

# "Легкоплазменный" электротермический ускоритель

А. В. Козлов, А. В. Котов, В. П. Полищук и А. В. Шурупов

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва  
125412, Россия

E-mail: kozlov@fites.ru

Статья поступила в редакцию 21 ноября 2018 г.

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных исследований ускорителя макротел, работающего на плазме смеси водорода и углерода, при высоком темпе нарастания тока — порядка 30 кА/мкс. В качестве ударников использовались дюралюминиевые цилиндры диаметром 3 мм и массой 70 мг. Достигнута скорость метания 4.2 км/с. Эффективность преобразования энергии, запасенной в конденсаторной батарее, в кинетическую энергию ударника составила 1%. Рассматривается гипотеза о влиянии резонансной деформации канала, развивающейся под действием движущегося фронта высокого давления, на скорость метания. <https://doi.org/10.33849/2018104>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В электротермических ускорителях (ЭТУ) разгон ударников происходит под действием давления плазмы, создаваемой импульсным сильноточным разрядом. Скорость метания тел в ЭТУ ограничена скоростью расширения плазмы, которая в этом устройстве не может превысить скорость звука. Поэтому для получения высокой скорости метания необходимо создать плазму с максимально высокой температурой и низкой молекулярной массой. Молекулярный вес плазмы в ЭТУ, в значительной степени, определяется материалами, из которых изготовлены электроды, изоляторы и инициатор разряда. Температура плазмы в ЭТУ возрастает с увеличением скорости подвода энергии или темпа роста тока. В работе представлены результаты исследований характеристик ЭТУ, в котором рабочим телом являлась плазма смеси водорода и углерода. Для обеспечения высокого значения температуры плазмы использовались «жесткие» режимы с темпом нарастания тока около 30 кА/мкс. При таких условиях можно ожидать скорости метания на уровне 10 км/с. В пользу этого предположения свидетельствуют результаты работы [1], в которой в ЭТУ была получена скорость метания 5.2 км/с при использовании относительно «тяжелого» дюралевого инициатора и сравнительно медленного ввода энергии в ЭТУ. Скорость увеличения тока в экспериментах [1] была около 3 кА/мкс.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В качестве источника энергии использовалась конденсаторная батарея (КБ) емкостью 450 мкФ с номинальной энергией 90 кДж при напряжении зарядки 20 кВ. Максимальное значение тока в ЭТУ, около 0.5 МА, достигалось за время 14 мкс. Суммарная индуктивность ЭТУ составляла около 0.2 мкГн.

Разряд зажигался в полости медного анода объемом около  $0.2 \times 10^{-6}$  м<sup>3</sup>, заполненной смесью водорода и углерода (герметиком). Использование такой плазмообразующей среды позволяло получать сравнительно «легкую» плазму, несмотря на интенсивную эрозию электродов.

Медный анод с диаметром полости 5 мм был запрессован в стальной канал. Диаметр цилиндрического медного катода — 7 мм, расстояние катод–анод было 4 мм, расстояние от катода до ударника — 12 мм. Для изоляции катода использовалась втулка из стеклотка-

ни с толщиной стенки 1 мм. Начальный контакт между электродами создавался с помощью тонкой углеродной нити. По оценкам, средняя молекулярная масса плазмообразующей среды составляла около 10 атомных единиц, суммарная масса плазмообразующего вещества и ударника — 0.2 г.

В большинстве экспериментов разгон ударников проводился в стальном канале длиной 0.12 м, имевшем центральное отверстие 3 мм, наружный диаметр канала составлял 18 мм. Ударник представлял собой дюралевый цилиндр диаметром 3 мм и массой  $m_0$  70 мг. Внутренний диаметр канала был на  $\sim 0.1$  мм меньше диаметра ударника.

Была выполнена серия предварительных экспериментов по метанию более крупных ударников массой 120–200 мг в канале диаметром 5.45 мм. Внешний диаметр канала равнялся 42 мм, длина рабочего участка канала — 180 мм. В этих экспериментах ударники изготавливались из поликарбоната или дюралюминия. Проводились также эксперименты с «холостыми» выстрелами (без ударников) углеродной или литиевой плазмой. Для улучшения электроизоляции ЭТУ помещался в капролоновый корпус, который заполнялся трансформаторным маслом.

Ток в ЭТУ измерялся с помощью пояса Роговского, напряжение на разряде — трансформатором тока. Момент столкновения ударника с мишенью, в качестве которых использовались дюралевые диски толщиной 6–10 мм, определялся контактным датчиком. Контактный датчик представляет собой плоский конденсатор, одной обкладкой которого являлась мишень, второй — дюралевая фольга. Обкладки разделяются диэлектрической пленкой толщиной 0.1 мм. Сигнал с датчика поступает при пробитии конденсатора ударником. Время реакции датчика — около 0.1 мкс.

Ствол ЭТУ и мишени устанавливались в вакуумную трассу с давлением остаточных газов менее 10 Па, которая была изготовлена из стальной трубы длиной 1.2 м. На трубе имелись диагностические окна, служившие для фиксации движения фронта плазмы с помощью фотодиодов и определения момента вылета ударника из канала по прерыванию им лазерного луча («световой» нож). По моменту вылета ударника из ствола определялась его средняя скорость в канале ЭТУ, начиная с момента запуска разряда. Скорость ударника на баллистической трассе  $u_p$  рассчитывалась исходя из разности между временем столкновения ударника с мишенью



Рисунок 1. Ствол ускорителя после выстрела,  $m_0 = 70$  мг.

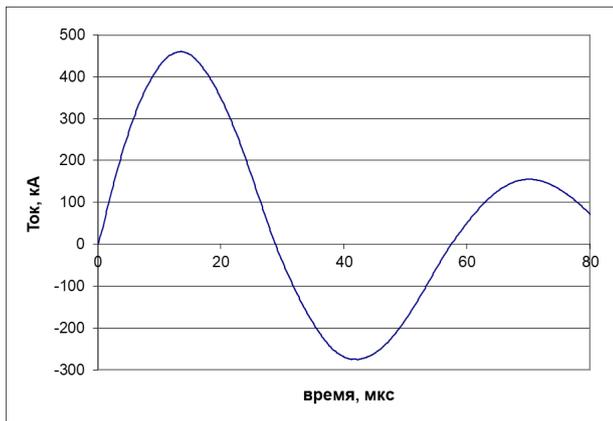


Рисунок 2. Осциллограмма тока в ЭТУ,  $m_0 = 70$  мг.

и временем его вылета из ствола. Погрешность определения скорости ударника на баллистической трассе, по оценкам, не превышала 5%. Средняя скорость ударника в канале ЭТУ составляла 50–70% от скорости его вылета.

Конструкция ЭТУ, исследованного нами, практически полностью подобна ускорителю, описанному в работе [2].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Во время выстрела узлы ЭТУ испытывали ударные тепловые и механические нагрузки. В одном из экспериментов это привело к появлению на стволе трещин длиной до 60 мм (рисунок 1). После эксперимента медный катод заметно «оплывал», изолирующая втулка разрушалась. Значительно более высокую стойкость продемонстрировал катод из молибдена.

На рисунке 2 приведена осциллограмма тока в ЭТУ; КБ была заряжена до напряжения 12 кВ. Скорость ударника, вылетевшего из ствола через 55 мкс после подачи напряжения, в этом эксперименте составила 3.8 км/с. Напряжение на разряде в течение первого полупериода тока было около 1 кВ. К моменту вылета ударника из ствола в разряде выделилась энергия 27 кДж.

При скорости  $\approx 4$  км/с ударник массой 70 мг пробивал насквозь мишень толщиной 6 мм (отверстие в центре мишени на рисунке 3). Более массивный дюралевый ударник массой 200 мг (калибр 5.45 мм) при скорости 3.3 км/с насквозь пробивал мишень толщиной 10 мм. Максимальная скорость тела, полученная в описанных



Рисунок 3. Дюралевая мишень после «выстрела»,  $u_p = 3.8$  км/с.

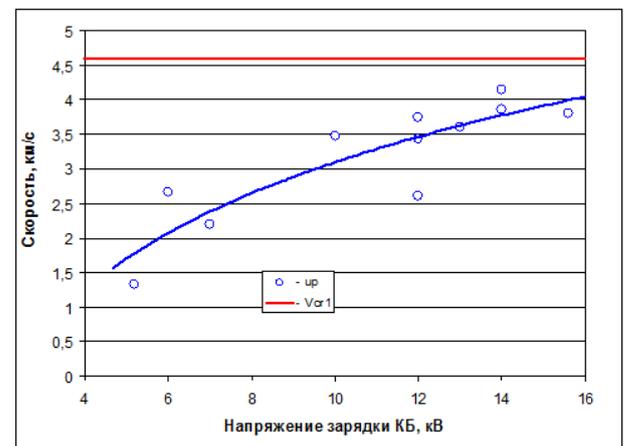


Рисунок 4. Зависимость скорости ударника от напряжения зарядки КБ.

экспериментах, достигла 4.2 км/с. По оценкам, при такой скорости метания давление в стволе ЭТУ должно быть около 0,7 ГПа. В эксперименте, после которого на стволе появились трещины (рисунок 1), скорость ударника была 2.9 км/с. Напряжение на КБ в этом опыте составляло 14 кВ.

На рисунке 4 приведена зависимость скорости ударника массой 70 мг от напряжения зарядки КБ для тех экспериментов, в которых не произошло разрушение ствола. Эффективность преобразования энергии, запасенной в КБ, в кинетическую энергию ударника (интегральный КПД ускорителя  $\eta_0$ ) при его максимальной скорости составляла  $\approx 1\%$ . При напряжении зарядки КБ свыше 14 кВ просматривается насыщение зависимости скорости ударника от напряжения.

При напряжении на накопителе 12 кВ был проведен «холостой» выстрел при той же массе плазмообразующего вещества, что и в экспериментах с ударниками. Для удержания давления в камере в начальный момент плазмообразующий герметик помещался в полиэтиленовую оболочку. Средняя скорость плазмы в канале ЭТУ

была 6.7 км/с, на расстоянии 70 мм от среза ствола скорость переднего фронта плазмы достигла 16 км/с. В канале калибром 5.45 мм при атмосферном давлении была проведена серия экспериментов по «стрельбе» литием массой 0.2 г, который заполнял капилляр длиной 15 мм и диаметром 2 мм. При увеличении напряжения зарядки КБ с 4 до 9 кВ средняя скорость плазмы лития в канале ЭТУ увеличилась с 5.7 до 9 км/с.

#### 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Максимальная скорость ударника оказалась заметно меньше ожидаемой — КПД ускорителя  $\eta_0$  оказался на уровне 1%. По данным работы [3] при скорости метания на уровне 5 км/с КПД такого типа ускорителей составляет 3–5%.

В работе [2], в которой для разгона дюралевых ударников массой 55 мг использовался ЭТУ, аналогичный нашему, утверждается, что удалось достичь скорости метания 14.9 км/с. Однако метод изменения скорости, использованный в работе [2], представляется весьма спорным — момент соударения ударника с мишенью определялся по появлению на нем скачка потенциала, около 50 В, а не контактным датчиком, как в наших экспериментах. Потенциал на поверхности мишени мог наводиться потоком плазмы, которая после вылета ударника из ствола обгоняла его, тем более что в состав плазмы входил водород. Высокая скорость потока плазмы в ЭТУ, на уровне 15 км/с, подтверждается нашими экспериментами с «холостыми» выстрелами. Поэтому значения скорости ударника, приведенные в работе [2], представляются завышенными. Отметим, что сквозное отверстие на фотографии дюралевой мишени, приведенной в работе [2], вполне аналогично тому, что было получено в наших экспериментах при скорости ударника 3.8 км/с (рисунок 3).

В работе [4] сообщалось о получении высоких скоростей метания, на уровне 10 км/с, в ЭТУ, в котором в качестве плазмообразующей среды применялся литий. В экспериментах [3] использовалась КБ с максимальной запасаемой энергией 3.8 кДж. Ударники, изготовленные из алюминиевых сплавов, имели массу около 30 мг. Скорость ударников определялась методом баллистического маятника. Однако такой метод может приводить к большой погрешности, так как в условиях ЭТУ практически невозможно по отдельности учесть импульсы плазмы и ударника, скорость которого может быть заметно меньше скорости плазмы. При скорости 10 км/с кинетическая энергия ударника равняется 1.5 кДж, то есть интегральный КПД ускорителя был около 40%.

По-видимому, скорость метания в работе [4] была завышена примерно вдвое. В наших экспериментах энергия, запасаемая в КБ, была примерно в 20 раз больше, а длительность разряда — вдвое короче, чем в экспериментах [4], поэтому при сопоставимой массе ударников скорость метания должна быть более высокой. Из оценок в приближении адиабатического расширения плазмы в канале ЭТУ следует, что работа расширения составляет около 30% от энергии, выделившейся в разряде. Соответственно, при напряжении зарядки КБ 16 кВ скорость суммарной метаемой массы 0.2 г (ударник и плазма) должна была достигнуть  $\approx 7$  км/с.

Отличие измеренной скорости от ожидаемой может быть приписано увеличению массы плазмообразующей среды за счет эрозии стенок канала и потерь энергии за счет излучения и теплопроводности [3]. Однако экспериментально проверить действенность этих факторов до сих пор не удалось, поэтому могут существовать и другие механизмы, ограничивающие скорость метания.

Из теории оболочек известно, что при движении в них фронта высокого давления возникает резонансная деформация канала (РДК), которая проявляется в резком увеличении амплитуды его деформации [5]. Этот эффект имеет место, если скорость фронта давления оказывается сопоставимой со скоростью звука в материале оболочки. При возникновении РДК в канале ЭТУ резко увеличивается сила трения ударника о стенки, что должно приводить к ограничению скорости метания, или, по крайней мере, к значительному снижению эффективности работы ускорителя. В теории оболочек показано, что существуют две критические скорости, при которых происходит резкое увеличение амплитуды деформации канала [5]. Первая критическая скорость связана с изгибом канала, вторая — с развитием продольных колебаний. Значения критических скоростей зависят от геометрии канала и свойств материала стенки.

В работе [5] в приближении Тимошенко–Лява рассчитывалась деформация цилиндрической оболочки толщиной  $h$  под действием нагрузки, имеющей вид дельта-функции и движущейся с постоянной скоростью. Для первой критической скорости с точностью до членов порядка  $h^2/a^2$  ( $a$  — средний радиус оболочки) в [5] получено соотношение:

$$V_{cr1}^2 = \frac{hE}{\rho a \sqrt{3(1-\mu^2)}} \left(1 - \frac{h\mu^2}{a\sqrt{12(1-\mu^2)}}\right) \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность материала оболочки,  $E$  — модуль Юнга,  $\mu$  — модуль Пуассона. Расчет по теории оболочек правомерен, если выполнено условие:  $h/a \ll 1$ . Однако и при  $h/a \approx 1$  погрешность расчета критической скорости по соотношению (1) не слишком велика. Как следует из результатов численных расчетов методом конечных элементов [6], при  $h/a \approx 1$  соотношение (1) завышает значение  $V_{cr1}$  для стальной трубы примерно на 10%. Для использованного стального канала ЭТУ первая критическая скорость составляет 4.6 км/с ( $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $E = 78$  ГПа,  $\mu = 0.28$  [7]). Вторая критическая скорость, при которой происходит раскочка продольных колебаний, близка к продольной скорости звука в стенке канала. Для используемого ствола вторая критическая скорость составляет  $\approx 6$  км/с.

Прямая линия на рисунке 4 соответствует первой критической скорости развития РДК. Как видно, критическая скорость близка к максимальной полученной скорости метания в ЭТУ (4.2 км/с), особенно если учесть, что расчет по формуле (1) завышает значение критической скорости примерно на 10%.

Отметим, что в наших экспериментах с магнито-плазменным ускорителем макротел [8] было показано, что явление резонансной деформации канала снижает эффективность работы и этого типа метательных установок.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резонансная деформация канала электротермического ускорителя под действием движущегося фронта высокого давления является существенным фактором, определяющим скорость метания. Этот же эффект может оказывать негативное влияние на характеристики и других высокоскоростных метательных устройств, в которых разгон ударников происходит под действием высокого давления, если их скорость оказывается сопоставимой со скоростью звука в стенках канала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rott M 1993 *IEEE Trans. Magn.* **29** 597–605
2. Spitsyn D D, Zikova T S, Yanevskiy V D and Vorobiev A A 2011 Experimental research of micrometeorites impact on spacecrafts in laboratory environment *XXVI Int. Conf. on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter* ed Fortov V E *et al* (Chernogolovka: Printing House of IPSP) p 59
3. Рутберг Ф Г и Савватеев А Ф 2004 Гиперскоростные электроразрядные ускорители макротел *Гидродинамика высоких плотностей энергии. Труды международного семинара* ред. Швецов Г А (Новосибирск: Институт гидродинамики СО РАН) с. 267–281
4. Vomelburg H 1959 *J. J. Appl. Phys.* **30** 1467–1468
5. Jones J P and Bhuta P G 1964 *J. Appl. Mech. ASME Trans.* **31** 105
6. Lewis K B and Nechitailo N V 2007 *IEEE Trans. Magn.* **43** 126
7. Григорьев И С и Мейлихов Е З (ред.) 1991 *Физические величины. Справочник* (Москва: «Энергоатомиздат»)
8. Kozlov A V, Kotov A V, Polistchook V P, Shurupov A V and Shurupov M A 2017 *J. of Physics: Conf. Series* **927** 012027