

УДК 537.523.5

ГИБРИДНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА МЕТАНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

А. А. Сивков

Научно-исследовательский институт высоких напряжений при Томском политехническом университете, 634050 Томск

Для преобразования электромагнитной энергии в кинетическую энергию метаемого тела одновременно используются электровзрывной и электротермической механизмы и принципы кондукционной и индукционной электродинамики. Этот подход реализован на основе известной конфигурации коаксиального пинч-ускорителя. Установлено существование “активной” длины ствола, на которой система обеспечивает разгон с близким к постоянному ускорением. Получено, что при длине ствола 340 мм и калибре 17 мм тела массой 1–12 г разгоняются до скоростей 3,4–1,45 км/с с эффективностью преобразования подведенной энергии 25–29 % при напряжении емкостного накопителя 1,75 кВ и разрядном токе до 150 кА. Тела массой 40–80 г (калибр ствола 25 мм) разгоняются до скоростей 1,3–1,0 км/с с эффективностью 28–20 % при напряжении 3,5 кВ и токе до 220 кА.

Экспериментальные исследования проводились на гибридной электромагнитной ускорительной системе [1] с питанием от емкостного накопителя. Схема этой системы и сменного узла (коаксиального пинч-ускорителя) представлена на рис. 1. Основные элементы ускорителя, центральный электрод и электрод-ствол в исходном состоянии связаны электровзрывающимися проводниками. Электроды ускорителя герметично фиксируются с помощью изолятора и стального корпуса. Метаемое тело устанавливается у вершины центрального электрода в начале ствола. Основным элементом стационарной части системы является мощный индуктор-соленоид. Центральный электрод ускорителя электрически связан с дополнительным дисковым электродом, который прижат к срезу ствола. Между дисковым электродом и срезом ствола расположено изоляционное кольцо толщиной 10 мм. Дополнительный электрод предназначен для шунтирования пинч-ускорителя при выходе метаемого тела из ствола и замыкания промежутка плазмой. Наиболее простой является схема с последовательной запиткой индуктора и пинч-ускорителя от одного источника электропитания C . Емкостный накопитель включается на нагрузку ключом K в момент $t = 0$. При некотором значении силы тока в момент t_1 происходит электровзрыв проводников. Метаемое тело получает начальный импульс, и затем начинает работать ускоритель.

Целенаправленная оптимизация электровзрывного эффекта позволяет получать достаточно большие начальные скорости [2], но с небольшой эффективностью преобразования подведенной энергии (2–3 %). Поэтому в начальный момент целесообразно создать условия для быстрого включения в работу электротермического механизма с одновременным формированием плазменной структуры сильноточного разряда типа Z -пинч. Такая конфигурация плазменной структуры создается цилиндрическим каналом в полимерном изоляторе, по которому проходят несколько медных проводников и затем симметрично

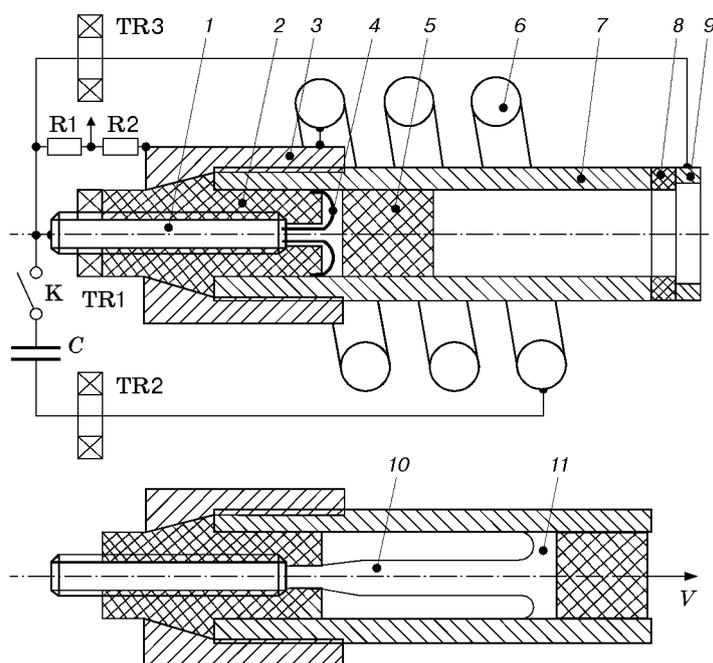


Рис. 1. Схема гибридной электромагнитной ускорительной системы:

1 — центральный электрод; 2 — изолятор с газогенерирующим каналом; 3 — корпус пинч-ускорителя; 4 — электровзрывающиеся проводники; 5 — метаемое тело; 6 — соленоид; 7 — электрод-ствол; 8 — изолятор; 9 — дополнительный электрод; 10 — плазменный жгут-пинч; 11 — плазменная перемычка-поршень; К — электрический ключ; С — емкостный накопитель энергии; TR1, TR2, TR3 — трансформаторы Роговского; R1, R2 — малоиндуктивные резисторы омического делителя напряжения

расходятся к стенке канала ствола [3]. Сформированная плазменная структура состоит из плазменного жгута-пинча и плазменной перемычки-поршня. Непосредственный контакт плазмы разряда с током 10^4 – 10^5 А со стенкой канала вызывает интенсивную абляцию и термическое разложение полимерного диэлектрика (например, полиэтилена). Этот простой по сути электротермический механизм преобразования энергии привлек внимание большинства исследователей, работающих с пинч-ускорителями [4–6].

Созданные электротермические пушки позволяют разгонять тела до скоростей 2–3 км/с при длине ствола примерно 1,5 м с эффективностью до 9–10%. Отказ от дальнейшего развития пинч-ускорителя в направлении активизации электродинамики объясняется неустойчивостью плазменной структуры. Однако даже в классическом пинч-ускорителе возможно формирование, компактирование и динамическое удержание в устойчивом состоянии плазменной структуры такого типа магнитным полем собственного тока, что позволяет ей пройти по ускорительному каналу на расстояние 100–150 мм и более [7]. Об этом свидетельствуют длина сплошного плазменно-эрозионного следа, остающегося на стенке ускорительного канала, и результаты скоростной фотосъемки процесса на срезе ствола классического пинч-ускорителя. Следовательно, существенного увеличения кинетических параметров пинч-ускорителя можно ожидать при использовании дополнительных мер по стабилизации устойчивого состояния плазменной структуры. Одним из стабилизирующих факторов является магнитное поле индуктора-соленоида (см. рис. 1).

Экспериментальные исследования по оптимизации предложенной схемы проводились при емкости накопителя $C = 48 \cdot 10^{-3}$ Ф, индуктивности разрядного контура $L \approx 10^{-6}$ Гн (включая индуктивность соленоида примерно $0,6 \cdot 10^{-6}$ Гн) на устройстве со следующими параметрами конструкции: длина ствола $l_c \leq 1$ м, калибр ствола $d_c = 17 \div 25$ мм, длина

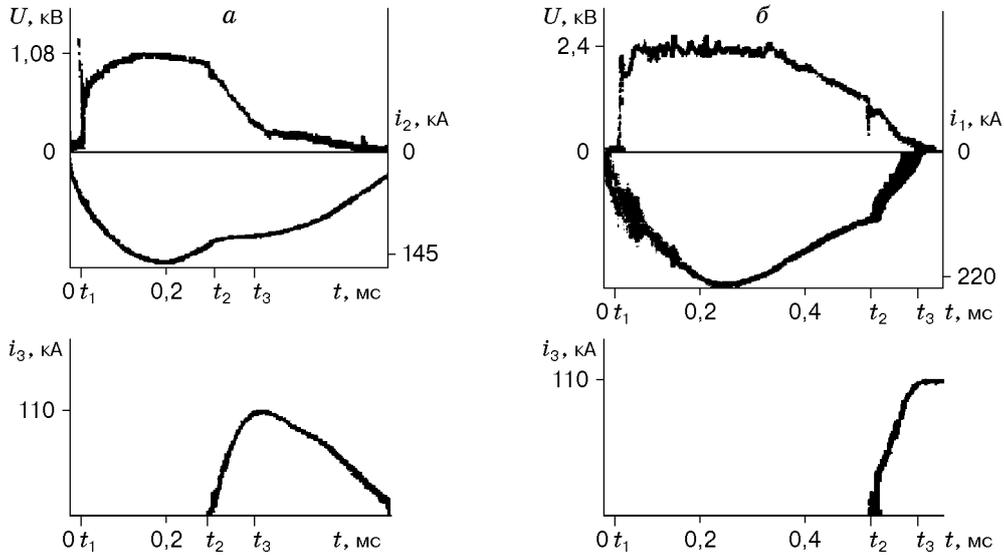


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на электродах $U(t)$, рабочего тока $i_1(t)$, $i_2(t)$ и тока в шунтирующей цепи $i_3(t)$ при метании:
 а — полиэтиленового тела ($m_T = 3,5$ г, $l_c = 340$ мм, $d_c = 17$ мм, $U_3 = 1,75$ кВ); б — составного тела ($m_T = 80$ г (лексан — 20 г, сталь — 60 г), $l_c = 340$ мм, $d_c = 25$ мм, $U_3 = 3,5$ кВ)

соленоида $h = 100$ мм, его средний диаметр $b = 54$ мм, число витков $N = 3,5$, масса метаемого тела $m_T = 0 \div 12$ г (при $m_T = 0$ ускорялась плазма разряда). Метаемые тела цилиндрической формы изготавливались из полиэтилена, лексана и металла.

Электрические параметры работы ускорителя регистрировались электронными осциллографами с помощью трансформаторов Роговского TR1, TR2, TR3, дающих токи i_1 , i_2 , i_3 , и омического делителя напряжения, выполненного из малоиндуктивных резисторов R1, R2, дающего напряжение U между электродами. Момент выхода метаемого тела из ствола t_2 определялся по моменту замыкания плазмой промежутка между срезом ствола и дополнительным электродом. На осциллограмме напряжения этот момент соответствует моменту появления тока i_3 в шунтирующей цепи (рис. 2). В отдельных опытах производилась скоростная фоторегистрация процесса на срезе ствола в отсутствие шунтирующего электрода. Движение тела по трассе регистрировалось несколькими контактными датчиками. В конце трассы устанавливались мишени из алюминия или дюралюминия.

На начальном этапе исследований экспериментально подтверждены некоторые предсказанные теоретически условия, позволяющие использовать дополнительную индукционную систему: 1) во избежание проявления эффекта “магнитной пробки” — торможения токонесущей плазменной структуры торцевым полем соленоида — область ее возможного формирования и начало ствола должны размещаться в плоскости, проходящей через середину первого витка [1]; 2) направление вектора поля соленоида H_Z , а следовательно, и направление силы дипольного взаимодействия с ним плазменной структуры должны совпадать с направлением разгона [8]. Это следует из результатов опытов метания полиэтиленовых тел массой 9 г (длина ствола 300 мм, калибр 20 мм, зарядное напряжение накопителя $U_3 = 2$ кВ) без использования газогенерирующего канала в полиэтиленовом изоляторе у вершины центрального электрода, приведенных в табл. 1 (i_m — амплитуда рабочего

тока ускорителя; U_m — максимальное напряжение на электродах; $W = \int_{t_1}^{t_2} U(t)i_1(t) dt$ — подведенная к ускорителю энергия; V — дульная скорость тела; $W_K = m_T V^2 / 2$ — кине-

Таблица 1

Номер эксперимента	Условия эксперимента	i_m , кА	U_m , кВ	W , кДж	V , км/с	W_k , кДж	η , %
1	Пинч-ускоритель без индукционной системы. Индуктор включен в разрядный контур	200	0,375	25,3	0,60	1,62	6,40
2	Ускоритель с индуктором. Вершина центрального электрода вне зоны, охваченной индуктором	200	0,380	23,0	0,28	0,36	1,57
3	Начало ствола и вершина центрального электрода в плоскости первого витка индуктора. Направления векторов V и H_Z противоположны	192	0,513	31,5	0,70	2,21	7,02
4	Начало ствола и вершина центрального электрода в плоскости первого витка индуктора. Направления векторов V и H_Z совпадают	188	0,630	36,5	0,81	2,94	8,05

тическая энергия на срезе ствола; $\eta = (W_k/W) \cdot 100\%$ — эффективность преобразования подведенной энергии в кинетическую).

Из результатов эксперимента 2 (табл. 1) следует, что при искусственном выносе вершины центрального электрода из зоны, охваченной соленоидом, его торцевое поле препятствует прониканию токонесущей плазменной структуры в глубь ускорительного канала, о чем свидетельствует отсутствие на его стенке плазменно-эрозионного следа. Это приводит к двукратному снижению скорости метания по сравнению со скоростями, полученными на классическом пинч-ускорителе без индукционной системы (табл. 1, эксперимент 1). О влиянии дополнительной индукционной системы и условия 2 можно судить по результатам экспериментов 3 и 4 (табл. 1). В частности, независимо от направления вектора поля соленоида H_Z кинетические параметры системы существенно увеличиваются, что объясняется стабилизацией устойчивого состояния плазменной структуры сильноточного разряда типа Z -пинч и соответственно созданием лучших условий для совершения полезной работы силами кондукционной электродинамики. При совпадении направлений векторов V и H_Z (табл. 1, эксперимент 4) получается большее увеличение конечной скорости и эффективности преобразования энергии. Применение газогенерирующего канала в полиэтиленовом изоляторе у вершины центрального электрода длиной 5 мм и диаметром 6 мм позволило усилить начальную динамику разгона и при выполнении двух указанных условий получить скорость $V = 1,4$ км/с и эффективность преобразования энергии 15,8%. Полная гибридная система обеспечивает более чем двукратное увеличение скорости и эффективности метания по сравнению с классическим пинч-ускорителем при одинаковых условиях электропитания и основных параметрах конструкции. Конечный результат работы пинч-ускорителя с дополнительной индукционной системой определяется вкладом электровзрывного и электротермического (в совокупности), индукционного и кондукционного механизмов, который составляет 15, 10, 75% соответственно.

Представление о механизме работы электродинамических сил в рассматриваемой системе по аналогии с коаксиальным рельсотроном, когда роль центральной направляющей выполняет самоудлиняющийся плазменный жгут-пинч, подтверждается серией экспери-

Таблица 2

Номер эксперимента	$l_{\text{м.с.}}$, мм	i_m , кА	W , кДж	V , км/с	$W_{\text{к}}$, кДж	η , %
1	0	210	60	1,40	3,43	5,7
2	40	200	56	1,65	4,67	8,5
3	190	180	58	2,00	7,00	12,0
4	360	160	38	2,27	9,02	23,7

ментов, результаты которых представлены в табл. 2. Изменялась длина металлической электропроводящей части ствола $l_{\text{м.с.}}$ при его неизменной общей длине 360 мм. Металлическая часть дополнялась диэлектрической из стеклопластика. Металлись полиэтиленовые тела массой $m_{\text{т}} = 3,5$ г (калибр ствола $d_c = 17$ мм, зарядное напряжение $U_3 = 1,75$ кВ). Исследования показали, что при нулевой длине металлической части наличие или отсутствие индуктора не влияет на результат выстрела. Результаты экспериментов с диэлектрическим каналом ствола подтверждают предположение о существенной роли электровзрывного и электротермического механизмов в ускорительном процессе и опровергают предположение о чисто индукционном механизме ускорения сгустка плазмы. Анализ представленных в табл. 2 результатов свидетельствует об увеличении дульной скорости и эффективности преобразования подведенной энергии с ростом $l_{\text{м.с.}}$. Это может быть объяснено только допущением существования устойчивого самоудлиняющегося плазменного жгута (Z -пинча) с перемещающейся под действием силы Ампера токнесущей плазменной перемычкой. Оценка вклада каждого из указанных выше механизмов, полученная по результатам экспериментов, представленных в табл. 2, согласуется с приведенной выше. Аналогичные результаты получены автором на пинч-ускорителе со взрывной коммутацией рабочего тока и предварительным ускорением метаемого тела [9]. В этом случае дополнительным фактором компактирования плазменной структуры является поток продуктов детонации взрывчатого вещества.

В рассматриваемой системе металлическая стенка ствола экранирует ускорительный канал. Дополнительное магнитное поле в нем является суперпозицией поля соленоида и поля поперечного тока, наведенного в стенке ствола. Варьирование величины поперечной проводимости стенки ствола и комбинаций магнитных и немагнитных металлов в конструкции пинч-ускорителя позволяет задавать закон изменения дополнительного магнитного поля в ускорительном канале. Оптимизированная конструкция позволяет создать кратковременную паузу, когда в зоне формирования плазменной структуры поле отсутствует, и обеспечить последующее монотонное нарастание поля в течение всего времени разгона, даже при уменьшении рабочего тока. На начальном этапе сведена к минимуму скорость вращения плазменной перемычки азимутальным полем.

При указанных условиях экспериментально исследована динамика разгона плазменной структуры и метаемого тела в гибридной ускорительной системе. Длина ствола пинч-ускорителя менялась от 50 мм до 1 м. При надежной регистрации момента выхода из ствола плазмы (вслед за метаемым телом) каждый выстрел позволял получить одну точку на кривой закона движения по стволу. Методика позволяет исследовать влияние длины ствола на конечную скорость метаемого тела и решить две практические задачи: 1) отсечка хвостовой части импульса тока; 2) переключение электропитания для использования на возможном последующем этапе ускорения.

На рис. 2 приведены осциллограммы напряжения на электродах ускорителя, рабочего тока и тока в шунтирующей цепи. Начало отсчета времени соответствует моменту замы-

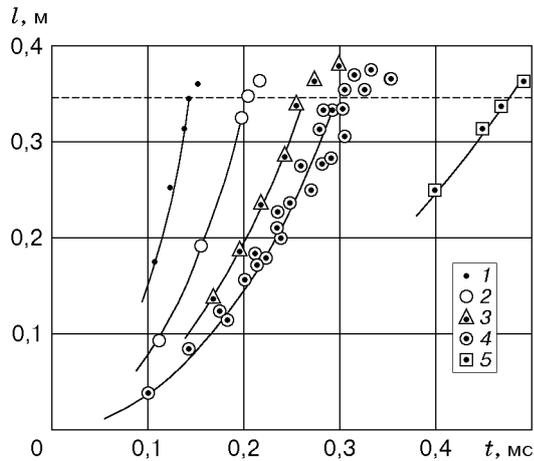


Рис. 3. Зависимость времени выхода тела из ствола от длины ствола ($d_c = 17$ мм, $U_3 = 1,75$ кВ):

1 — $m_T = 0$ (плазма); 2 — $m_T = 1$ г; 3 — $m_T = 2$ г; 4 — $m_T = 3,5$ г; 5 — $m_T = 12$ г

кания ключа К (см. рис. 1). Момент t_1 соответствует электровзрыву проводников и началу работы ускорителя, t_2 — перекрытию шунтирующего промежутка и выходу тела из ствола, t_3 — полному переключению тока в шунтирующую цепь. Из анализа осциллограмм всех экспериментов следует, что разброс значений напряжения, силы тока и различие в законе ввода энергии в нагрузку составляют не более 5%.

Экспериментальная зависимость времени выхода тела из ствола от длины ствола представлена на рис. 3. Видно, что на участке ствола длиной 50–340 мм характер разгона близок к закону движения с постоянным ускорением a :

$$l = at^2/2. \quad (1)$$

Это согласуется с данными [3, 4, 6] для участка разгона небольшой длины, на котором возможно прохождение токонесящей плазменной структуры в глубь ствола в обычном пинч-ускорителе. Закон движения (1) выполняется во всем диапазоне используемых метаемых масс. Наиболее детально исследована зависимость $l(t)$ для массы метаемого тела 3,5 г. При длине ствола более 340 мм экспериментальные точки отклоняются вправо не только от кривой, соответствующей зависимости (1), но и от прямой, соответствующей линейной зависимости. Наблюдается запаздывание пробоя шунтирующего промежутка. При длине ствола более 340–350 мм на одном и том же расстоянии от его среза скорость практически не меняется.

Во всех опытах после выстрела ствол разрезался. Из результатов анализа поверхности ускорительного канала следует, что существует зависимость между скоростью и длиной сплошного плазменно-эрозионного следа при любой длине ствола. В проведенных экспериментах его длина не превышала 340–350 мм даже при значительно большей длине ствола. Эта зависимость одна и та же как для классического пинч-ускорителя, так и для ускорителя с индукционной системой. Отметим, что плазменно-эрозионный след не прерывается резко, а разделяется на отдельные “языки”, отслаивающиеся от поверхности канала ствола, не подверженной эрозии. Такая структура может свидетельствовать о том, что перемещение токонесящей плазменной перемычки-поршня прекращается, а отдельные “языки” возникают в результате размазывания расплавленного металла.

Из сказанного следует, что дополнительное магнитное поле обеспечивает устойчивое состояние токонесящей плазменной структуры на участке ускорительного канала, длина которого превышает длину соленоида примерно на 250 мм. На этом “активном” участке ствола плазменная перемычка и метаемое тело разгоняются с близким к постоянному ускорением.

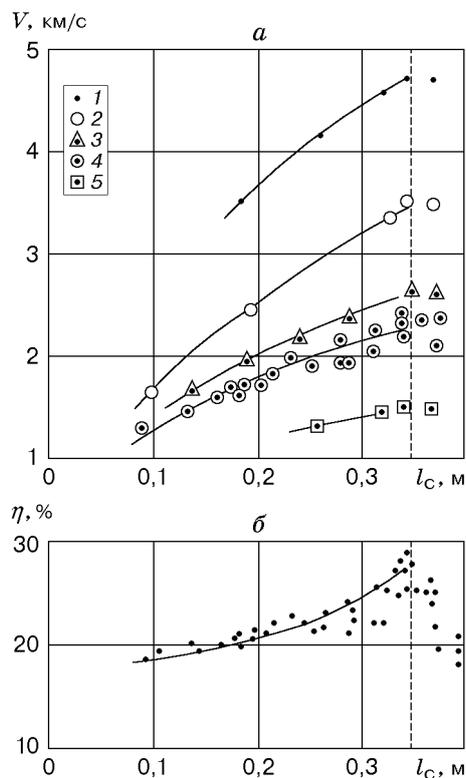


Рис. 4. Зависимости дульной скорости (а) и эффективности преобразования подводенной энергии в кинетическую (б) от длины ствола (обозначения те же, что на рис. 3)

Гарантированный пробой шунтирующего промежутка происходит при выходе из ствола токнесущей плазмы. При длине ствола больше длины “активного” участка из него выходит плазма, не несущая тока, поэтому пробой запаздывает либо не происходит.

Таким образом, при длине ствола, меньшей или равной длине “активного” участка, дульную скорость можно определять по формуле

$$V = 2l_c/t_{12}, \quad (2)$$

где $t_{12} = t_2 - t_1$ — время разгона.

Рассчитанные по формуле (2) значения дульной скорости и аппроксимирующие кривые приведены на рис. 4, а. Средние значения ускорений для используемых метаемых масс соответственно равны $3,3 \cdot 10^7$; $1,32 \cdot 10^7$; $0,96 \cdot 10^7$; $0,77 \cdot 10^7$; $0,32 \cdot 10^7$ м/с². На рис. 4, б представлена зависимость эффективности η преобразования подводенной энергии в кинетическую от длины ствола для метаемых тел массой 1–12 г. Кривая проведена по экспериментальным точкам, соответствующим массе метаемого тела 3,5 г. Из результатов экспериментов следует, что с увеличением длины ствола до 340 мм увеличение дульной скорости сопровождается ростом эффективности преобразования подводенной энергии. В оптимальных условиях гибридная ускорительная система обеспечивает эффективность 25–29% независимо от массы метаемого тела, подводенной к ускорителю энергии и дульной скорости тела. Эффективность же для электротермических пушек резко уменьшается при $V > 2$ км/с [10].

Результаты измерения скорости тел на трассе показывают ее замедление, что согласуется с законом экспоненциального затухания скорости [11–13]. В данной работе это подтверждено экспериментально показаниями нескольких контактных датчиков, а также скоростной фотосъемкой процесса на срезе ствола в обычных условиях и с использованием прозрачной насадки из оргстекла на срезе ствола. Регистрируемая оптическим методом скорость тела в прозрачной насадке длиной 40 мм практически совпадает с рассчитанной по формуле (2) и определенной с использованием закона экспоненциального затухания.

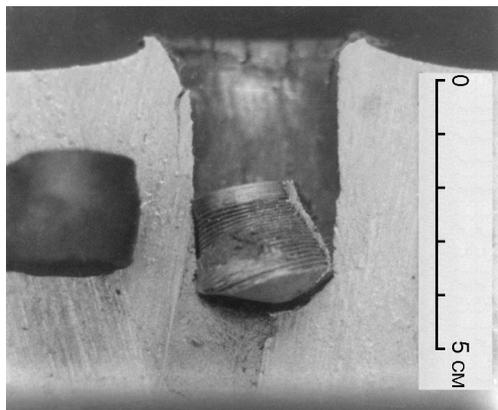


Рис. 5. Кратер в дюралюминиевой мишени со стальным ударником массой 60 г и сохранившимся лексановым поддоном массой 20 г при скорости соударения 1 км/с

При метании тяжелых тел массой несколько десятков грамм уменьшение скорости на расстояниях до 1,5 м очень мало. Поэтому все способы определения дульной скорости дают близкие значения, различающиеся не более чем на 10 %. На рис. 2, 5 представлены результаты выстрела гибридной системы, более мощной по сравнению с использованной для метания тел массой 1–12 г. При метании тела массой 80 г на трассе зарегистрирована скорость 1 км/с, скорость на срезе ствола, вычисленная по формуле (2), равна 1,05 км/с. Эффективность преобразования энергии 20 %. Ее снижение по сравнению с достигнутым уровнем при метании легких тел в данном случае обусловлено недостаточной величиной энергии емкостного накопителя и переходом системы в режим разгона при убывающем токе (см. рис. 2, б). На рис. 5 представлена фотография кратера в дюралюминиевой мишени со стальным ударником массой 60 г и практически сохранившимся лексановым поддоном массой 20 г. Уменьшение массы тела до 40,2 г обеспечило его разгон в режиме при неубывающем токе до конечной скорости 1,3 км/с с эффективностью преобразования энергии 27,8 %.

Максимальные кинетические параметры метания, полученные в настоящей работе, показаны на рис. 6 в виде зависимости дульной скорости от массы метаемого тела. Каждая кривая проведена по экспериментальным точкам, полученным при одинаковых параметрах ускорительной системы и одинаковых параметрах источника электропитания, указанных в таблице к рис. 6, где номера серий опытов соответствуют номерам кривых. Во всех случаях эффективность менее 20 % с увеличением массы тела обусловлена переходом системы в режим разгона при убывающем токе. Добиться метания при неубывающем токе не удалось из-за ограниченных возможностей имеющейся в распоряжении первичной энергетики. Результаты, представленные точками 2 и 4, получены при использовании 10-виткового соленоида длиной 320 мм. Особенностью метания при использовании такого соленоида является то, что плазменно-эрозионный след распространяется на всю длину ствола, что свидетельствует о возможности устойчивого состояния плазменной структуры на участке длиной более 450 мм. Это позволяет ожидать получения более высоких скоростей при увеличении первичной энергетики.

Из представленных в работе осциллограмм напряжения на электродах и токов следует, что система эффективно переключает ток в параллельную цепь. При этих условиях обеспечивается отсечка хвостовой части импульса тока, что можно использовать для переключения электропитания на вторую ступень ускорения без применения дополнительного коммутатора.

Следует отметить, что удельная энергия экспериментальных образцов ускорительной системы составляет порядка 1–5 кДж/кг без учета первичного накопителя.

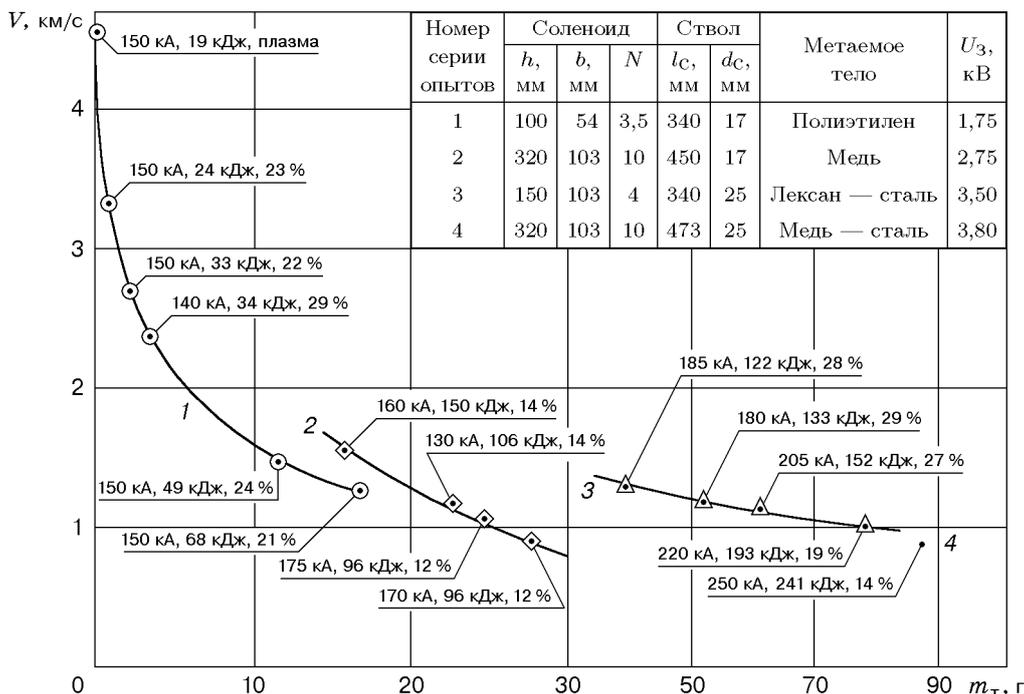


Рис. 6. Зависимость дульной скорости от массы метаемого тела (для каждой точки указаны максимальный ток, подведенная энергия, эффективность преобразования энергии)

Основным результатом настоящей работы является доказательство того, что оптимизированная гибридная электромагнитная ускорительная система обеспечивает высокую, близкую к постоянной эффективность в достаточно широком диапазоне метаемых масс при токах 150–200 кА. При метании снарядов массой порядка 0,1 кг и более это позволяет ожидать получения скоростей 2–3 км/с с эффективностью преобразования энергии 25–30%. Система может быть использована независимо, а также в качестве первой ступени более мощной системы, обеспечивая переключение электропитания на следующую ступень ускорения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2119140 РФ, 6 F 41 B 6/00. Коаксиальный ускоритель / А. А. Сивков. Заявл. 24.06.97; Оpubл. 20.09.98, Бюл. № 26.
2. Burden R. A., Gray I. W., Oxley C. M. Explosive foil injection (EFI) preaccelerator for electromagnetic launchers // IEEE Trans. Magnetics. 1989. V. 25, N 1. P. 107–110.
3. Пат. 2150652 РФ, 7 F 41 B 6/00. Коаксиальный ускоритель Сивкова / А. А. Сивков. Заявл. 24.02.99; Оpubл. 10.06.00, Бюл. № 16.
4. Salge J. G. H., Weise Th. H. G. G., Braunsberger U. E., et al. Mass acceleration by plasma pulses // IEEE Trans. Magnetics. 1989. V. 25, N 1. P. 495–499.
5. Loeb A., Kaplan Z. A theoretical model for the physical processes in the confined high pressure discharges of electrothermal Launchers // Ibid. P. 342–346.
6. Driga M. D., Ingram M. W., Weldon W. F. Electrothermal accelerators: the power conditioning point of view // Ibid. P. 147–152.
7. Модзoleвский В. И. Токоплазменная оболочка в коаксиальных ускорителях микросекундного диапазона // Материалы I Всесоюз. семинара по динамике сильноточного дугового

- разряда в магнитном поле, Новосибирск, 10–13 апр. 1990 г. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1990. С. 220–251.
8. **Кнопфель Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
 9. **Сивков А. А.** Взрывная коммутация в электродинамических ускорителях масс // Изв. вузов. Физика. 1996. № 4. С. 164–172.
 10. **Guillemot M., Nicolas A., Roche M.** Projectile launching by an electrothermal gun // IEEE. Trans. Magnetics. 1989. V. 25, N 1. P. 207–209.
 11. **Злотин Н. А., Красильщиков А. П., Мишин Г. И., Попов Н. Н.** Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. М.: Наука, 1974.
 12. **Дробышевский Э. М., Жуков Б. Г., Сахаров В. А.** Измерение больших скоростей тел малых геометрических размеров // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, вып. 17. С. 45–48.
 13. **Андреев Д. А., Богомаз А. А., Рутберг Ф. Г., Шакиров А. Н.** Ускорение тел малой массы сильноточным разрядом типа Z-пинч при высокой начальной плотности // Журн. техн. физики. 1993. Т. 63, вып. 1. С. 203–205.

*Поступила в редакцию 14/II 2000 г.,
в окончательном варианте — 21/VI 2000 г.*
