

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

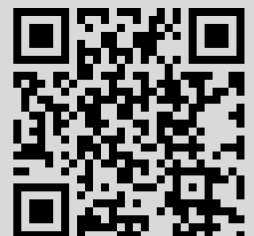
А. В. Будин, А. А. Киселев, В. А. Коликов, Ф. Г. Рутберг, Программированный ввод энергии в разрядную камеру электроразрядного легкогазового ускорителя тел, *ТВТ*, 2008, том 46, выпуск 1, 30–34

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением  
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.81

17 марта 2025 г., 05:14:44



УДК 533.9;537.523.5

## ПРОГРАММИРОВАННЫЙ ВВОД ЭНЕРГИИ В РАЗРЯДНУЮ КАМЕРУ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ЛЕГКОГАЗОВОГО УСКОРИТЕЛЯ ТЕЛ

© 2008 г. А. В. Будин, А. А. Киселев, В. А. Коликов, Ф. Г. Рутберг

*Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург*

*E-mail: rutberg@iperas.spb.su*

Поступила в редакцию 17.10.2006 г.

Исследовано влияние длительности ввода электрической энергии в рабочий газ и эпюры мощности разряда на скорость метания и эффективность процесса ускорения тел с помощью электроразрядного легкогазового ускорителя калибром 30 мм. Установлено, что при одинаковой энергии, вложенной в дугу, или при одинаковом импульсном давлении рабочего газа в разрядной камере ускорителя, скорость метаемого тела в программируемом режиме на 7–10%, а эффективность перевода внутренней энергии рабочего газа в кинетическую энергию метаемого тела на 2–3% выше, чем в синхронном режиме.

PACS: 52.50.b, 52.50.Dg, 52.77.Fv, 52.80.s

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования влияния различных факторов на скорость метания и эффективность процесса ускорения тел при помощи электротермических и других типов ускорителей, использующих электрическую энергию, проводятся в течение длительного времени, в результате чего накоплен большой объем экспериментальных данных [1–9].

Кроме таких факторов, как давление, температура, молекулярная или атомная масса рабочего газа, степень расширения рабочего газа и т.д., влияющих на скорость и эффективность процесса ускорения тел с помощью электроразрядного ускорителя, необходимо упомянуть длительность ввода электрической энергии в рабочий газ или, что почти то же самое, длительность импульса тока. В данной работе изменение длительности импульса тока достигалось за счет программируемого, т.е. последовательного во времени включения модулей конденсаторной батареи, являющейся источником питания ускорителя, в разрядную цепь.

Определена длительность разрядного импульса тока, при которой обеспечивается максимальное приращение скорости метания и эффективности процесса ускорения тел.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследование влияния длительности ввода электрической энергии в рабочий газ на скорость метания и эффективность ускорения тел проводилось на электроразрядном легкогазовом ускорителе, разрядная камера которого представлена на рис. 1. Калибр ускорителя – 30 мм, длина ствола – 2 м, объем разрядной камеры – 1.2 дм<sup>3</sup>, рабо-

чий газ – водород при начальном давлении до 42 МПа, масса метаемых тел ~70 г, диапазон скоростей метания от 1900 м/с до 2300 м/с.

Для питания электроразрядного ускорителя использовалась конденсаторная батарея емкостью 0.113 Ф, энергия, запасаемая в батарее, при напряжении 10 кВ ~5.6 МДж. Батарея разделена на шесть одинаковых автономных модулей С<sub>1</sub>–С<sub>6</sub>, каждый из которых подключается к нагрузке с помощью воздушных разрядников тригatronно-го типа Р<sub>1</sub>–Р<sub>6</sub> (рис. 2).

Такая схема источника питания позволяет регулировать длительность, форму и амплитуду разрядного тока, а также эпюру мощности разряда батареи. Система управления источником питания позволяла изменять длительность импульса тока от 0.3–0.5 мс в синхронном режиме до 1.0–1.5 мс в программируемом режиме.

Для определения зависимости скорости метания и эффективности процесса ускорения тел от длительности импульса тока и от эпюры мощности разряда использовались два способа включения шести модулей конденсаторной батареи: 2 + 2 + 2 и 3 + 3 с задержками во времени между моментами включения модулей в разрядную цепь от 0.15 до 0.25 мс. При этом для предотвращения погасания дуги величина задержек включения модулей не превышала длительности одиночного импульса тока (~0.3 мс).

Начальное давление газа в разрядной камере измерялось при помощи датчика статического давления повышенной точности с реостатным выходом ДТ-400 с погрешностью измерения в диапазоне от 20 до 40 МПа не более ±0.4%. Для измерения импульсного давления в разрядной ка-

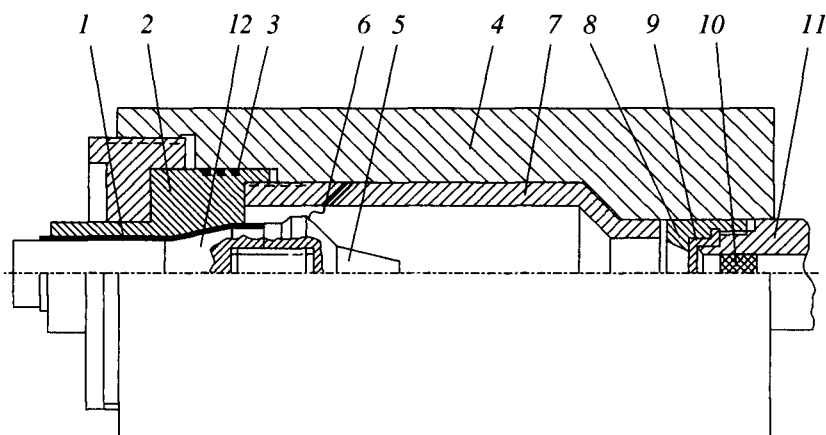


Рис. 1. Разрядная камера ускорителя: 1 – изоляция, 2 – электрододержатель, 3 – уплотнительные кольца, 4 – корпус разрядной камеры, 5 – катод, 6 – инициирующая проволочка, 7 – анодная вставка, 8 – гайка, 9 – диафрагма, 10 – металлическое тело, 11 – ствол.

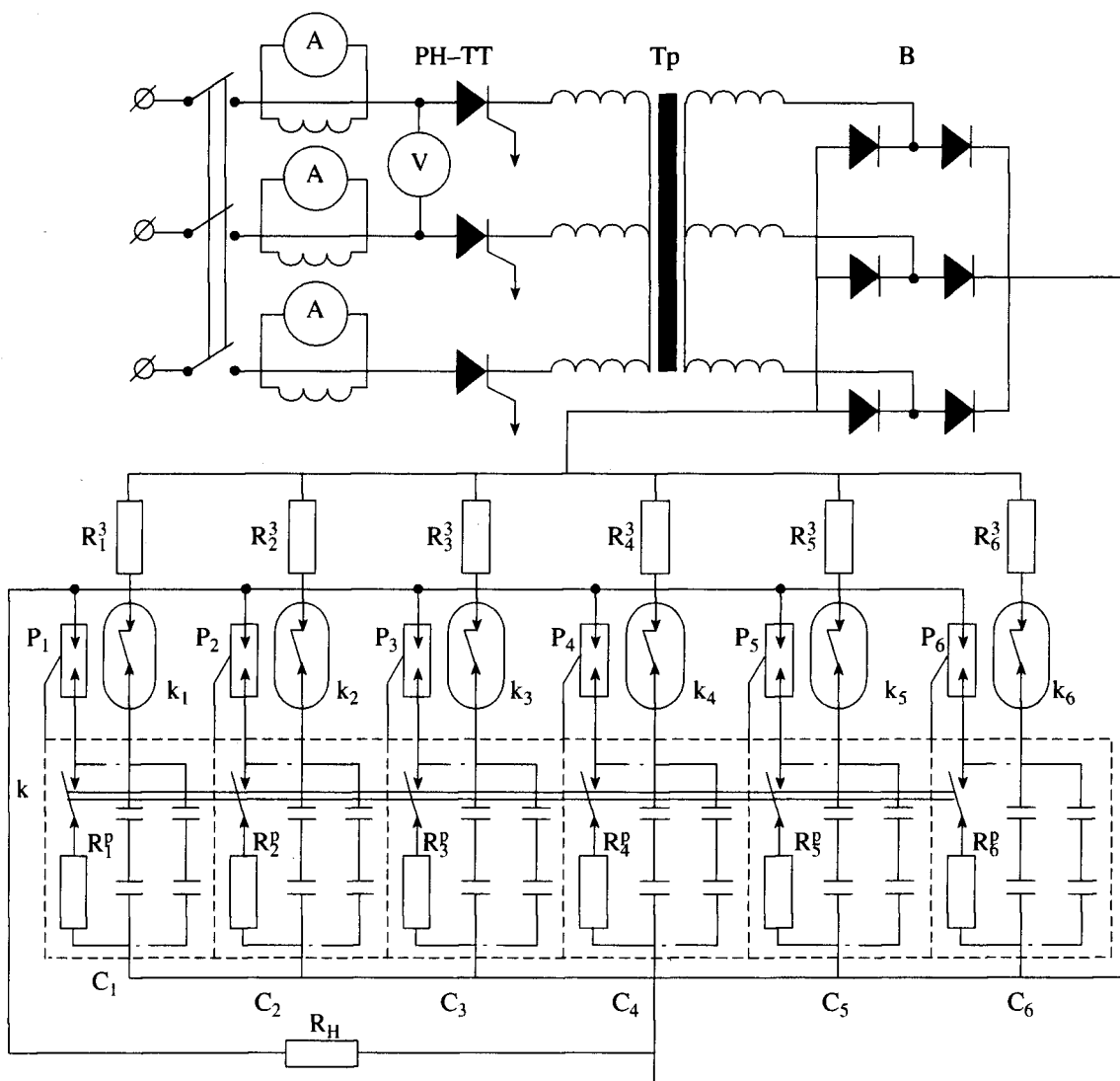


Рис. 2. Схема источника питания электроразрядного ускорителя: РН-ТТ – тиристорный регулятор напряжения, Тр – высоковольтный трансформатор, В – выпрямитель,  $R_1^3-R_6^3$  – зарядные сопротивления,  $R_1^p-R_6^p$  – разрядные сопротивления,  $P_1-P_6$  – воздушные тригатронные разрядники,  $k_1-k_6$  – вакуумные выключатели, к – высоковольтный шестиполюсный замыкатель,  $C_1-C_6$  – модули конденсаторной батареи,  $R_n$  – нагрузка.

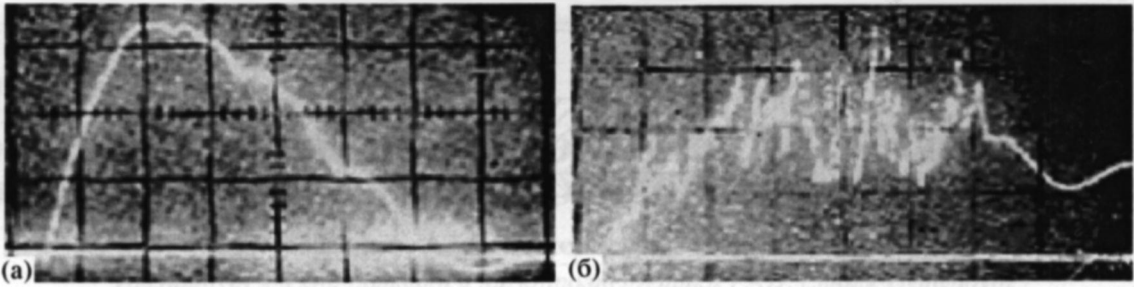


Рис. 3. Осциллограммы тока (а) и напряжения (б) в синхронном режиме: 300 кА/дел, 2 кВ/дел, 50 мкс/дел.

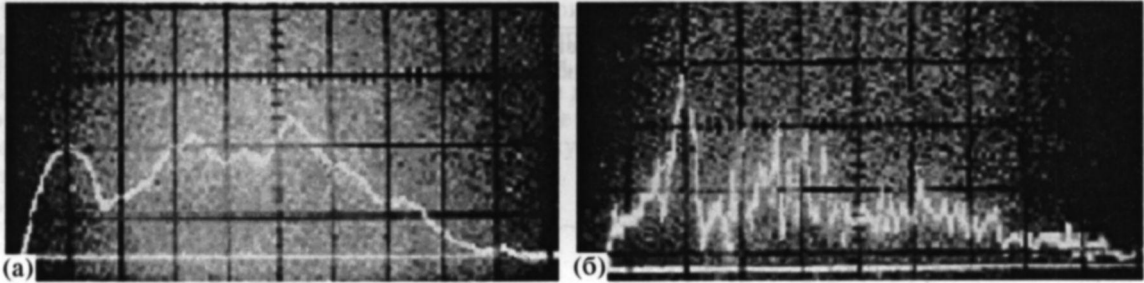


Рис. 4. Осциллограммы тока (а) и напряжения (б) в программируемом режиме: 500 кА/дел, 2 кВ/дел, 0.1 мс/дел.

мере и в стволе ускорителя использовались пьезо-керамические датчики давления Т-6000. Датчики рассчитаны на давление до 600 МПа и имеют граничную частоту передаваемого сигнала 250 кГц. По длине ствола располагалось три датчика, по сигналам которых строилась эпюра давления газа на дно метаемого тела.

### ПРОГРАММИРУЕМЫЙ РЕЖИМ РАЗРЯДА БАТАРЕИ

Основными отличиями программируемого режима разряда батареи от синхронного режима являются:

- практически постоянная во времени мощность разряда;
- меньшая при равной вложенной в дугу энергии величина импульсного давления в разрядной камере ускорителя;
- меньшая скорость снижения давления рабочего газа по длине ствола.

Средняя продолжительность импульса тока в программируемом режиме составляла 0.8–1.0 мс, а в синхронном режиме – ~0.5 мс. Средняя величина пиковой мощности разряда в синхронном режиме –  $3 \times 10^9$  Вт, в программируемом режиме –  $1.2 \times 10^9$  Вт. Максимальное импульсное давление в разрядной камере составило ~320 МПа, максимальная энергия, вложенная в дугу, – 1.6 МДж.

На рис. 3 представлены осциллограммы тока и напряжения в экспериментах, выполненных в

синхронном режиме, на рис. 4 – в программируемом режиме.

Из осциллограмм на рис. 3 видно, что в эксперименте, выполненном в синхронном режиме, ток имеет максимум ~1 МА, после которого он монотонно уменьшается до нуля.

Иной характер изменения тока наблюдается в эксперименте с программируемым режимом 2 + 2 + 2 с временной задержкой 0.2 мс. Здесь ток имеет три максимума: 0.7 МА, 0.8 МА и 1.0 МА, величина которых возрастает от начала к концу процесса.

Характер изменения падения напряжения на дуге в обоих экспериментах приблизительно одинаков – напряжение практически постоянно за время протекания тока. Вследствие этого мощность разряда в сравниваемых режимах меняется аналогично изменению тока, т.е. в программируемом режиме она практически постоянна за все время горения дуги, а в синхронном имеет выраженный максимум в области максимума тока.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 5 представлены зависимости скорости метаемых тел массой ~70 г от энергии, вложенной в дугу. При одинаковой вложенной в дугу энергии скорость метаемого тела в программируемом режиме в среднем на 100 м/с выше, чем в синхронном режиме.

На рис. 6 приведены зависимости скорости от импульсного давления в разрядной камере. При

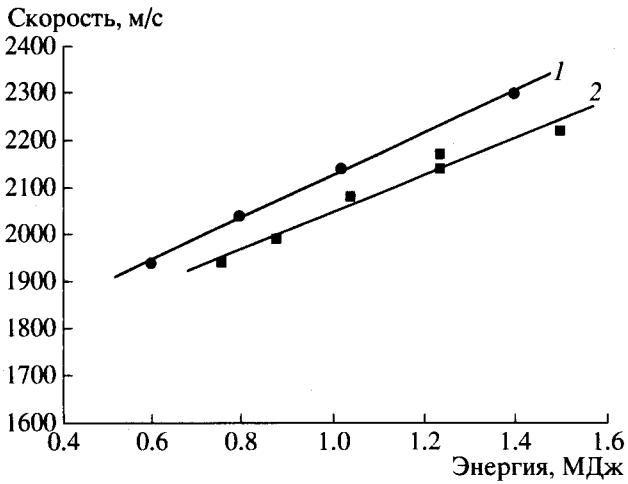


Рис. 5. Зависимости скорости метаемого тела от вложенной энергии при программируемом – 1 и синхронном – 2 режимах.

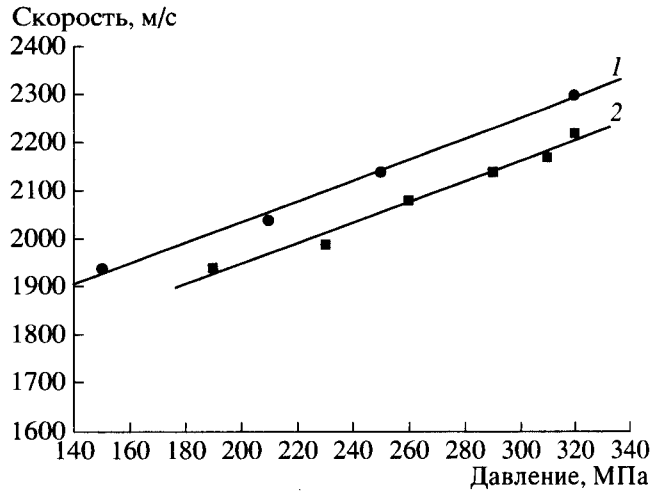


Рис. 6. Зависимости скорости метаемого тела от импульсного давления при программируемом – 1 и синхронном – 2 режимах.

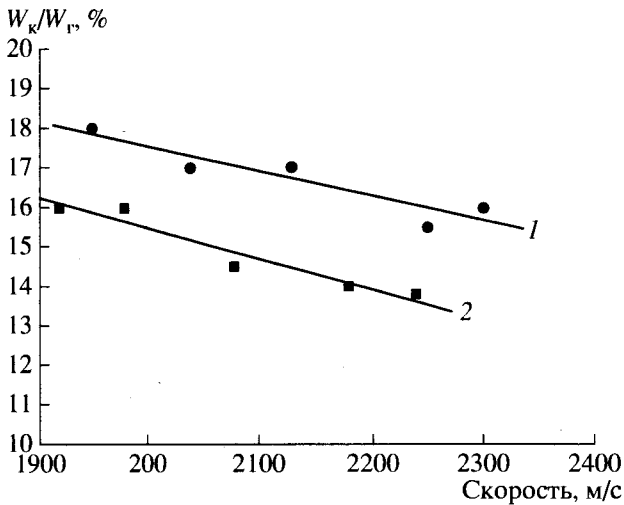


Рис. 7. Зависимости отношения кинетической энергии метаемых тел  $W_k$  к внутренней энергии рабочего газа  $W_r$  от скорости метаемых тел при программируемом – 1 и синхронном – 2 режимах.

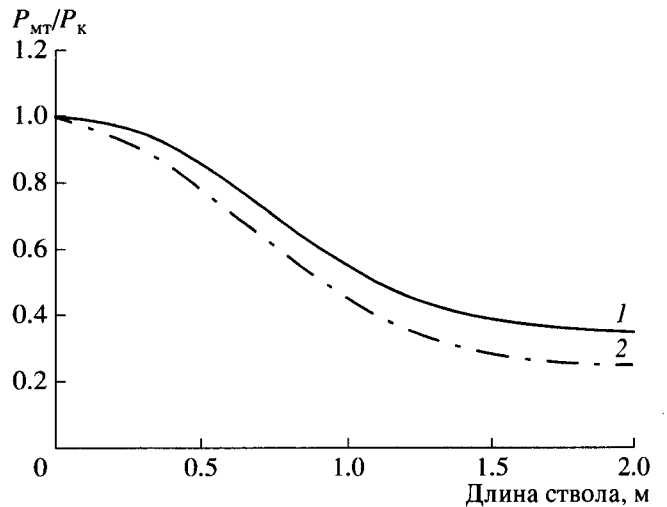


Рис. 8. Зависимость отношения давления на дно метаемого тела  $P_{мт}$  к давлению в разрядной камере  $P_k$  от координаты по длине ствола при программируемом – 1 и синхронном – 2 режимах.

одинаковом импульсном давлении в камере скорость метаемого тела в программируемом режиме также в среднем на 100 м/с выше, чем в синхронном режиме.

На рис. 7 даны зависимости отношения кинетической энергии метаемых тел  $W_k$  к внутренней энергии рабочего газа  $W_r$  от их скорости, выраженного в процентах. Средние величины отношения  $W_k/W_r$  в программируемом режиме приблизительно на 2.0–2.5% выше, чем в синхронном режиме.

На рис. 8 представлены зависимости отношения давления на дно метаемого тела  $P_{мт}$  к давлению

в разрядной камере  $P_k$  от координаты вдоль ствола в двух режимах:

- синхронном при средней длительности импульса тока ~0.5 мс;

- программируемом (2 + 2 + 2 с задержками 0.2–0.25 мс) при средней длительности импульса тока ~0.8 мс.

Из графика видно, что кривая, соответствующая программируемому режиму, проходит выше кривой синхронного режима и, следовательно, при одном и том же импульсном давлении в разрядной камере сила, ускоряющая метаемое тело, в программируемом режиме больше, чем в син-

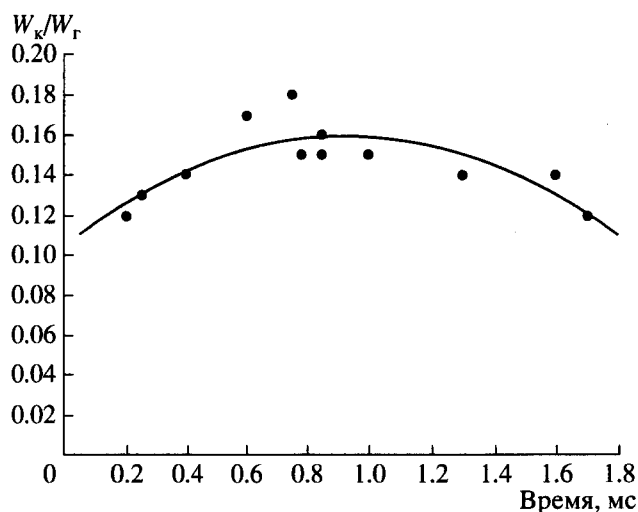


Рис. 9. Зависимость отношения кинетической энергии метаемого тела к внутренней энергии рабочего газа от длительности импульса тока.

хронном, что и обеспечивает более высокую скорость метаемого тела.

Поскольку эффективность процесса ускорения тела в канале ствола ускорителя определяется в основном остаточной (на момент вылета метаемого тела из ствола) внутренней энергией рабочего газа, то увеличение длительности ввода энергии в дугу, с одной стороны, (как следует из представленных графиков) приводит к увеличению скорости метания, а с другой стороны, (при чрезмерном увеличении длительности) должно приводить к неоправданному росту остаточной внутренней энергии рабочего газа и, как следствие, к снижению эффективности процесса ускорения метаемого тела. Исходя из этих предпосылок, логично предположить, что должна существовать некоторая оптимальная длительность ввода энергии в рабочий газ, т.е. длительность импульса тока, при которой эффективность ускорения тел максимальна (рис. 9).

Для используемых в данной работе начальных условий при проведении экспериментов длительность импульса тока, соответствующая максимальной эффективности преобразования внутренней энергии газа в кинетическую энергию метаемого тела, составляет 0.8–1.0 мс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными преимуществами программируемого режима ввода энергии в разрядную камеру электроразрядного ускорителя по сравнению с синхронным режимом является более высокая скорость метания и более высокая эффективность процесса ускорения тел при одинаковой вложен-

ной в дугу энергии и одинаковом импульсном давлении в разрядной камере ускорителя.

Для рассмотренных условий эксперимента длительность разрядного импульса тока, при которой приращение скорости метания и эффективность процесса ускорения тел максимальны, составляет 0.8–1.0 мс.

Для достижения одинаковой скорости метания тела в программируемом режиме требуется меньшая, чем в синхронном режиме, величина импульсного давления. Это обстоятельство играет заметную положительную роль при ускорении составных метаемых тел, имеющих сравнительно низкую механическую устойчивость.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН (программа П-09 “Исследование вещества в экстремальных условиях”), Российского Фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 05-02-16033 и 05-08-01125), Федерального агентства по науке и инновациям (гос. контракт № 02.445.11.7384).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stollenwerk E.J., Perry R.W.* Preliminary Planning for a Hypervelocity Aeroballistic Range at AEDC // AGAR-Dograph. 1959. № 32. P. 200.
2. *Salge J.G.H., Weise T.H.G.G., Braunsberger U.E. et al.* Mass Acceleration by Plasma Pulses // IEEE Trans. on Magn. 1989. V. 25. № 1. P. 495.
3. *Rashleigh S.C., Marshall R.A.* Electromagnetic Acceleration of Macroparticles to High Velocities // J. Appl. Phys. 1978. V. 49. № 4. P. 2540.
4. *Tidman D.A., Massey D.W.* Electrothermal Light Gas Gun // Proc. 6th Symp. EML. USA: University of Minnesota, 1992. P. 621.
5. Будин А.В., Коликов В.А., Левченко Б.П. и др. Режимы работы разрядной камеры легкогазового ускорителя // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 8. С. 171.
6. *Rutberg Ph.G., Bogomaz A.A., Budin A.V. et al.* Experimental Study of Hydrogen Heating in Discharge Chamber of Powerful Electric Discharge Launcher // J. Prop. and Power. 1997. V. 13. № 5. P. 659.
7. Будин А.В., Коликов В.А., Левченко Б.П. и др. Коэффициенты превращения электрической энергии дуги во внутреннюю энергию рабочего газа и их доли в энергетическом балансе электроразрядного легкогазового ускорителя // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 9. С. 198.
8. *Budin A.V., Bogomaz A.A., Kolikov V.A. et al.* // Multi-pulse Discharge in the Chamber of Electric Discharge Launcher // IEEE Trans. on Magn. 1999. V. 35. № 1. P. 189.
9. *Budin A.V., Kolikov V.A., Rutberg Ph.G.* The Programmed Capacitor Storage Discharge and Other Factors Influencing on Launch Velocity and on Performance of an Electrodischarge Accelerator // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. V. 34. № 4. P. 1553.