

12

Особенности ускорения тел миллиграммовой массы в рельсовых электромагнитных ускорителях с внешним импульсным магнитным полем

© С.А. Поняев, Б.И. Резников[¶], Р.О. Куракин, П.А. Попов, Б.Г. Жуков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

[¶] E-mail: boris.reznikov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 4 октября 2018 г.

В рельсотроне с внешним импульсным магнитным полем осуществлен разгон ударников из поликарбоната при атмосферном давлении в воздухе. Выполнен расчет динамики ускорения ударников. Проведено сравнение скорости в выходном сечении при питании цепей рельсотрона и внешнего поля от двух независимых источников энергии (схема 1) и при последовательном подключении цепей к одному источнику питания (схема 2). Установлено, что для двухмиллиметрового канала эффективный коэффициент эрозии рельсов, учитывающий только захваченную плазменным поршнем эрозионную массу, равен 1.5–1.7 mg/C, а вовлеченная в движение эрозионная масса сравнима с массой ударника. Показано, что при использовании схемы 1 с опережающим подключением цепи внешнего поля ударник разгоняется при максимальной индукции поля, и скорость ударника в выходном сечении канала превышает 6 km/s.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.02.47214.17550

Идея разгона твердых тел малого размера (1–3 mm) до высоких скоростей для доставки топлива в зону термоядерных реакций, диагностики горячей плазмы и управления режимами работы реактора остается актуальной с конца прошлого столетия [1–4]. Кроме того, инъекция пеллетов рассматривалась как средство для быстрого охлаждения плазмы и вывода тока в случае аварийной ситуации и опасности большого срыва [3,5,6]. Для установок типа ITER доставка вещества в центральные зоны реактора потребует скоростей пеллетов 5 km/s и выше [1,4–6]. Другие направления использования быстрых макрочастиц включают моделирование активного космического эксперимента [7] и исследование высокоскоростного удара [8].

В работе [9] дано описание разработанного в ФТИ им. А.Ф. Иоффе компактного рельсового ускорителя, разгоняющего пластиковые кубики со стороной 1–2 mm и массой 1–10 mg до скоростей 5–6 km/s. Потери энергии в каналах при катастрофической эрозии электродов на начальных участках разгона были преодолены наложением дополнительного внешнего импульсного магнитного поля, сонаправленного с собственным полем рельсотрона и сопоставимого с ним по величине (~ 10 T). Цель настоящей работы — сравнение различных схем питания цепей рельсотрона и внешнего поля и верификация модели динамики ускорения.

Использовался малогабаритный ускоритель квадратного сечения $A = h^2$ калибром $h = 2$ mm с длиной канала $l = 16$ cm, разгоняющий в воздухе при атмосферном давлении ударники массой $m_0 \approx 10$ mg. Погонная индуктивность рельсов $L' \approx 0.21$ μ N/m. Основные детали эксперимента и схема ускорителя описаны в [9]. Дополнительное внешнее магнитное поле в канале создавалось двумя последовательно соединенными одновит-

ковыми катушками, расположенными симметрично по обе стороны канала ускорителя. Направление этого поля совпадало с направлением магнитного поля рельсотрона. В настоящей работе исследовались две схемы питания цепей рельсотрона и внешнего поля: питание каждой цепи от независимого источника энергии (схема 1) и подключение к единственному источнику энергии последовательного соединения рельсов-электродов и двух одновитковых катушек (схема 2). Схема 1 позволяла варьировать момент подачи импульса тока на витки подмагничивания и проводить начальную стадию разгона при значениях магнитной индукции, близких к максимальному. При использовании схемы 2 магнитная индукция внешнего поля $B \sim i_w(t)$ равна нулю в момент подачи импульса тока $i_w(t)$ на электроды и нарастает вместе с рабочим током, что значительно уменьшает скорость ударника на начальной стадии разгона. Измерение поля B в канале проводилось датчиком, который предварительно калибровался с помощью специальных катушек Гельмгольца, рассчитанных на пропускание больших импульсных токов. Измерения показали, что поле мало менялось по длине канала, имело максимальное значение в середине канала и уменьшалось (не более 10%) в казенной части и (в меньшей степени) к выходному сечению. Из-за диффузии поля коэффициент взаимной индукции витков уменьшался со временем. Скорость ударника измерялась в свободном полете по показаниям двух датчиков и относилась к измерительному сечению посередине между датчиками (см. пояснение к таблице). Скорость в выходном сечении $v(l)$ и время вылета $t(l)$ определялись с поправкой на торможение ударника в полете между выходным сечением канала и измерительным сечением.

Результаты экспериментов

Номер опыта	$B_{\max}, T (N_{ips})$	m_0, mg	i_w^{\max}, kA	v_f	v_{esc}^d	v_{esc}^{th}	t_{esc}^d	t_{esc}^{th}	$t_{d1}, \mu\text{s}$	$t_{d2}, \mu\text{s}$	x_{d1}, mm	x_{d2}, mm
				km/s			μs					
6 ($t_s = 27 \mu\text{s}$)	8.9 (2)	10	94	5.73	6.31	6.30	50.3	50.2	106.5	124.3	340	442
1	0	7.7	77.8	2.65	2.84	2.8	100	105	155.4	214	315	470
2	0	7.9	120	4.06	4.36	4.32	78	78	113.6	152.8	313	472
3	7.1 (1)	8.2	84.5	4.17	4.46	5.43	71	65	105.6	142.8	311	466
4	0	7.9	86.7	2.87	3.08	3.14	96	100	148.8	203.2	318	474
7	6 (1)	8	61	4.35	4.68	4.71	66	68	100.4	137.2	320	480

Примечание. N_{ips} — число независимых источников питания цепей; $v_{esc}^d, v_{esc}^{th}, t_{esc}^d, t_{esc}^{th}$ — скорости и времена вылета ударника из выходного сечения, полученные из решения системы (1)–(5) и рассчитанные по показаниям пленочных датчиков; t_{d1}, t_{d2} — время пробы ударником пленочных датчиков; x_{d1}, x_{d2} — координаты датчиков, отсчитанные от торцевого сечения казенной части канала; $x_f = (x_{d1} + x_{d2})/2$ и $v_f = (x_{d2} - x_{d1})/(t_{d2} - t_{d1})$ — координата и скорость ударника в измерительном сечении.

Динамическая модель описывает штатный режим ускорения (без паразитных пробоев и утечек тока из плазменного поршня (ПП)). Суммарная сила, действующая на ударник, снижается силой давления ударно-сжатого газа F_d и „эрозионной“ силой F_{er} , возникающей при захвате ПП и вовлечении в движение вдоль оси канала части эрозионной массы, потерянной электродами.

При вычислении амперовой силы $F_A = F_i + F_e$ ПП рассматривается как непроницаемый тонкий токовый слой переменной массы. Здесь $F_i = L'i_w^2/2$ — сила, созданная рабочим током i_w , протекающим в рельсах-электродах и в ПП, $F_e = Bi_w h$ — сила, действующая на ток i_w , созданная внешним магнитным полем. Магнитная индукция $B = M'i_B/h$ зависит от тока $i_B(t)$ в цепи катушек и от коэффициента взаимной индукции витков $M'(t, x)$. При питании по схеме 2 $i_B = i_w$, $F_e = M'i_w^2$, $F_A = (L'/2 + M')i_w^2$. При питании по схеме 1 $F_e = M'i_B i_w$, $i_w(t) \neq i_B(t)$, что позволяет увеличить ток i_B и силу F_e , подключив питание цепи внешнего поля в более ранний момент времени. В этом случае $F_A = L'i_w^2(t)/2 + B(t + t_s)i_w(t)h$, где t_s — сдвиг по времени момента включения цепи рельсотрона относительно момента включения питания цепи внешнего поля. При питании по схеме 2 время $t_s = 0$.

Давление газа за ударной волной (УВ) p_2 , степень сжатия $\rho_2/\rho_1(D)$ и связь между скоростями ударника v и УВ D находятся из решения системы уравнений сохранения на скачке [10]. Для УВ в воздухе при начальном давлении $p_1 = 1 \text{ bar}$ эти параметры интерполировались как функции v по данным таблиц [11]. Эрозионная сила $F_{er} \sim \dot{m}_{er}(i_w)$ пропорциональна скорости изменения массы ПП \dot{m}_{er} . Из-за малости коэффициента трения скольжения ударника о стенки канала $k_f \leq 0.065$ [12,13] сила трения скольжения ускоряемого тела не учитывалась.

Ускоряемый объект массой $m = m_0 + m_{er} + m_{sl}$ состоит из ударника массой m_0 , эрозионной массы m_{er} захваченной ПП, и массы ударно-сжатого слоя $m_{sl} = \rho_1 x_{sw} A$ протяженностью $\Delta = x_{sw} - x$ (x, x_{sw} — координаты ударника и УВ). Динамику ускорения объекта массой m под действием амперовой силы (F_A), силы

давления газа, сжатого УВ (F_d), и эрозионной силы (F_{er}) описывает система уравнений

$$\frac{dv}{dt} = (F_A + F_d + F_{er})/m, \quad (1)$$

$$F_d = -(p_2 - p_1)A, \quad F_{er} = -\dot{m}_{er}(i_w)v, \quad (2)$$

$$\frac{dm_{er}}{dt} = \dot{m}_{er}(i_w), \quad (3)$$

$$m_{sl} = \rho_1(x + \Delta)A, \quad (4)$$

$$\frac{d\Delta}{dt} = \frac{v}{\rho_2/\rho_1 - 1}. \quad (5)$$

При $v < c$ (c — скорость звука) задаются приближенные условия $m_{sl} = 0, \Delta = 0$.

Начальные условия имеют вид

$$v(0) = 0, \quad m(0) = m_0, \quad \Delta = 0. \quad (6)$$

Поскольку зависимость $\dot{m}_{er}(i_w)$ от калибра канала ранее не исследовалась, будем полагать, что количество захваченной эрозионной массы пропорционально перенесенному заряду. При $i_w \geq I_0$ используется выражение $\dot{m}_{er}(i_w) = k_{eff}(i_w - I_0)$, описывающее зависимость, полученные из экспериментов ([14], рис. 2, b), и содержащее два параметра: 1) $k_{eff} = dm_{er}/di_w$ — эффективный коэффициент эрозии, учитывающий только эрозионную массу, вовлеченную в движение ПП; 2) $I_0 \sim 10\text{--}20 \text{ kA}$ — пороговое значение тока, ниже которого экспериментальные данные по эрозии отсутствуют. В этой области влиянием эрозии на динамику ускорения можно пренебречь и считать $\dot{m}_{er} = 0$. Поскольку данные для двухмиллиметровых рельсотронов отсутствуют, значение k_{eff} оценивалось нами на основании согласования расчетных значений скоростей ударника в выходном сечении $v(l) = v_{esc}^{th}$ и скорости v_{esc}^d , восстановленной по показаниям датчиков в опыте № 6, проведенном в работе [9] (см. таблицу). Расчеты показали, что приближенное равенство $v_{esc}^{th} \approx v_{esc}^d$ достигается в диапазоне значений $k_{eff} = 1.5\text{--}1.7 \text{ mg/C}$. Поэтому все последующие расчеты ускорения ударников в каналах

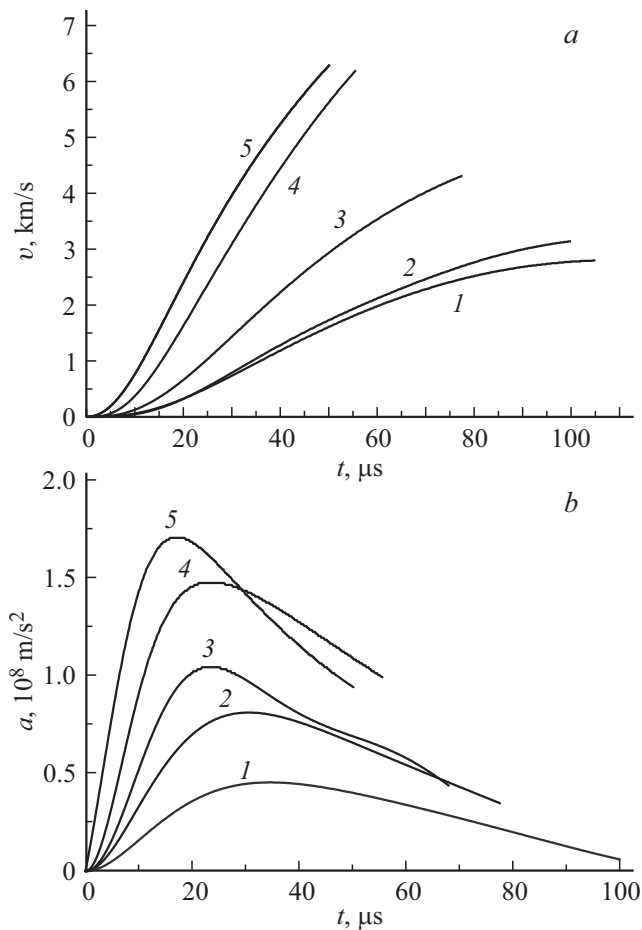


Рис. 1. Скорость ударника (а) и ускорение (б) для различных опытов: 1 — № 1, 2 — № 2, 3 — № 7, 4 — № 6 ($t_s = 0$), 5 — № 6 ($t_s = 27 \mu\text{s}$).

с медными рельсами калибром 2 mm проводились при значениях $k_{eff} = 1.6 \text{ mg/C}$, $I_0 = 15 \text{ kA}$.

Результаты численных расчетов представлены в таблице и на рисунках. На рис. 1, а показаны зависимости скорости ударника от времени, полученные при различных токах при отсутствии (кривые 1, 2) и наличии внешнего поля (кривые 3–5). Из рис. 1, а видно, что время начального разгона ударника зависит от рабочего тока и внешнего поля и при меньших токах (кривые 1, 2) достигает $\sim 15\text{--}20 \mu\text{s}$. При наличии внешнего поля, создаваемого током цепи, подключенной к независимому источнику энергии, время разгона ударника значительно уменьшается, и скорость $v(l)$ при $t_s = 27 \mu\text{s}$ достигает величины $\sim 6.3 \text{ km/s}$.

Величина ускорения (рис. 1, б) находится в диапазоне значений 10^8 m/s^2 и является немонотонной функцией времени, что связано с немонотонностью ускоряющей и суммарной силы и увеличением ускоряемой массы. Другая особенность ускорения пеллетов связана с их малой массой. Для характерных токов 50–100 kA захваченная ПП эрозионная масса к моменту вылета ударника из канала становится сравнимой с массой ударника

(рис. 2), что заметно снижает ускорение при приближении к выходному сечению. Масса ударно-сжатого слоя $m_{sl} = \rho_1 x_{sw} A \sim h^2$ пренебрежимо мала по сравнению с массой ударника.

За исключением опыта № 3 (см. таблицу), отличие скоростей ударника в выходном сечении от значений, полученных по показаниям датчика, не превышает 2%. Это подтверждает предположение, что величина k_{eff} в основном зависит от калибра канала. Превышение на 20% расчетной величины скорости v_{esc}^{th} значения скорости v_{esc}^d в опыте № 3 можно объяснить, предположив, что при схеме 2 движение ударника на начальной стадии разгона было слишком медленным и сопровождалось потерями энергии на испарение жидкой фазы, а также разогрев и разрушение шунтирующих ПП токовых перемычек.

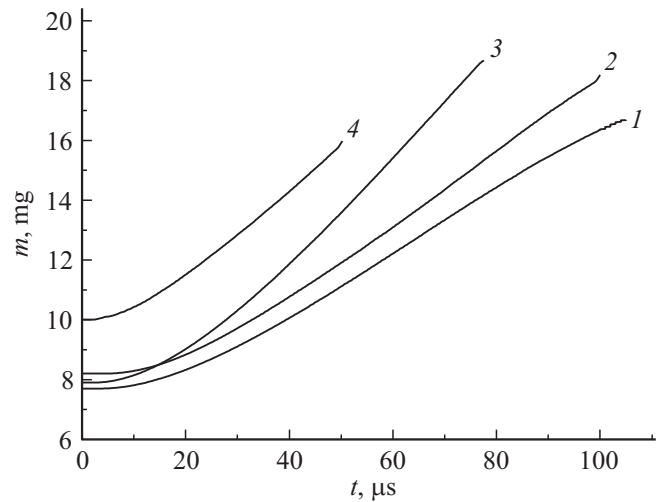


Рис. 2. Суммарная масса для различных опытов: 1 — № 1, 2 — № 4, 3 — № 2, 4 — № 6 ($t_s = 27 \mu\text{s}$).

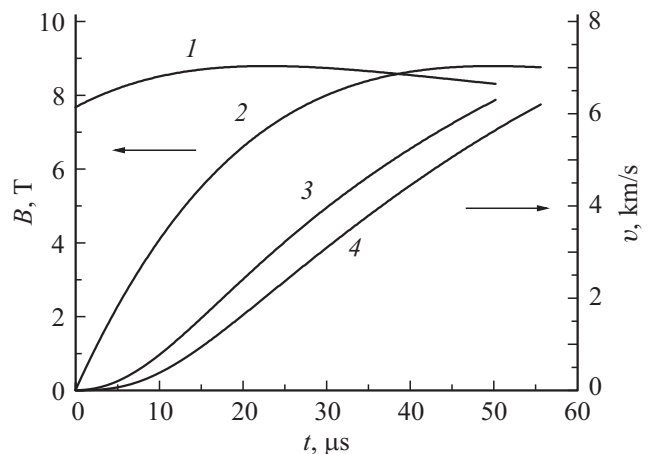


Рис. 3. Индукция внешнего магнитного поля B (1, 2) и скорость ударника (3, 4) при зависимости $B(t)$. 1, 3 — цепь питания рельсотрона включается на $27 \mu\text{s}$ позже цепи питания внешнего поля, 2, 4 — одновременное включение питания цепей, $t_s = 0$.

Наибольший интерес представляет сравнительный анализ режимов ускорения при использовании двух схем подключения цепей питания внешнего поля и рельсотрона. На рис. 3 показаны зависимости от времени индукции внешнего поля и скорости ударника при подключении цепи внешнего поля на $27 \mu\text{s}$ раньше цепи рельсотрона (кривые 1, 3) и одновременном включении цепей (кривые 2, 4). Зависимости ускорения от времени в этих опытах представлены на рис. 1, *b* кривыми 5 и 4. В первом случае начальная стадия разгона происходит значительно быстрее (кривая 5 на рис. 1, *b*), а большая ускоряющая сила обеспечивает разность скоростей ударника в 1 km/s уже в начале разгона и уменьшение времени пребывания ударника в канале ускорителя. Таким образом, два источника энергии необходимы, когда требуется получить максимально возможные скорости. В противном случае можно предпочесть более простую схему питания с одним источником.

С.А. Поняев и П.А. Попов благодарят за финансовую поддержку исследований РФФИ (проект РФФИ 18-08-01503А).

Список литературы

- [1] Milora S.L., Houlberg W.A., Lengyel L.L., Mertens V. // Nucl. Fusion. 1995. V. 18. P. 657–754.
- [2] Combs S.K., Baylor L.R., Meitner S.J., Caughman J.B.O., Rasmussen D.A., Maruyama S. // Fusion Eng. Design. 2012. V. 87. P. 634–640.
- [3] Кутеев Б.В. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 9. С. 63–67.
- [4] Combs S.K. // Rev. Sci. Instrum. 1993. V. 64. P. 1679–1698.
- [5] Pégourié B. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2007. V. 49. N 8. P. R87.
- [6] Combs S.K., Love T.L., Jernigan T.S., Milora S.L. // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67. P. 837–839.
- [7] Poniaev S.A., Kurakin R.O., Reznikov B.I., Rozov S.I., Zhukov B.G., Chernyshov M.V. // Acta Astron. 2017. V. 135. P. 63–68.
- [8] Poniaev S.A., Kurakin R.O., Sedov A.I., Bobashev S.V., Zhukov B.G., Nechunaev A.F. // Acta Astron. 2017. V. 135. P. 26–33.
- [9] Жуков Б.Г., Куракин Р.О., Сахаров В.А., Бобашев С.В., Поняев С.А., Резников Б.И., Розов С.И. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 12. С. 63–70.
- [10] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 686 с.
- [11] Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П., Челышев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. М.: Наука, 1975. 704 с.
- [12] Weeks D.A., Weldon W.F., Zowarka R.G. // IEEE Trans. Magn. 1989. V. 25. N 1. P. 580–586.
- [13] Bowden F.P., Tabor D. The friction and lubrication of solids. Pt 2. Oxford: Oxford University Press, 1964. 544 p.
- [14] Бобашев С.В., Резников Б.И., Жуков Б.Г., Куракин Р.О., Поняев С.А. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 13. С. 64–71.