W_3 в подведенную энергию W , выделившуюся в УК (рис. 8). Зависимость коэффициента полезного действия экспериментальной установки от длины канала формирования плазменной структуры КПД установки считалось по формуле (5):

$$\eta = \frac{W}{W_3} = \frac{W}{\frac{C_3 \cdot U_3^2}{2}} = \frac{2 \cdot W}{C_3 \cdot U_3^2}, \quad (5)$$

где W_3 , C_3 , U_3 – зарядная энергия (накопленная), емкость накопителя энергии, напряжение соответственно.

Видно, что КПД практически линейно растет при увеличении КФПС от 5,5 до 10,5 мм и достигает значения $\eta \approx 73\%$. Это обеспечивает максимальную электроэрозионную наработку материала, выносимого из УК с наибольшей скоростью плазменной струи при минимально возможном уровне $I_{\text{макс}}$. Однако при используемой конструкции КМПУ с $l_{\text{КФПС}}=10,5$ мм возрастает вероятность разрушения КФПС, особенно при повторных использованиях наконечника цен-

трального электрода. Таким образом, с целью исключения отказов или нестабильной работы КМПУ выбран наконечник с $l_{\text{КФПС}}=9,5$ мм, дающий некоторое снижение η до $\sim 72\%$.

Только за счет такого изменения конструкции наконечника центрального электрода существует возможность уменьшить максимальный ток на 29%. Однако увеличение длины КФПС при использовании графитизации в качестве способа иницирования дугового разряда приводит к возрастанию времени задержки, что может привести к закрытию игнитрона без разряда конденсаторной батареи. Помимо отмеченных конструктивных ограничений, целесообразным представляется режим работы с максимальным КПД преобразования накопленной энергии в подведенную.

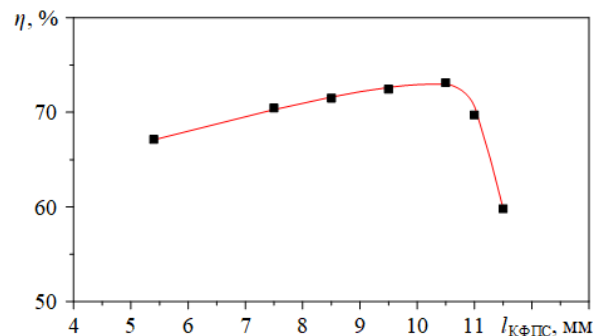


Рис. 8. Зависимость коэффициента полезного действия преобразования энергии в экспериментальной установке плазодинамического синтеза от длины канала формирования плазменной структуры

Fig. 8. Dependence of the energy conversion efficiency in the experimental plasma dynamic synthesis unit on the length of the plasma formation zone

Заключение

Рассмотрены два способа иницирования дугового разряда с использованием металлических проволо-

чек и графитизации. Установлено, что они не влияют на энергетические параметры процесса плазмодинамического синтеза, однако применение графитизации выглядит предпочтительней в силу технологичности такого подхода, который обеспечивает простоту подготовки ускорителя и надежность его работы. Установлена возможность снижения амплитуды тока дугового разряда на 29 % при увеличении длины канала формирования плазменной структуры с 5,5 до 11,5 мм, что обеспечивает уменьшение электродинамических нагрузок на все узлы системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Laroussi M. Cold plasma in medicine and healthcare: The new frontier in low temperature plasma applications // *Frontiers in Physics*. – 2020. – V. 8. – Article no. 74.
2. Power efficiency estimation of an inductive plasma generator using propellant mixtures of oxygen, carbon-dioxide and argon / R. Georg, A.R. Chadwick, B.B. Dally, G. Herdrich // *Acta Astronautica*. – 2021. – V. 179. – P. 536–545.
3. Local pressure calibration method of inductively coupled plasma generator based on laser Thomson scattering measurement / J. Sun, Y.Q. Liu, Y. Zheng, J. Shi, Y. Li, Y. Zhao, X. Zhang, H. Cai, X. Zhu, X. Sun, Z. Chao, H. Yin, H. Ding // *Scientific Reports*. – 2022. – V. 12. – № 1. – P. 1–9.
4. The assessment of carbon dioxide dissociation using a single-mode microwave plasma generator / G. Mogildea, M. Mogildea, C. Popa, G. Chiritoi // *Molecules*. – 2020. – V. 25. – № 7. – Article no. 1558.
5. Sanito R.C., You S.J., Wang Y.F. Application of plasma technology for treating e-waste: A review // *Journal of Environmental Management*. – 2021. – T. 288. – Article no. 112380.
6. Research status of engine emissions treated by nonthermal plasma / Z. Zhang, Z. Sui, C. Song, W. Lu, X. Fan, H. Li, P. Wang // *Environmental Technology & Innovation*. – 2023. – Article no. 103007.
7. Proch J., Niedzielski P. Recent applications of continuous flow chemical vapor and hydride generation (CVG, HG) coupled to plasma-based optical emission spectrometry (ICP OES, MIP OES) // *Talanta*. – 2022. – V. 243. – Article no. 123372.
8. Microwave plasma torch mass spectrometry for some Rare Earth Elements / L. Yuan, X. Zhou, Y. Cao, N. Yan, L. Peng, X. Lai, H. Tao, L. Li, T. Jiang, Z. Zhu // *Arabian Journal of Chemistry*. – 2022. – V. 15. – № 12. – Article no. 104379.
9. Sari A. Characterization of photoneutron fluxes emitted by electron accelerators in the 4–20 MeV range using Monte Carlo codes: a critical review // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2023. – V. 191. – Article no. 110506.
10. Undulator design for a laser-plasma-based free-electron-laser / A. Ghaith, M.-E. Couprie, D. Oumbarek-Espinos, I.A. Andriyash, F. Massimo, J.A. Clarke, M. Courthold, V. Bayliss, A. Bernhard, M. Trunk, M. Valléau, O. Marcouillé, A. Chancé, S. Licciardi, V. Malka, F. Nguyen, G. Dattoli // *Physics reports*. – 2021. – V. 937. – P. 1–73.
11. Subramaniam V., Panneerchelvam P., Raja L.L. Modeling of thermalization phenomena in coaxial plasma accelerators // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2018. – V. 51. – № 21. – Article no. 215203.
12. Measurement of plasma stream velocity in a pulsed plasma accelerator / N. Talukdar, A. Ahmed, S. Borthakur, N.K. Neog, T.K. Borthakur, J. Ghosh // *Physics of Plasmas*. – 2019. – V. 26. – № 6. – Article no. 062711.
13. Current sheet characteristics of a parallel-plate electromagnetic plasma accelerator operated in gas-prefilled mode / S. Liu, Y. Huang, H. Guo, T. Lin, D. Huang, L. Yang // *Physics of Plasmas*. – 2018. – V. 25. – № 5. – Article no. 053506.
14. Beemer H.D., McNab I.R. Launch parameters of a lunar ice payload traveling via electromagnetic mass accelerator // *Acta Astronautica*. – 2023. – V. 207. – P. 24–32.
15. Tanaka M., Murakami M. Relativistic and electromagnetic molecular dynamics simulations for a carbon-gold nanotube accelerator // *Computer Physics Communications*. – 2019. – V. 241. – P. 56–63.
16. Optical emission spectroscopy investigation of the current sheet in a small-bore parallel-plate electromagnetic plasma accelerator / S. Liu, Y. Huang, Y. Zhang, W. Zhan, M. Yu, L. Yang // *Physics of Plasmas*. – 2018. – V. 25. – № 11. – Article no. 113505.
17. Subramaniam V., Raja L.L. A plasma-vacuum interface tracking algorithm for magnetohydrodynamic simulations of coaxial plasma accelerators // *Journal of Computational Physics*. – 2018. – V. 366. – P. 207–225.
18. Multi-pulse operation of coaxial magnetic plasma accelerator for dynamic synthesis of iron oxide powder / A.A. Sivkov, I.I. Shanenkov, A.S. Ivashutenko, M.I. Gukov, L. Li, G. Li, V. Khan // *Russian Physics Journal*. – 2019. – V. 62. – № 6. – P. 1001–1008.
19. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Никитин Д.С. Прямой динамический синтез нанодисперсных фаз оксидов титана при распылении электроразрядной плазмы титана в воздушную атмосферу // *Письма в Журнал технической физики*. – 2016. – Т. 42. – № 23. – С. 21–27.
20. Влияние энергетики плазмодинамического синтеза в системе Si-C на фазовый состав и дисперсность продукта / А.А. Сивков, Д.С. Никитин, А.Я. Пак, И.А. Рахматуллин // *Российские нанотехнологии*. – 2015. – Т. 10. – № 1–2. – С. 34–39.
21. Optimization of plasma dynamic synthesis of ultradispersed silicon carbide and obtaining SPS ceramics on its basis / A. Sivkov, D. Nikitin, I. Shanenkov, A. Ivashutenko, I. Rakhmatullin, A. Nassirybayev // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2019. – V. 79. – P. 123–130.
22. Morozov V., Kats V. Forming and propagation of the cracks initiated with electric explosion of wires in polymer materials // *Procedia Structural Integrity*. – 2022. – V. 39. – P. 432–440.
23. Copper ferrite/copper oxides (I, II) nanoparticles synthesized by electric explosion of wires for high performance photocatalytic and antibacterial applications / E.A. Glazkova, O.V. Bakina, N.G. Rodkevich, A.A. Mosunov, E.A. Vornakova, V.R. Chzhou, M.I. Lerner // *Materials Science and Engineering: B*. – 2022. – V. 283. – Article no. 115845.
24. Influences of the burden on the fracture behaviour of rocks by using electric explosion of wires / J. Peng, X. Wang, F. Zhang, X. Yang, J. Gao // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2022. – V. 118. – Article no. 103270.
25. Control of cluster coalescence during formation of bimetallic nanoparticles and nanoalloys obtained via electric explosion of two wires / K.V. Suliz, A.Y. Kolosov, V.S. Myasnichenko, N.I. Nepsha, N.Y. Sdobnyakov, A.V. Pervikov // *Advanced Powder Technology*. – 2022. – V. 33. – № 3. – Article no. 103518.
26. Interface detection from laser drilling of air plasma-sprayed thermal barrier coatings by laser-induced breakdown spectroscopy / W. Cheng, Y. Liu, W. Wang, X. Zhao, D. Peng // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2021. – V. 137. – Article no. 106351.
27. Dynamic breakdown of passive films on stainless steel during in situ thermal oxidation / Y. Chen, P. Tang, S. Qiao, S. Liu, X. Yang, A. Li // *Corrosion Science*. – 2022. – V. 209. – Article no. 110799.
28. Effects of frequency and thermal conductivity on dielectric breakdown characteristics of epoxy/cellulose/BN composites fabricated by ice-templated method / T. Yao, K. Chen, T. Niu,

Экспериментально определена оптимальная длина канала формирования плазменной структуры 9,5 мм, способствующая получению высокого КПД преобразования накопленной энергии в подведенную и надежности работы системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госзадания № FEWZ-2021-0014 (Научно-технические основы и прикладные решения комплексной энерготеплотехнологической переработки биомассы для обеспечения экологически чистых технологий в энергетике и металлургии).

- Y. Yang // Composites Science and Technology. – 2021. – V. 213. – Article no. 108945.
29. Pal S., Reddy K.V., Deng C. Improving thermal stability and Hall-Petch breakdown relationship in nanocrystalline Cu: a molecular dynamics simulation study // Materials Letters. – 2022. – V. 324. – Article no. 132821.
30. K uchler A. High voltage engineering fundamentals – technology – applications. – Berlin: Springer Vieweg, 2018. – 650 p.
31. Wadhwa C.L. High voltage engineering. – New Delhi: New Age International, 2007. – 312 p.
32. Франц В. Пробой диэлектриков. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. – 208 с.

Поступила: 17.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 10.05.2023 г.

Информация об авторах

Циммерман А.И., лаборант-исследователь лаборатории ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы Института экологической и сельскохозяйственной биологии (Х-БИО) Тюменского государственного университета; аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Шаненков И.И., кандидат технических наук, заведующий лабораторией ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы Института экологической и сельскохозяйственной биологии (Х-БИО) Тюменского государственного университета; младший научный сотрудник Лаборатории перспективных материалов энергетической отрасли Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Насырбаев А.Р., инженер организационного отдела Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Никитин Д.С., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Сивков А.А., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 533.9.03

INFLUENCE OF CONFIGURATION OF THE ELECTRODE SYSTEM OF A COAXIAL MAGNETOPLASMA ACCELERATOR ON ARC DISCHARGE FORMATION AND DEVELOPMENT

Alexander I. Tsimmerman^{1,2},
alextsimmer@yandex.ru

Ivan I. Shanenkov^{1,2},
i.i.shanenkov@utmn.ru

Artur R. Nassyrbayev²,
arn1@tpu.ru

Dmitry S. Nikitin²,
nikitindmsr@yandex.ru

Alexander A. Sivkov²,
sivkov@tpu.ru

¹ Tyumen State University,
6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is explained by a wide range of practical areas, where various plasma generators can be used, including analytical devices, technological installations, tokamaks, ion and plasma engines, satellites, laser technology, as well as by the possibility of applying them for both producing coatings on various surfaces and synthesizing fine and nanopowders.

The main aim of the research is to determine the best way to initiate an arc discharge in the acceleration channel of the coaxial magneto-plasma accelerator, to estimate the effect of the plasma formation zone configuration on the electrodynamic loads of the accelerator, and to calculate the efficiency of conversion of stored energy to supplied one.

Objects: coaxial magnetoplasma accelerator, arc discharge initiation, central electrode, electrode-barrel, plasma formation zone.

Methods: experiment, plasma dynamic synthesis, measurement and registration of pulsed currents and voltages, electrical erosion measurement by means of weighing the eroding electrode-bore, high-speed photoregistration of the plasma jet.

Results. Two methods of arc discharge initiation using metal wires and graphitization were considered. It is established that they do not affect the energy parameters of the plasma dynamic synthesis, but the graphitization looks preferable due to the greater processability of the procedure that provides easy accelerator preparation and reliability of its operation. The possibility of reducing the arc discharge current amplitude by 29 % with increasing the plasma formation zone length from 5,5 to 11,5 mm was established that results in reducing electrodynamic loads on all system nodes. The optimal plasma formation zone length of 9,5 mm was determined to provide obtaining a high efficiency of conversion of stored energy into supplied energy and reliability of the system operation.

Key words:

Plasma dynamic synthesis, coaxial magnetoplasma accelerator, arc discharge, pulsed electric discharge plasma, electric erosion.

The research was financially supported by the State assignment no. FEWZ-2021-0014 (Scientific and technical bases and applied solutions of complex energy heat technology processing of biomass for providing environmentally friendly techniques in power engineering and metallurgy).

REFERENCES

- Laroussi M. Cold plasma in medicine and healthcare: The new frontier in low temperature plasma applications. *Frontiers in Physics*, 2020, vol. 8, article no. 74.
- Georg R., Chadwick A.R., Dally B.B., Herdrich G. Power efficiency estimation of an inductive plasma generator using propellant mixtures of oxygen, carbon-dioxide and argon. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 179, pp. 536–545.
- Sun J., Liu Y. Q., Zheng Y., Shi J., Li Y., Zhao Y., Zhang X., Cai H., Zhu X., Sun X., Chao Z., Yin H., Ding H. Local pressure calibration method of inductively coupled plasma generator based on laser Thomson scattering measurement. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 1–9.
- Mogildea G., Mogildea M., Popa C., Chiritoi G. The assessment of carbon dioxide dissociation using a single-mode microwave plasma generator. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 7, article no. 1558.
- Sanito R.C., You S.J., Wang Y.F. Application of plasma technology for treating e-waste: a review. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 288, article no. 112380.
- Zhang Z., Sui Z., Song C., Lu W., Fan X., Li H., Wang P. Research status of engine emissions treated by nonthermal plasma. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, article no. 103007.
- Proch J., Niedzielski P. Recent applications of continuous flow chemical vapor and hydride generation (CVG, HG) coupled to plasma-based optical emission spectrometry (ICP OES, MIP OES). *Talanta*, 2022, vol. 243, article no. 123372.
- Yuan L., Zhou X., Cao Y., Yan N., Peng L., Lai X., Tao H., Li L., Jiang T., Zhu, Z. Microwave Plasma Torch Mass Spectrometry for some Rare Earth Elements. *Arabian Journal of Chemistry*, 2022, vol. 15, no. 12, article no. 104379.
- Sari A. Characterization of photoneutron fluxes emitted by electron accelerators in the 4-20 MeV range using Monte Carlo codes: a critical review. *Applied Radiation and Isotopes*, 2023, vol. 191, article no. 110506.
- Ghaith A., Couprie M.-E., Oumbarek-Espinos D., Andriyash I.A., Massimo F., Clarke J.A., Courthold M., Bayliss V., Bernhard A., Trunk M., Valléau M., Marcouillé O., Chancé A., Licciardi S., Malka V., Nguyen F., Dattoli G. Undulator design for a laser-

- plasma-based free-electron-laser. *Physics reports*, 2021, vol. 937, pp. 1–73.
11. Subramaniam V., Panneerchelvam P., Raja L.L. Modeling of thermalization phenomena in coaxial plasma accelerators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, vol. 51, no. 21, article no. 215203.
 12. Talukdar N., Ahmed A., Borthakur S., Neog N. K., Borthakur T.K., Ghosh J. Measurement of plasma stream velocity in a pulsed plasma accelerator. *Physics of Plasmas*, 2019, vol. 26, no. 6, article no. 062711.
 13. Liu S., Huang Y., Guo H., Lin T., Huang D., Yang L. Current sheet characteristics of a parallel-plate electromagnetic plasma accelerator operated in gas-prefilled mode. *Physics of Plasmas*, 2018, vol. 25, no. 5, article no. 053506.
 14. Beemer H.D., McNab I.R. Launch parameters of a lunar ice payload traveling via electromagnetic mass accelerator. *Acta Astronautica*, 2023, vol. 207, pp. 24–32.
 15. Tanaka M., Murakami M. Relativistic and electromagnetic molecular dynamics simulations for a carbon-gold nanotube accelerator. *Computer Physics Communications*, 2019, vol. 241, pp. 56–63.
 16. Liu S., Huang Y., Zhang Y., Zhan W., Yu M., Yang L. Optical emission spectroscopy investigation of the current sheet in a small-bore parallel-plate electromagnetic plasma accelerator. *Physics of Plasmas*, 2018, vol. 25, no. 11, article no. 113505.
 17. Subramaniam V., Raja L.L. A plasma-vacuum interface tracking algorithm for magnetohydrodynamic simulations of coaxial plasma accelerators. *Journal of Computational Physics*, 2018, vol. 366, pp. 207–225.
 18. Sivkov A.A. Multi-pulse operation of coaxial magnetic plasma accelerator for dynamic synthesis of iron oxide powder. *Russian Physics Journal*, 2019, vol. 62, no. 6, pp. 1001–1008.
 19. Sivkov A.A., Gerasimov D.Y., Nikitin D.S. Direct dynamic synthesis of nanodispersed phases of titanium oxides upon sputtering of electrodeless titanium plasma into an air atmosphere. *Technical Physics Letters*, 2017, vol. 43, pp. 16–19.
 20. Sivkov A.A., Nikitin D.S., Pak A.Y., Rakhmatullin I.A. Influence of plasmodynamic synthesis energy in Si-C system on the product phase composition and dispersion. *Nanotechnologies in Russia*, 2015, vol. 10, no. 1–2, pp. 34–41.
 21. Sivkov A., Nikitin D., Shanenkov I., Ivashutenko A., Rakhmatullin I., Nassyrbayev A. Optimization of plasma dynamic synthesis of ultradispersed silicon carbide and obtaining SPS ceramics on its basis. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, vol. 79, pp. 123–130.
 22. Morozov V., Kats V. Forming and propagation of the cracks initiated with electric explosion of wires in polymer materials. *Procedia Structural Integrity*, 2022, vol. 39, pp. 432–440.
 23. Glazkova E.A., Bakina O.V., Rodkevich N.G., Mosunov A.A., Vornakova E.A., Chzhou V.R., Lerner M.I. Copper ferrite/copper oxides (I, II) nanoparticles synthesized by electric explosion of wires for high performance photocatalytic and antibacterial applications. *Materials Science and Engineering: B*, 2022, vol. 283, article no. 115845.
 24. Peng J., Wang X., Zhang F., Yang X., Gao J. Influences of the burden on the fracture behaviour of rocks by using electric explosion of wires. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, vol. 118, article no. 103270.
 25. Suliz K.V., Kolosov A.Y., Myasnichenko V.S., Nepsha N.I., Sdobnyakov N.Y., Pervikov A.V. Control of cluster coalescence during formation of bimetallic nanoparticles and nanoalloys obtained via electric explosion of two wires. *Advanced Powder Technology*, 2022, vol. 33, no. 3, article no. 103518.
 26. Cheng W., Liu Y., Wang W., Zhao X., Peng D. Interface detection from laser drilling of air plasma-sprayed thermal barrier coatings by laser-induced breakdown spectroscopy. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, vol. 137, article no. 106351.
 27. Chen Y., Tang P., Qiao S., Liu S., Yang X., Li A. Dynamic breakdown of passive films on stainless steel during in situ thermal oxidation. *Corrosion Science*, 2022, vol. 209, article no. 110799.
 28. Yao T., Chen K., Niu T., Yang Y. Effects of frequency and thermal conductivity on dielectric breakdown characteristics of epoxy/cellulose/BN composites fabricated by ice-templated method. *Composites Science and Technology*, 2021, vol. 213, article no. 108945.
 29. Pal S., Reddy K.V., Deng C. Improving thermal stability and Hall-Petch breakdown relationship in nanocrystalline Cu: a molecular dynamics simulation study. *Materials Letters*, 2022, vol. 324, article no. 132821.
 30. Küchler A. *High voltage engineering fundamentals – technology – applications*. Berlin, Springer Vieweg, 2018. 650 p.
 31. Wadhwa C.L. *High voltage engineering*. New Delhi, New Age International, 2007. 312 p.
 32. Frants V. *Proboy dielektrikov* [Dielectric samples]. Moscow, Izdatelstvo inostrannoy literatury Publ., 1961. 208 p.

Received: 17 April 2023.
Reviewed: 10 May 2023.

Information about the authors

Alexander I. Tsimmerman, laboratory assistant researcher, Tyumen State University; postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Ivan I. Shanenkov, Cand. Sc., head of the laboratory, Tyumen State University; junior researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Artur R. Nassyrbayev, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dmitry S. Nikitin, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander A. Sivkov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.