

УДК 533:621.3

## ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВНУТРЕННЕЙ БАЛЛИСТИКИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ МАКРОТЕЛ

А. А. Воробьев

Военная академия ракетных войск стратегического назначения  
им. Петра Великого, 143900 Балашиха, Россия  
E-mail: vorobievall@mail.ru

Разработана математическая модель процессов внутренней баллистики электротермического ускорителя макротел, позволяющая прогнозировать скорость метания тел при заданных значениях массогабаритных характеристик ударника, электродинамических параметров емкостного накопителя энергии, параметров ускорителя. Задача определения скорости метания тел решалась в гидродинамической постановке путем численного интегрирования уравнений движения, уравнения сохранения энергии и калорического уравнения состояния. Показано, что при отсутствии учета динамически изменяющегося коэффициента трения и процесса эрозии электродов результаты расчета и эксперимента значительно различаются, однако при этом модель качественно описывает физические процессы внутренней баллистики электротермического ускорителя.

**Ключевые слова:** электротермический ускоритель, плазма, ударник, разрядная камера, высоковольтный разряд.

DOI: 10.15372/PMTF20180402

**Введение.** В данной работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов внутренней баллистики электротермического ускорителя макротел. Электротермический ускоритель (ЭТУ) используется для моделирования воздействия микрометеоритов и частиц космического мусора на элементы конструкции и конструкционные материалы космических аппаратов в лабораторных условиях. Некоторые полученные ранее результаты приведены в работах [1, 2]. Использование ЭТУ позволяет увеличить среднескоростной диапазон ( $2 \div 4$  км/с), что является труднодостижимым для традиционных газодинамических (пороховых) ускорителей и экономически нецелесообразным при использовании легкогазовых пушек. Интерес к данным исследованиям обусловлен необходимостью адекватного моделирования высокоскоростного соударения микрометеоритов с конструкционными материалами космических аппаратов, исследования их стойкости и разработки эффективных средств и способов защиты космических аппаратов от соударений с микрометеоритами и частицами космического мусора.

Исследуемый ЭТУ включает элементы как электроразрядного ускорителя, так и легкогазовой пушки. В ЭТУ рабочее тело образуется в результате разложения водородосо-

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ и Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (грант № МК-5250.2016.8).

© Воробьев А. А., 2018

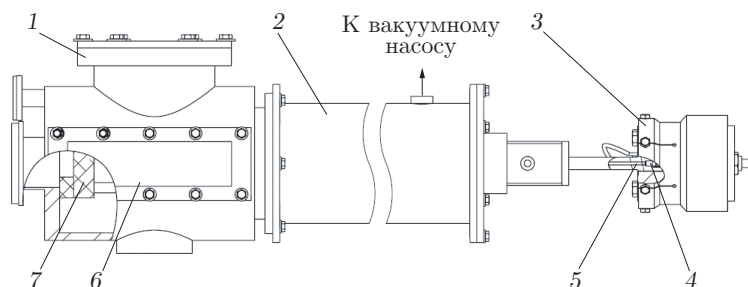


Рис. 1. Схема стэнда для экспериментальной отработки ЭТУ:

1 — диагностическая камера, 2 — вакуумная камера, 3 — электротермический ускоритель, 4 — разрядная камера, 5 — ударник, 6 — диагностическое окно, 7 — мишень

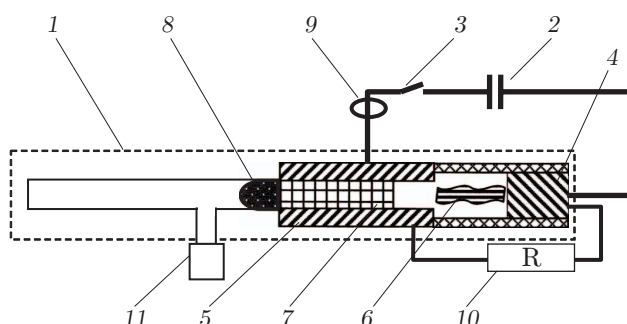


Рис. 2. Схема ЭТУ:

1 — электротермический ускоритель, 2 — емкостный накопитель, 3 — вакуумный управляемый разрядник РВУ-43, 4 — катод, 5 — полый анод, 6 — углеродная нить, 7 — рабочее тело, 8 — ударник, 9 — пояс Роговского, 10 — омический делитель, 11 — пьезоэлектрический датчик

держашего вещества под действием плазмы, образующейся при импульсном протекании электрического тока в разрядном промежутке при разряде емкостного накопителя электрической энергии, индуктивность и сопротивление разрядной цепи которого имеют малые значения, обеспечивающие большую величину разрядного тока.

Физические процессы, происходящие при высоковольтном сильноточном разряде в разрядной камере ЭТУ, имеют сходство с взрывом взрывчатого вещества вследствие протекания в цепи электрического тока большой силы за малый промежуток времени. Описание этих явлений может быть получено в результате решения системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, соответствующих законам сохранения массы, импульса и энергии.

Целью данной работы является построение математической модели процессов внутренней баллистики, позволяющей прогнозировать скорость метания тел при заданных значениях массогабаритных характеристик ударника, электродинамических параметров емкостного накопителя энергии, конструктивных параметров ЭТУ и др.

**1. Экспериментальные исследования.** Для экспериментальной отработки ЭТУ создан стэнд (рис. 1), включающий диагностическую и вакуумную камеры, ЭТУ, в котором непосредственно перед разрядной камерой устанавливался ударник. Наблюдение за мишенью осуществлялось через диагностические окна, расположенные с обеих сторон диагностической камеры. Из камер откачивался воздух до остаточного давления  $1 \div 13$  Па.

Схема ЭТУ представлена на рис. 2.

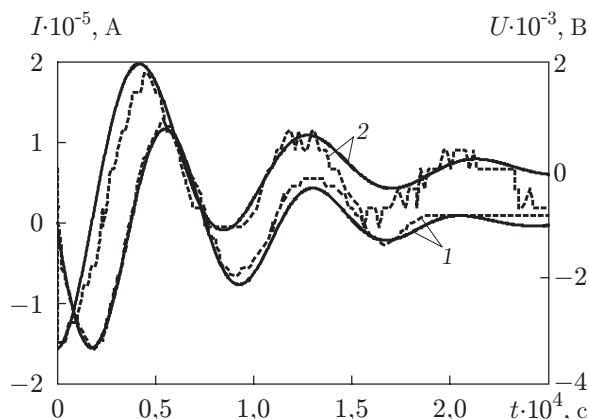


Рис. 3. Зависимости силы тока  $I$  (1) и падения напряжения  $U$  (2) в разрядном промежутке от времени:

штриховые линии — экспериментальные данные, сплошные — результат аппроксимации

Электротермический ускоритель подключался к емкостному накопителю емкостью 300 мкФ, заряжаемому при напряжении до 20 кВ с максимальной энергией 60 кДж. Коммутация осуществляется вакуумным управляемым разрядником РВУ-43 с рабочим напряжением до 30 кВ и рабочей силой тока до 350 кА. В корпусе ЭТУ имеются катод и полярный анод, частично заполненный рабочим телом, выполненным из углеводородного соединения, непосредственно за которым размещаются ствол с внутренним диаметром 4,15 мм и длиной 100 ÷ 240 мм и ударник массой 100 ÷ 300 мг. В объеме между катодом и анодом располагается инициатор разряда в виде углеродной нити. Несмотря на то что анод запрессовывается в ствол и находится в электрическом контакте с ним, разрядный ток в стволе отсутствует. Данное утверждение подтверждается экспериментальными данными [1], согласно которым величина эрозии канала ствола пренебрежимо мала по сравнению с эрозией электродов разрядной камеры.

Сила электрического тока регистрировалась поясом Роговского, падение напряжения в разрядном промежутке — омическим делителем, давление в канале ствола — пьезоэлектрическим датчиком. Общая индуктивность электрической цепи определялась экспериментально и составляла 0,7 мкГн. Начальное электрическое сопротивление разрядного промежутка равно 7 ÷ 14 Ом.

Для описания процесса ускорения ударника в ЭТУ предложена следующая физическая модель. При импульсном разряде емкостного накопителя в промежутке между катодом и анодом образуется углеродная плазма, используемая в качестве источника энергии. Затем энергия поглощается рабочим телом из углеводородного соединения, что в свою очередь вызывает резкое увеличение внутренней энергии, импульсный нагрев рабочего тела и его переход в газообразное состояние. Происходящий в дальнейшем процесс ускорения ударника аналогичен процессам, протекающим в легкогазовых пушках. Следует отметить, что большее для ЭТУ значение показателя адиабаты смеси водорода и углерода компенсируется высокой температурой газа.

В результате проведения эксперимента со следующими исходными данными: масса ударника 193 мг, длина ствола 100 мм, напряжение заряда емкостного накопителя 15 кВ, запасенная энергия 33,75 кДж, — установлено, что максимальная сила тока в разрядной камере достигает значения, равного 156 кА (рис. 3). В ходе эксперимента измерялись падение напряжения в разрядном промежутке и сила тока в разрядной цепи. Аппроксимация этих величин проводилась по формулам  $I(t) = A e^{-(Bt+C)t} \sin(\omega t + \varphi)$  (коэффициент

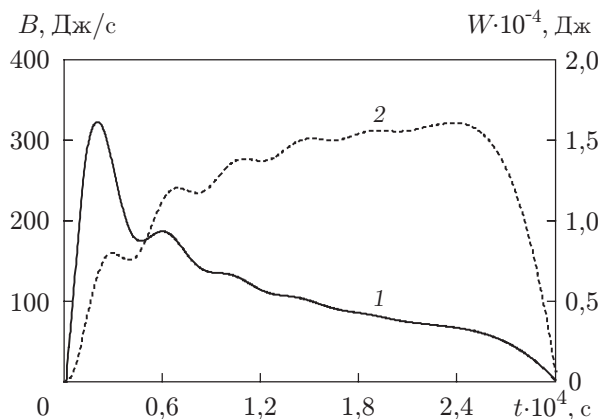


Рис. 4

Рис. 4. Зависимости скорости энерговыделения  $B$  (1) и энергии  $W$ , выделившейся в разрядном промежутке (2), от времени

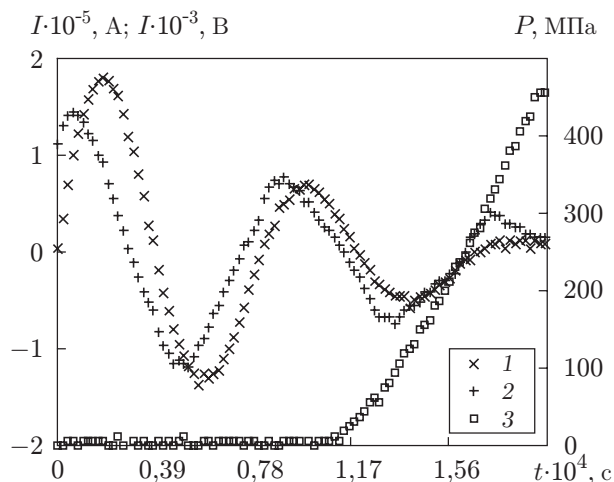


Рис. 5

Рис. 5. Зависимости силы тока  $I$  (1), падения напряжения  $U$  (2) и давления  $P$  (3) в канале ствола ЭТУ от времени

корреляции равен 0,99) и  $U(t) = (A/\cos \varphi) e^{-(Bt+C)t} \cos(\sqrt{B^2 - \omega^2} t + \varphi)$  (коэффициент корреляции равен 0,83). С использованием зависимостей силы тока и падения напряжения в разрядном промежутке от времени определена величина выделившейся энергии по формуле

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

Результаты расчетов выделившейся энергии и скорости энерговыделения (мгновенной мощности) представлены на рис. 4.

На расстоянии от разрядной камеры, равном 50 мм, был установлен пьезоэлектрический датчик давления Т10000. Результат измерения давления  $P$  представлен на рис. 5. Увеличение давления зафиксировано через 120 мкс после начала высоковольтного разряда, через 200 мкс давление достигло значения  $P = 470$  МПа.

Результаты регистрации высокоскоростного соударения алюминиевого ударника с полубесконечной алюминиевой мишенью с использованием подсветки лазерным излучением представлены на рис. 6. Скорость съемки составляла 120 000 кадр/с. На рис. 6,а показана область перед мишенью с калибровочными метками (квадраты размером  $5 \times 5$  мм) и зарегистрирован момент начала высоковольтного разряда, в который, по-видимому, начинает ускоряться ударник. Для определения момента начала высоковольтного разряда использовался светодиод (время задержки 3 мкс), запитываемый от дополнительного пояса Роговского. На рис. 6,в показана мишень, подсвеченная плазменным источником, после выхода ударника из ускоряющего канала. На рис. 6,г-ж показано движение ударника, на рис. 6,з,и — процесс высокоскоростного взаимодействия, на рис. 6,к-м — процесс разлета осколков мишени и ударника. Скорость ударника, определенная по видеокадрам, составляла 2,1 км/с.

**2. Математическая постановка задачи.** Для описания процессов внутренней баллистики ЭТУ целесообразно использовать подход, предложенный в [3]. Уравнения движения в одномерной постановке записываются в лагранжевой форме (независимыми пере-

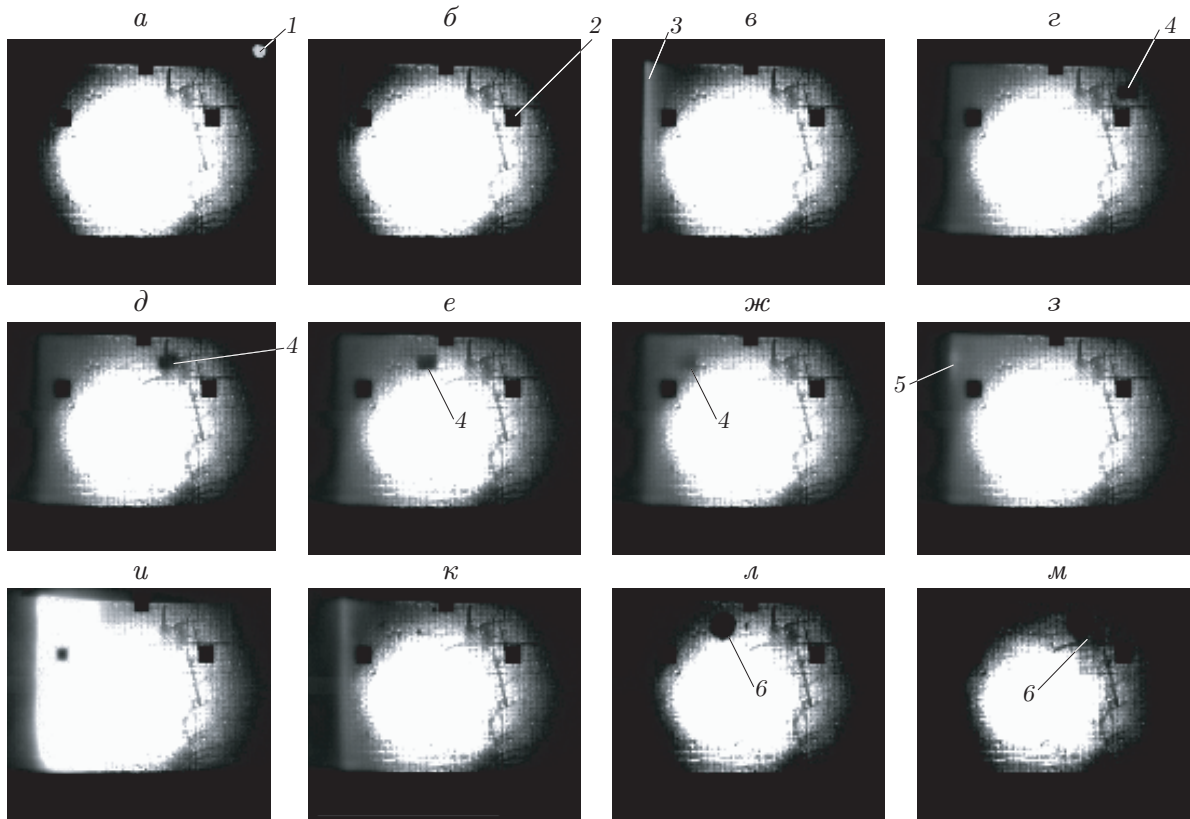


Рис. 6. Результаты скоростной видеосъемки процесса высокоскоростного метания ударника:

$a - t = 46,088$  мс,  $б - t = 46,462$  мс,  $в - t = 46,512$  мс,  $г - t = 47,036$  мс,  $д - t = 47,045$  мс,  $е - t = 47,053$  мс,  $ж - t = 47,061$  мс,  $з - t = 47,070$  мс,  $и - t = 47,078$  мс,  $к - t = 47,236$  мс,  $л - t = 47,552$  мс,  $м - t = 47,819$  мс; 1 — световой сигнал от светодиода, 2 — калибровочная метка, 3 — мишень, 4 — ударник, 5 — место удара, 6 — ударник после столкновения

менными являются время  $t$  и массовая координата  $m$ ):

$$V(x, t) = \frac{1}{\rho(x, t)} = \frac{\partial X(x, t)}{\partial m}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial m} (P(x, t) + Q(x, t)); \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -(P + Q) \frac{\partial V}{\partial t} + B(t). \quad (3)$$

Здесь  $u(x, t) = \partial X(x, t)/\partial t$  — скорость газа;  $X(x, t)$  — эйлерова координата, определяющая положение элемента газа в момент времени  $t$ ;  $x$  — лагранжева координата, определяющая

положение элемента газа в начальный момент времени;  $m(x, t) = \int_0^x \rho(x, t) dx$  — масса

газа, проходящего через единицу площади;  $\rho(x, t)$  — плотность газа;  $P$  — давление;  $Q$  — параметр, характеризующий искусственную вязкость [3, 4] и введенный для устранения математических разрывов в решении, появляющихся в тех случаях, когда сжатие приво-

дит к формированию в газе ударных волн:

$$Q(x, t) = \begin{cases} \frac{C_1(\Delta m)^2}{V} \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right|^2, & \frac{\partial V}{\partial t} < 0, \\ 0, & \frac{\partial V}{\partial t} \geq 0, \end{cases}$$

$\Delta m$  — элемент массы;  $V(x, t)$  — удельный объем газа;  $C_1$  — параметр, значение которого для данной задачи выбрано равным 6,0;  $E(x, t)$  — плотность энергии газа;  $B(t)$  — интенсивность источника тепла (отнесенная к единице массы газа скорость, с которой энергия передается газу). В случае ЭТУ интенсивность источника тепла представляет собой величину энергии, выделившейся в разрядном промежутке при разряде емкостного накопителя электрической энергии. Величина  $B(t)$  может быть получена экспериментально (при измерении силы тока и падения напряжения в разрядном промежутке) или аналитически (если известны электродинамические параметры электрической цепи и накопителя: емкость накопителя, активное и реактивное сопротивления цепи, напряжение заряда накопителя).

В уравнение движения ударника в стволе входят скорость и давление газа на основании ударника:

$$M_{pr} \frac{du(x_{pr}, t)}{dt} = P(x_{pr}, t)A - F_{fr}.$$

Здесь  $A$  — площадь поперечного сечения ствола;  $F_{fr}$  — сила сопротивления, которая вводится в предположении, что все потери энергии, происходящие при движении ударника, обусловлены наличием силы трения между снарядом и стенкой ствола, прямо пропорциональной давлению на ударник:

$$F_{fr} = fP(x_{pr}, t)A.$$

Таким образом, формула для скорости ударника записывается в виде

$$\frac{du(x_{pr}, t)}{dt} = \frac{P(x_{pr}, t)A}{M_{pr}} (1 - f), \quad (4)$$

где  $f$  — коэффициент трения, значение которого в расчетах принималось равным 0,6;  $M_{pr}$  — масса ударника.

Калорическое уравнение состояния имеет такой же вид, как и при описании детонации взрывчатых веществ:

$$P = E\rho[\gamma(\rho) - 1] \approx E\rho \frac{0,09 + \rho^2}{0,3 + \rho^2}. \quad (5)$$

Система уравнений (1)–(5) замыкается термическим уравнением состояния

$$T = PV/R,$$

где  $R = 47$  Дж/(кг · К) — газовая постоянная для смеси сублимированного углеводорода в разрядной камере ЭТУ.

**3. Алгоритм решения задачи.** Рассматриваемая гидродинамическая задача решается путем численного интегрирования уравнений движения (2), (4), уравнения сохранения энергии (3) и калорического уравнения состояния (5) с использованием разностной схемы [5]. Эти уравнения можно записать в конечно-разностной форме в порядке их решения:

$$u_j^{n+1/2} = u_j^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\Delta m} [P_{j+1/2}^n - P_{j-1/2}^n + Q_{j+1/2}^{n-1/2} - Q_{j-1/2}^{n-1/2}],$$

$$u_{j_{\max}}^{n+1/2} = u_{j_{\max}}^{n-1/2} + \frac{S_{pr}}{M_{pr}} P_{j_{\max}}^n (1 - f),$$

$$X_j^{n+1} = X_j^n + u_j^{n+1/2} \frac{\Delta t}{2}, \quad V_{j-1/2}^{n+1} = \frac{X_j^{n+1} - X_{j-1}^{n+1}}{0,5\Delta m}.$$

Искусственная вязкость аппроксимируется следующим образом:

$$Q_{j-1/2}^{n+1/2} = \begin{cases} \frac{2C_1(\Delta m)^2(V_{j-1/2}^{n+1} - V_{j-1/2}^n)^2}{(V_{j-1/2}^{n+1} + V_{j-1/2}^n)(0,5\Delta t)^2}, & V^{n+1} < V^n, \\ 0, & V^{n+1} \geq V^n. \end{cases}$$

Уравнение сохранения энергии записывается в виде

$$E_{j-1/2}^{n+1} = E_{j-1/2}^n - [P_{j-1/2}^{n+1/2} + Q_{j-1/2}^{n+1/2}](V_{j-1/2}^{n+1} - V_{j-1/2}^n) + B_{1/2}^{n+1/2},$$

где

$$P_{j-1/2}^{n+1/2} = E_{j-1/2}^n \rho_{j-1/2}^n \frac{0,09 + (\rho_{j-1/2}^n)^2}{0,3 + (\rho_{j-1/2}^n)^2},$$

$n > 1$ ;  $1 \leq j \leq j_{\max}$  ( $j = 1$  — номер ячейки в начале разрядной камеры,  $j = j_{\max}$  — номер ячейки, примыкающей к ударнику).

Элементы массы  $\Delta m$  не меняются в течение всего решения. Используется явная схема с величиной шага по времени, определяемой условиями устойчивости:

$$\Delta t \leq \Delta m \sqrt{V/(\gamma P)}.$$

Условие устойчивости для искусственной вязкости имеет вид

$$\Lambda = 8C_1 |V_{j-1/2}^{n+1} - V_{j-1/2}^n| V_{j-1/2}^{n+1} + V_{j-1/2}^n \leq 1,$$

где  $C_1 = 6$ .

В результате численного решения системы уравнений (1)–(5) получены зависимости давления, скорости ударника, плотности газа и температуры газа от времени и длины ствола. Приняты следующие допущения и предположения: коэффициент трения равен 0,6 (значение коэффициента трения скольжения для алюминия и стали), газовая постоянная для рабочего тела — 47 Дж/(кг · К), давление, при котором ударник начинает движение, — 0,4 МПа, начальная плотность рабочего тела, представляющего собой сублимированный углеводород, — 0,7 кг/м<sup>3</sup>. В расчетах энергия, необходимая для перевода рабочего тела в газообразное состояние, вычиталась из общей энергии, выделившейся в разрядном промежутке.

На рис. 7 приведены зависимости давления от времени в различных сечениях канала ствола. Кривая 5 соответствует сечению, расположенному наиболее близко к ударнику.

На рис. 8 представлена зависимость скорости ударника от времени, на рис. 9 — зависимости давления на основании ударника и скорости ударника от длины ствола, на рис. 10 — зависимости скорости ударника, давления, выделившейся энергии от времени и положения ударника.

Согласно разработанной математической модели для ствола длиной 100 мм достигается скорость ударника, равная 2,7 км/с. В эксперименте получена скорость ударника, равная 2,1 км/с. Такое различие объясняется, по-видимому, отсутствием учета в модели процесса эрозии электродов разрядной камеры и как следствие увеличением общей массы и средней молярной массы рабочего тела, что приводит к уменьшению предельной скорости звука в рабочем теле и скорости метания в целом. Также достоверно не известна

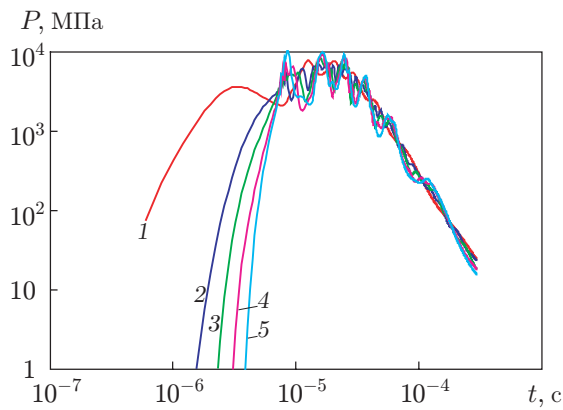


Рис. 7

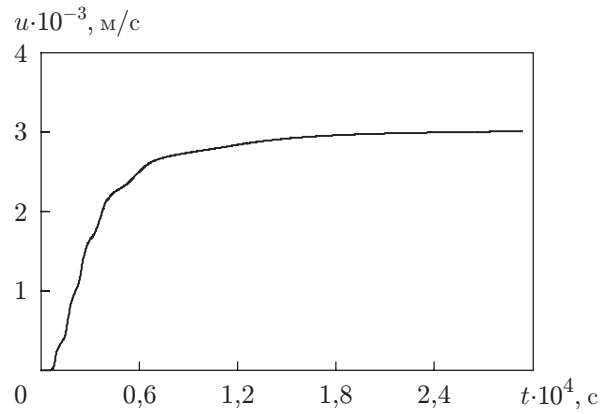


Рис. 8

Рис. 7. Зависимость давления в различных сечениях ствола от времени:  
 1 — сечение, прилегающее к разрядной камере, 5 — сечение, расположенное наиболее близко к ударнику, 2–4 — промежуточные сечения

Рис. 8. Зависимость скорости ударника  $u$  от времени

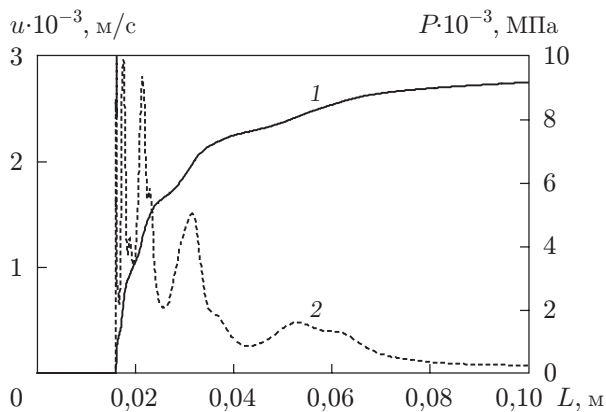


Рис. 9

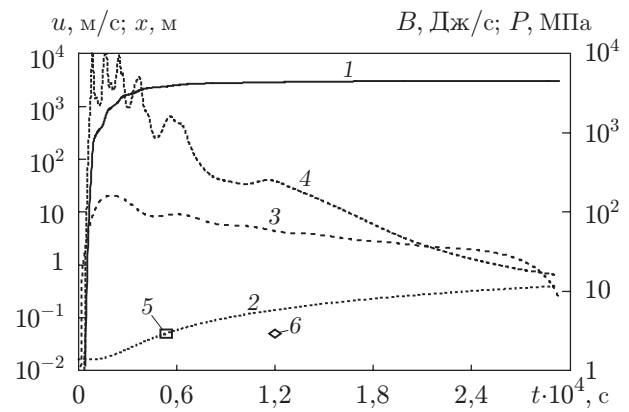


Рис. 10

Рис. 9. Зависимости скорости ударника  $u$  (1) и давления на его основание  $P$  (2) от длины ствола  $L$

Рис. 10. Зависимости скорости ударника (1), положения ударника (2), скорости энерговыделения (3), давления на основание ударника (4) от времени и положение ударника в моменты времени  $t = 50$  мкс (5) и  $t = 120$  мкс (6):

1, 2, 4, 5 — результаты расчета, 3, 6 — экспериментальные данные



зависимость коэффициента трения от скорости ударника. Согласно результатам эксперимента расстояние, равное 50 мм, ударник проходит за 120 мкс, а согласно результатам расчетов по модели — за 60 мкс (см. рис. 5, 10).

**Заключение.** В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований получена математическая модель, позволяющая оценивать скорость метания ударников с использованием электротермической технологии метания. В качестве исходных данных используются массогабаритные характеристики ударника (масса, диаметр), электродинамические параметры емкостного накопителя энергии (емкость, индуктивность, сопротивление), параметры ЭТУ (размер разрядной камеры, длина ствола), параметры рабочего тела (плотность, энергия сублимации). Вследствие отсутствия в модели учета процесса эрозии электродов разрядной камеры и динамически изменяющегося коэффициента трения результаты расчетов скорости и расстояния, пройденного ударником, существенно отличаются от экспериментальных данных. Несмотря на это, разработанная математическая модель качественно описывает физические процессы, происходящие в разрядной камере и внутри ствола ЭТУ. Учет в модели эрозии электродов и высокоскоростного трения позволит провести многопараметрическую оптимизацию существующего образца ЭТУ. Также данная модель может быть использована при проектировании новых образцов с увеличенным запасом электрической энергии и предназначенных для метания больших масс.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Spitsin D. D., Zikova T. S., Vorobiev A. A., et al.** Development of two-stage electro-thermal way to accelerate solid bodies // Proc. conf. “Physics of extreme states of matter — 2013”, Elbrus, 1–6 Mar. 2013. S. 1.: Joint Inst. for High Temperatures of the Russ. Acad. of Sci., 2013. P. 72–76.
2. **Сахаров М. В., Воробьев А. А., Уткин А. В. и др.** Автоматизация экспериментального стенда отработки электротермического ускорителя // Вопр. электромеханики. 2015. Т. 144, № 1. С. 36–42.
3. **Бруд Г.** Расчеты взрывов на ЭВМ. Газодинамика взрывов. М.: Мир, 1976. (Механика. Новое в зарубежной науке; № 4).
4. **Рихтмайер Р.** Разностные методы решения краевых задач / Р. Рихтмайер, К. Мортоп. М.: Мир, 1972.
5. **Brode H. L.** A program for calculating radiation flow and hydrodynamics / H. L. Brode, W. Asano, M. Plemmons, L. Scantlin, A. Stevenson. Santa Monica: RAND Corp., 1967.

*Поступила в редакцию 23/VIII 2017 г.,  
в окончательном варианте — 13/XI 2017 г.*