

УДК 537.523.5

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТАНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ГИБРИДНОМ КООКСИАЛЬНОМ МАГНИТОПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ

Д. Ю. Герасимов, А. А. Сивков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
E-mails: gerasimov@tpu.ru, SivkovAA@mail.ru

Показано, что в гибридном коаксиальном магнитоплазменном ускорителе при длине ствола 350 мм и калибре 23 мм скорость метания и эффективность преобразования энергии увеличиваются с уменьшением длины заполненного газогенерирующим веществом канала формирования плазменной структуры с 17 до 9 мм. Установлено, что в качестве газогенерирующего вещества целесообразно использовать парафин, который оказывает менее значительное деионизирующее влияние на сильноточный дуговой разряд и тем самым вызывает менее существенное уменьшение силы разрядного тока и увеличение кондукционной и индукционной электродинамических сил.

Ключевые слова: гибридный коаксиальный магнитоплазменный ускоритель, метание твердых тел, канал формирования плазменной структуры, газогенерирующее вещество.

DOI: 10.15372/PMTF20180102

В работе [1] изучены характеристики гибридного коаксиального магнитоплазменного ускорителя (ГКМПУ), предназначенного для преобразования электромагнитной энергии в кинетическую энергию метаемых тел (МТ) массой до 100 г при силе тока электропитания до 250 кА. Для преобразования энергии в ГКМПУ одновременно используются электро-взрывной и электротермический способы, а также принципы кондукционной и индукционной электродинамики. Электротермический механизм основан на термическом разложении водородонасыщенного газогенерирующего вещества (ГГВ) под действием сильноточного дугового разряда. В рассматриваемом ускорителе [2] ГГВ размещается в канале формирования плазменной структуры (КФПС). Установлено, что в качестве ГГВ могут быть использованы доступные и безопасные в нормальных условиях вещества, такие как парафин, технический вазелин и трансформаторное масло (с применением абсорбирующего материала) [3]. Эти вещества содержат водород, который выделяется при термическом разложении, нагревается плазмой разряда и совершает работу в основном на начальном этапе ускорения МТ. Установлено, что концентрация водорода, образующегося при разложении парафина, составляет 1,65 г/л, при разложении вазелина — 1,59 г/л, при разложении трансформаторного масла — 1,47 г/л. Таким образом, исследование влияния типа ГГВ и геометрии КФПС ускорителя на эффективность преобразования энергии в ГКМПУ является актуальной задачей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 15-19-00049).

© Герасимов Д. Ю., Сивков А. А., 2018

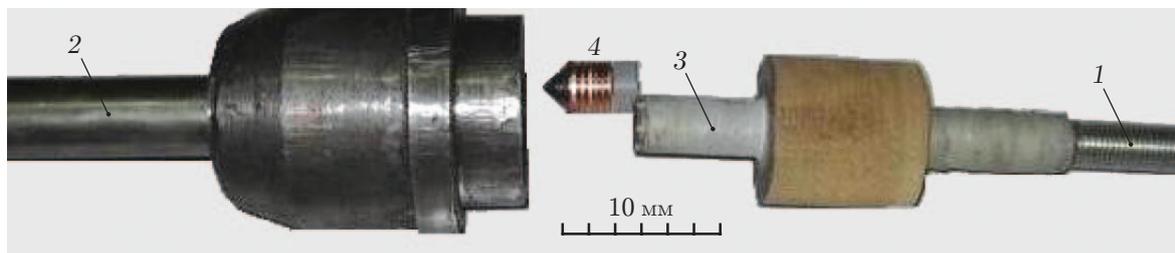


Рис. 1. Основные элементы ГКМПУ:

1 — центральный электрод, 2 — ствол, 3 — изолятор центрального электрода, 4 — метаемое тело с obtуратором

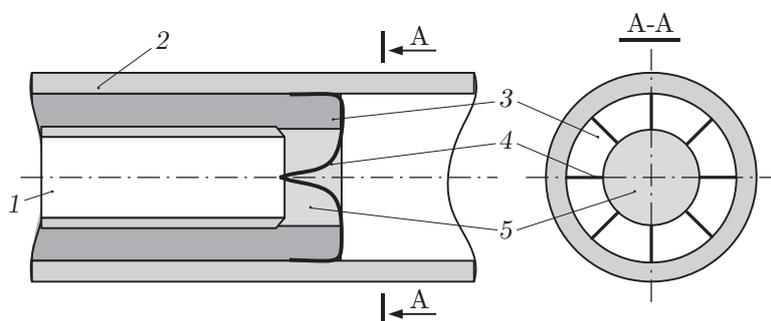


Рис. 2. Схема узла формирования плазменной структуры ГКМПУ:

1 — центральный электрод, 2 — ствол, 3 — изолятор центрального электрода, 4 — электровзрывающиеся проводники, 5 — канал формирования плазменной структуры, заполненный газогенерирующим веществом

Устройство и принцип действия ускорителя описаны в работе [4]. Экспериментальные исследования проведены при следующих условиях. Емкость конденсаторной батареи накопителя энергии равна $C = 38,4$ мФ, зарядное напряжение $U_3 = 3,5$ кВ, энергия накопителя $W_C = 235$ кДж. Стволы длиной $l_C = 350$ мм и калибром $d_C = 23$ мм изготавливались из нержавеющей стали (рис. 1), центральный электрод ускорителя — из стали марки Ст.3, изолятор — из стеклопластика. КФПС имел форму цилиндра, масса ГГВ составляла 1,3 г. В качестве ГГВ использовались технический вазелин и парафин. МТ изготавливались из стали, obtураторы — из меди (см. рис. 1). Для поддержания давления газов использовался донный obtуратор, который изготавливался из полиэтилена высокого давления. В экспериментах использовались МТ массой $(54,3 \pm 1,4)$ г. С целью изучения влияния геометрии КФПС проведены выстрелы при длине канала, равной 17, 12, 9 мм, и неизменном его объеме, а следовательно, и массе ГГВ. Сильноточный дуговой разряд инициировался с помощью восьми электровзрывающихся проводников (ЭВП), которые изготавливались из медной проволоки диаметром 0,5 мм. В экспериментах с помощью трансформатора Роговского и омического делителя напряжения регистрировались сила разрядного тока $I(t)$ и напряжение $U(t)$ на электродах ГКМПУ соответственно. Подведенная к ускорителю энергия W определялась путем интегрирования кривой мощности разряда. Для регистрации скорости МТ использовались четыре рамы-мишени и проводилась высокоскоростная фотосъемка камерой Photron FASTCAM.

Основные элементы узла формирования плазменной структуры показаны на рис. 2. Согласно [5] вершина центрального электрода соединена с внутренней цилиндрической поверхностью ствола в его начале пучком ЭВП. Данная конструкция плазмообразующего узла обеспечивает формирование плазменной структуры сильноточного дугового разряда типа Z-пинч с круговой плазменной перемычкой.

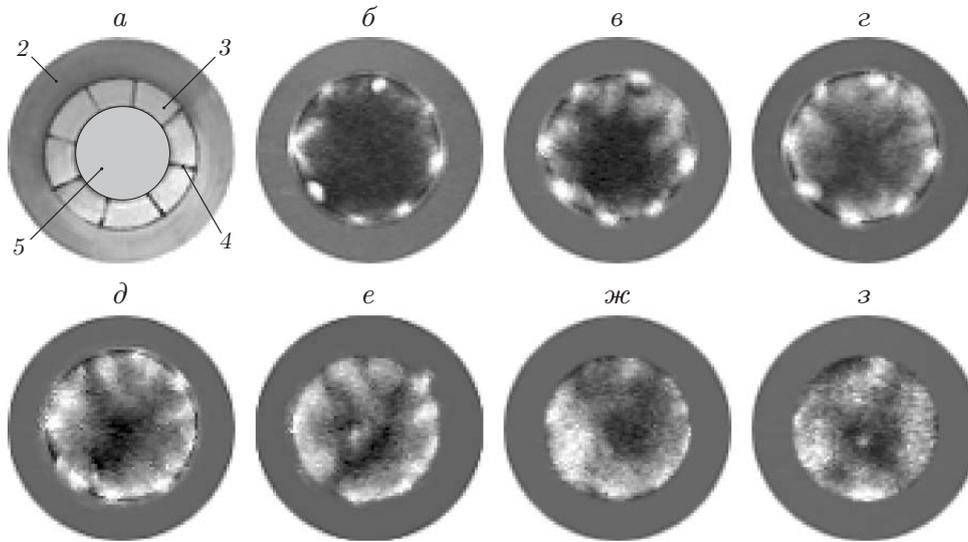


Рис. 3. Формирование плазменной структуры сильноточного разряда при скорости нарастания силы разрядного тока, приблизительно равной 2 кА/мкс: интервал времени между кадрами $a-z \Delta t = 5,38$ мкс; обозначения те же, что на рис. 2

На рис. 3 показано формирование плазменной структуры сильноточного дугового разряда типа Z-пинч с круговой плазменной перемычкой при отсутствии МТ. Фотографии получены путем высокоскоростной фотосъемки пространства внутри ствола ускорителя. Через КФПС проходит пучок ЭВП, которые огибают торец изолятора и фонтанообразно расходятся к внутренней поверхности ствола. Кадр на рис. 3,а соответствует моменту времени t_0 , в который начинает течь рабочий ток ГКМПУ. Симметрично расположенные светлые пятна — светящиеся точки контакта медных проволочек с поверхностью ствола. Свечение этих точек со временем усиливается вследствие увеличения силы разрядного тока, и приблизительно через 30 мкс (рис. 3,ж) образуется светящееся кольцо. В этот момент времени t_1 , соответствующий началу работы ускорителя, происходят разложение ГГВ и формирование сильноточного дугового разряда типа Z-пинч с круговой плазменной перемычкой, фронтальная часть которой видна на рис. 3,з.

Основные данные и результаты экспериментов приведены в таблице.

Основные параметры КФПС и результаты экспериментов по ускорению твердых тел в ГКМПУ

Номер эксперимента	Тип ГГВ	$L_{\text{КФПС}}$, мм	$d_{\text{КФПС}}$, мм	$m_{\text{МТ}}$, г	U_{max} , кВ	I_{max} , кА	W_{1-2} , кДж	W , кДж	$v_{\text{МТ}}$, м/с	$W_{\text{к}}$, кДж	η , %
1	Вазелин	17	10	52,75	3,4	135	144	189	853	19,2	13,4
2	Вазелин	12	12	53,75	2,8	150	139	189	906	22,1	15,9
3	Вазелин	9	14	55,35	2,4	165	138	189	967	25,9	18,8
4	Парафин	17	10	53,42	2,1	176	134	188	906	21,9	16,4
5	Парафин	12	12	55,47	2,1	195	119	181	939	24,5	20,6
6	Парафин	9	14	54,87	2,0	203	112	167	1000	27,4	24,5

Примечание. $L_{\text{КФПС}}$ — длина КФПС, $d_{\text{КФПС}}$ — диаметр КФПС, $m_{\text{МТ}}$ — масса МТ, U_{max} — максимальное напряжение на электродах ускорителя, I_{max} — максимальная сила рабочего тока ускорителя, W_{1-2} — энергия, затраченная на ускорение МТ, W — подведенная к ускорителю энергия, $v_{\text{МТ}}$ — скорость МТ, $W_{\text{к}}$ — кинетическая энергия МТ, η — эффективность преобразования энергии.

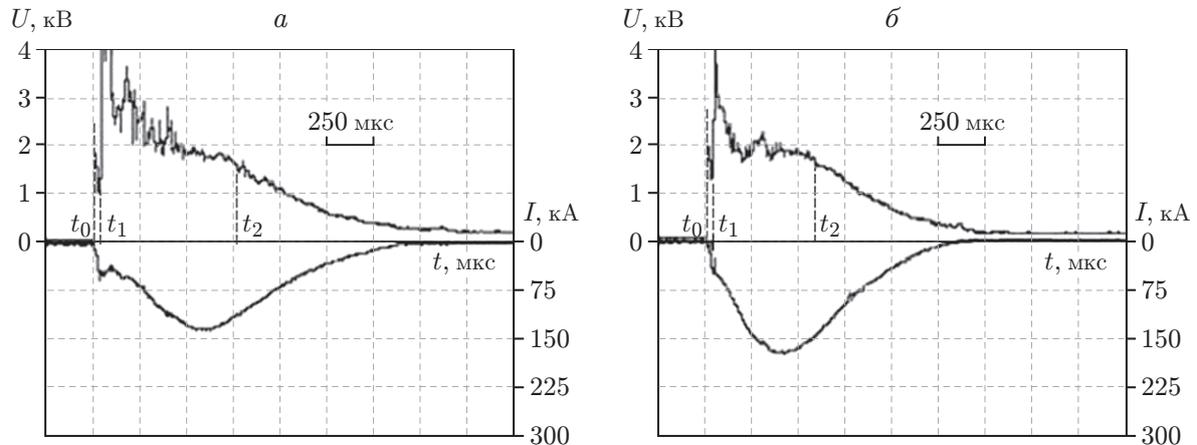


Рис. 4. Осциллограммы напряжения $U(t)$ и силы тока $I(t)$:
 а — эксперимент 1, б — эксперимент 4

На рис. 4 приведены осциллограммы напряжения на электродах ускорителя $U(t)$ и силы тока ускорителя $I(t)$. Так же как на рис. 3, момент времени t_0 соответствует моменту, в который начинает течь ток по ускорителю, t_1 — моменту электровзрыва ЭВП и началу ускорения МТ. Момент времени t_2 соответствует выходу МТ из ствола и определяется по известным расстояниям между срезом ствола и рамами-мишенями в предположении отсутствия затухания скорости МТ, масса которого приблизительно равна 54 г, на расстоянии 1,5 м. Расчетное значение t_2 сравнивается с определенным по кадрам высокоскоростной фотосъемки моментом выхода из ствола плазмы вслед за донным обтюратором. При выстреле в стволе выделяется полная энергия W , определяемая путем интегрирования функции мощности разряда:

$$W = \int U(t)I(t) dt.$$

Выделяющаяся на интервале времени (t_1, t_2) энергия W_{1-2} обеспечивает разгон МТ. Остальная часть энергии (энергия “хвостовой” части импульса тока) не расходуется на ускорение, так как выделяется после выхода МТ из ствола и поэтому теряется. Для оценки работы ускорителя введено понятие эффективности преобразования электромагнитной энергии, подведенной к ускорителю на интервале времени (t_1, t_2) , на котором происходит разгон МТ, в кинетическую энергию:

$$\eta = W_k/W_{1-2}$$

(W_k — кинетическая энергия МТ).

Из результатов анализа выстрелов 1–3 при использовании в качестве ГГВ вазелина следует, что с уменьшением длины КФПС с 17 до 9 мм увеличиваются скорость метания с 853 до 967 м/с и эффективность преобразования энергии с 13,4 до 18,8 %. При использовании в качестве ГГВ парафина скорость метания увеличивается до 1000 м/с, эффективность — до 24,5 %.

Из приведенных в таблице и на рис. 4 данных следует, что при выбранном порядке проведения экспериментов независимо от типа ГГВ наблюдаются уменьшение напряжения на электродах ускорителя, увеличение амплитуды силы разрядного тока и существенное



Рис. 5. Мишени после выстрела ГКМПУ:

а — эксперимент 3, б — эксперимент 6

уменьшение энергии W_{1-2} , в результате чего происходит ускорение МТ. Следовательно, основной причиной увеличения скорости метания является увеличение силы тока.

Согласно известным данным о гашении сильноточной электрической дуги в диэлектрических средах [6] с уменьшением кинематической вязкости диэлектрической среды повышается деионизационная способность за счет увеличения интенсивности термического разложения диэлектрика, выделения водорода, теплоотвода от дуги, роста ее сопротивления и ограничения силы тока дугового разряда. В данном случае парафин имеет большую вязкость, поэтому продукты его термического разложения оказывают менее значительное деионизирующее влияние на сильноточный разряд в стволе ускорителя.

Увеличение силы рабочего тока ускорителя сопровождается увеличением температуры дуги и, следовательно, давления в стволе ускорителя, а также увеличением кондукционной и индукционной электродинамических сил. В работе [7] показано, что при преобразовании электромагнитной энергии в кинетическую энергию МТ вклад электротермического механизма составляет 10–15 %, а вклад кондукционной и индукционной электродинамических сил — 75–80 %. Следовательно, рост скорости метания нельзя объяснить увеличением влияния электротермического механизма. Единственным объяснением полученного эффекта, по-видимому, является увеличение кондукционной и индукционной электродинамических сил.

В рассматриваемой системе — гибридном коаксиальном магнитоплазменном ускорителе — в качестве газогенерирующего вещества целесообразно использовать парафин. На рис. 5 приведены фотографии стальных мишеней, полученные после воздействия МТ в экспериментах 3, 6 (см. таблицу).

Таким образом, в гибридном коаксиальном магнитоплазменном ускорителе при длине ствола 350 мм и калибре 23 мм скорость метания и эффективность преобразования энергии увеличиваются с уменьшением длины канала формирования плазменной структуры с 17 до 9 мм. В качестве ГГВ целесообразно использовать парафин, который оказывает менее существенное деионизирующее воздействие на сильноточный дуговой разряд и поэтому способствует менее значительному ограничению силы тока разряда и увеличению кондукционной и индукционной электродинамических сил.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сивков А. А.** Гибридная электромагнитная система метания твердых тел // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 1. С. 3–12.
2. **Пат. 2150652 РФ, 7 F 41 B 6100.** Коаксиальный ускоритель Сивкова / А. А. Сивков. Заявл. 24.02.1999; Опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16.
3. **Левин Е. С.** Нефтепродукты: Справ. М.: Химия, 1966.
4. **Герасимов Д. Ю., Сивков А. А.** Исследование электроэрозионного износа ствола гибридного коаксиального магнитоплазменного ускорителя в режиме ускорения твердых тел // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 1. С. 162–169.
5. **Сивков А. А., Герасимов Д. Ю., Цыбина А. С.** Электроэрозионная наработка материала в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе для нанесения покрытий // Электротехника. 2005. № 6. С. 25–33.
6. **Корольков В. Л., Сивков А. А., Асташкин И. Н.** Влияние вязкости дугогасящей среды на характеристики отключения взрывного коммутатора // Электротехника. 1987. № 5. С. 56–58.
7. **Сивков А. А.** Взрывная коммутация и электромагнитное ускорение масс: Дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2002.

*Поступила в редакцию 26/II 2016 г.,
в окончательном варианте — 24/XI 2016 г.*
