A. V. Budin, A. A. Kiselev, V. A. Kolikov, F. G. Rutberg, Programmed input of energy into the discharge chamber of a light-gas electric-discharge accelerator of bodies,
TVT, 2008, Volume 46, Issue 1, 30–34

ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2008, том 46, № 1, с. 30–34

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, являвшейся 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^3, рабочий 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 C_1–C_6, каждый из которых подключается к нагрузке с помощью воздушных разрядников тригатронного типа P_1–P_6 (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-

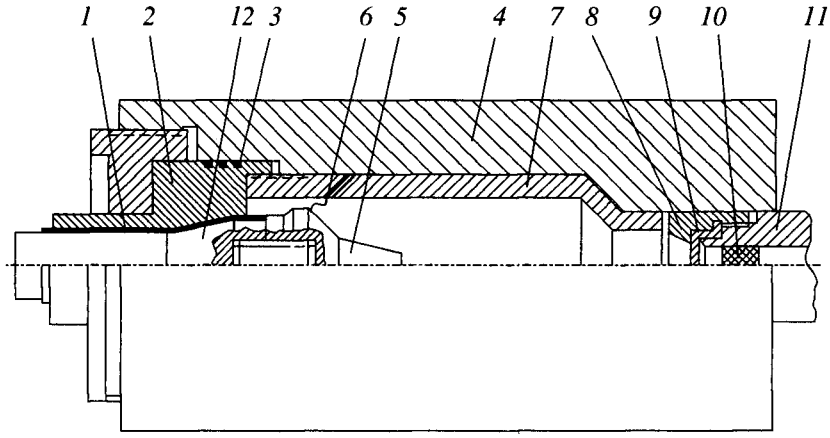

Рис. 1. Разрядная камера ускорителя: *1* – изоляция, *2* – электрододержатель, *3* – уплотнительные кольца, *4* – корпус разрядной камеры, *5* – катод, *6* – инициирующая проволочка, *7* – анодная вставка, *8* – гайка, *9* – диафрагма, *10* – метаемое тело, *11* – ствол.

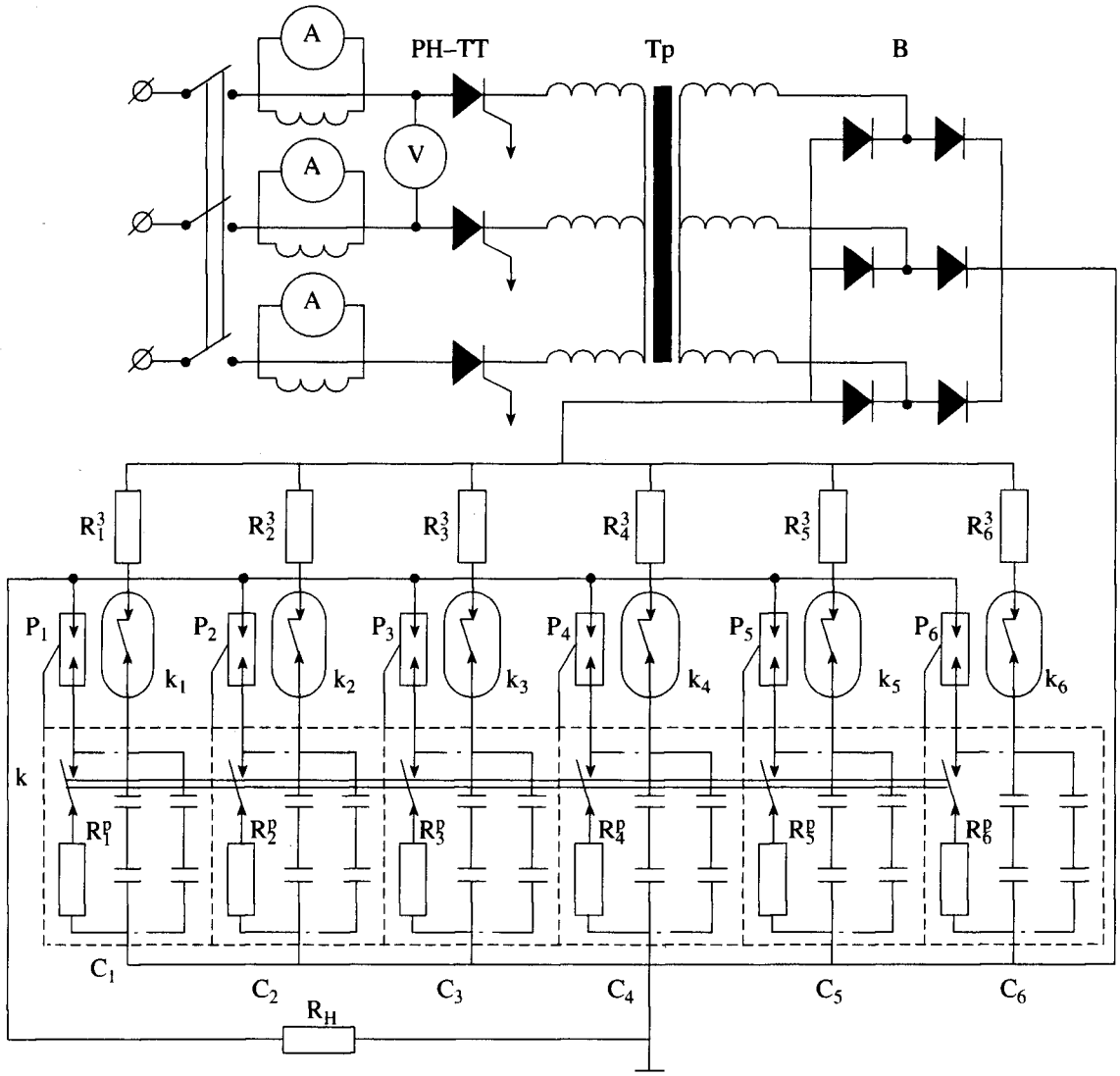

Рис. 2. Схема источника питания электроразрядного ускорителя: РН–ТТ – тиристорный регулятор напряжения, Тр – высоковольтный трансформатор, В – выпрямитель, R_1^3–R_6^3 – зарядные сопротивления, R_1^p–R_6^p – разрядные сопротивления, P_1–P_6 – воздушные тригатронные разрядники, k_1–k_6 – вакуумные выключатели,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

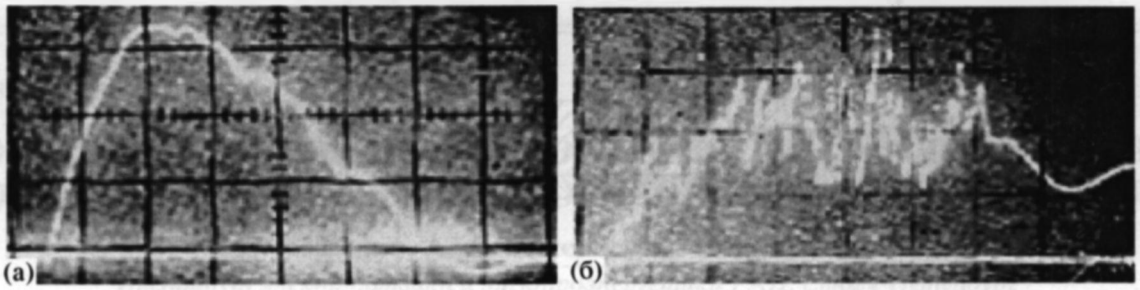

Рис. 3. Осциллограммы тока (а) и напряжения (б) в синхронном режиме: 300 кА/дел, 2 кВ/дел, 50 мкс/дел.

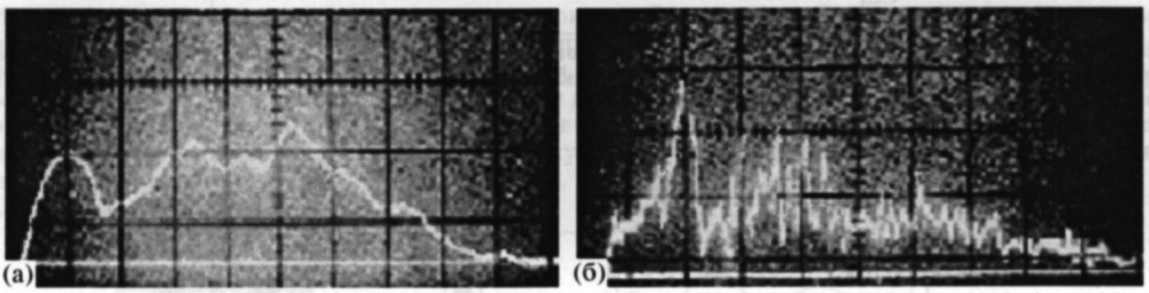

Рис. 4. Осциллограммы тока (а) и напряжения (б) в программируемом режиме: 500 кА/дел, 2 кВ/дел, 0.1 мс/дел.

мере и в стволе ускорителя использовались пьезокерамические 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 – 3×10^9 Вт, в программируемом режиме – 1.2×10^9 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

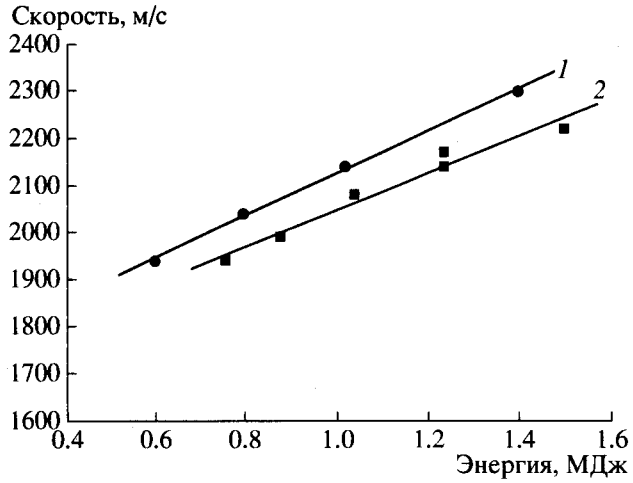

Рис. 5. Зависимости скорости метаемого тела от вложенной энергии при программируемом – *1* и синхронном – *2* режимах.

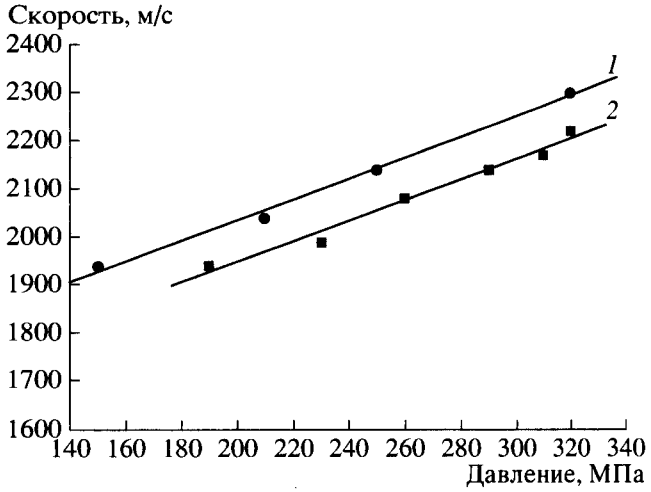

Рис. 6. Зависимости скорости метаемого тела от импульсного давления при программируемом – *1* и синхронном – *2* режимах.

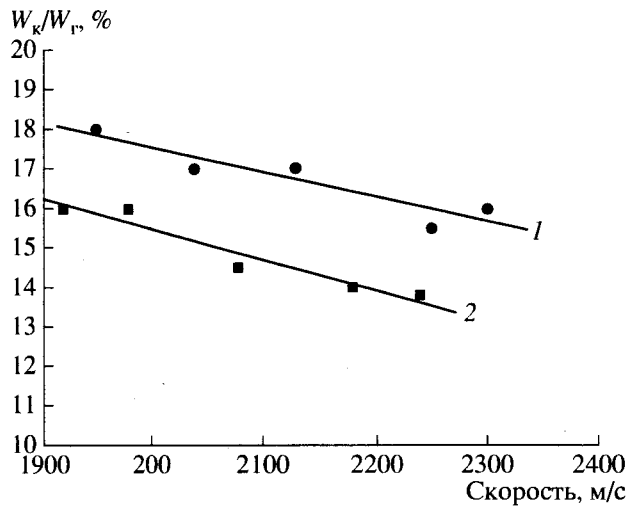

Рис. 7. Зависимости отношения кинетической энергии метаемых тел $W_к$ к внутренней энергии рабочего газа $W_г$ от скорости метаемых тел при программируемом – *1* и синхронном – *2* режимах.

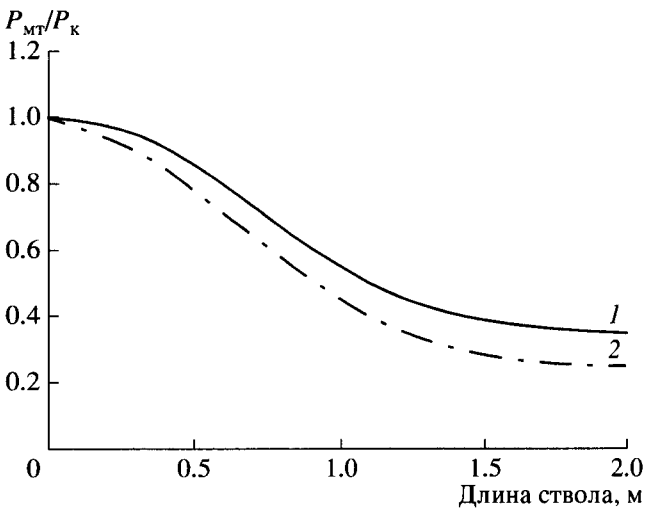

Рис. 8. Зависимость отношения давления на дно метаемого тела $P_{мт}$ к давлению в разрядной камере $P_к$ от координаты по длине ствола при программируемом – *1* и синхронном – *2* режимах.

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 $W_к$ к внутренней энергии рабочего газа $W_г$ от их скорости, выраженного в процентах. Средние величины отношения $W_к/W_г$ 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 $P_к$ 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-

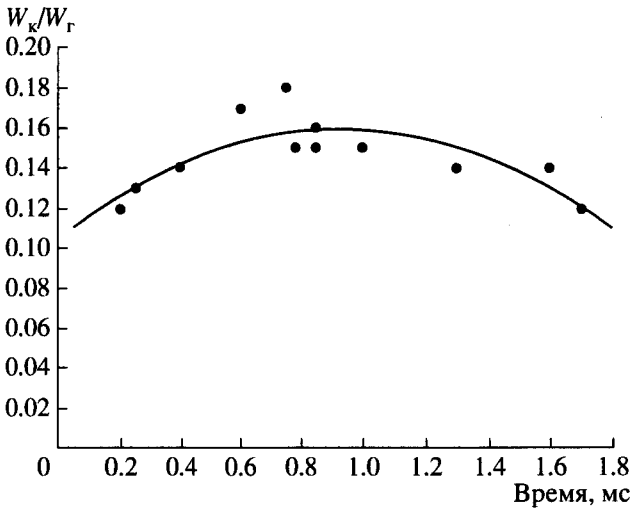

Рис. 9. Зависимость отношения кинетической энергии метаемого тела к внутренней энергии рабочего газа от длительности импульса тока.

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 вложенной 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 // AGARDograph. 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.* // Multipulse 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.