

12

Малогабаритный рельсовый ускоритель диэлектрических твердых тел мм-размера

© Б.Г. Жуков, Р.О. Куракин, В.А. Сахаров, С.В. Бобашев,
С.А. Поняев, Б.И. Резников, С.И. Розов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: bgzhukov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 28 февраля 2013 г.

Реализован разгон тел мм-размера в малогабаритных электромагнитных рельсовых ускорителях. Показано, что наложение внешнего импульсного магнитного поля способно преодолеть катастрофическую эрозию электродов на начальных стадиях разгона и ускорить малые тела до скоростей около 6 km/s.

Проблема разгона твердых тел малого размера (1–3 mm) — пеллет до высоких скоростей не перестает быть актуальной с конца прошлого столетия. Причина этого связана, в частности, с исследованиями в области высокотемпературной плазмы, где пеллеты используются для доставки топлива в зону термоядерных реакций, для диагностики горячей плазмы, для управления режимами работы реактора [1–4]. Инжекция пеллет из материалов с большим атомным номером [3,5,6] рассматривалась как средство для аварийной остановки термоядерных реакторов при уменьшении магнитной энергии плазменного шнура и вывода тепловой составляющей. В современных установках типа ITER для доставки вещества в центральные зоны скорость пеллет должна быть 5 km/s и выше [1,4–6]. Существуют и другие направления исследований, где могут быть использованы высокоскоростные тела мм-размеров.

Разгон тел малого размера до гиперскоростей является сложной задачей, так как с уменьшением калибра значительно возрастают потери и сильно уменьшается эффективность ускорения, особенно в конце разгона. Так, например, в классических устройствах — двухступенчатых легкогазовых пушках при уменьшении размеров ускоряемых тел становятся значительными как потери тепловой энергии на стенки ствола, так и влияние холодного погранслоя на процесс ускорения тела.

Достигнутые здесь скорости на выходе из канала для тел размером 2–3 мм не превышают 3 км/с [1,3].

Основным конкурентом легкогазовых пушек являются электромагнитные рельсовые ускорители (рельсотроны) с токовой перемычкой или плазменным поршнем, в которых электрическая энергия накопительно-го устройства преобразуется в кинетическую энергию разгоняемого тела. В статье описывается разработанный в ФТИ компактный рельсовый ускоритель, который позволяет разгонять пеллеты — пластиковые кубики со стороной 1–2 мм и массой 1–10 мг до скоростей свыше 5 км/с.

Первые эксперименты по разгону пеллетов проводились в рамках используемого ранее подхода, названного авторами „быстрые рельсотроны“ [7]. Суть этого подхода: разгон тела ведется с постоянным максимально допустимым ускорением, величина которого ограничивается сверху одним из двух факторов — прочностью тела или электротермическим взрывом поверхности электродов. Согласно [8], для медных рельс-электродов такой взрыв наступает при линейных плотностях тока свыше 43 кА/мм. Для рельсового канала сечением 10 × 10 мм реализация этого подхода позволила разогнать кубик из поликарбоната массой ≈ 1 г до скорости 7.1 км/с на длине всего 0.6 м [9]. В первых же экспериментах по разгону тел в каналах 1 × 1 мм применение этого подхода потерпело неудачу. Кубик из поликарбоната со сторонами 1 мм и массой ~ 1 мг вылетел из канала рельсотрона со скоростью лишь немного выше 1 км/с. Длина канала с медными рельсами составляла 120 мм, амплитуда трапециевидного токового импульса ~ 40 кА и не превышала предела электротермического взрыва электродов 43 кА/мм. Проведем оценку ожидаемой скорости. В рельсотроне ускоряющая (амперова) сила зависит от тока, текущего по рельсам и плазменному поршню: $F = LI^2/2$, где I — разрядный ток, L' — погонная индуктивность. При $L' \approx 0.3 \mu\text{Н/м}$ кубик должен был набрать скорость ≈ 6–7 км/с на длине канала 100 мм. Анализ экспериментов показал, что в случае малых межэлектродных расстояний (~ 1 мм) ограничения результирующей скорости на уровне 1–1.2 км/с вызваны катастрофической эрозией электродов, особенно на начальных участках разгона. В зоне начального положения кубика наблюдались признаки сильного расплавления электродов, причем капли жидкой меди, достигая размера ~ 1 мм, практически закорачивали рельсы. Протяженность этой зоны была ~ 20 мм, и она располагалась симметрично относительно начального положения тела. На остальных участках (длиной около

Параметры малогабаритных рельсовых ускорителей

Сторона кубика h , mm	Масса кубика, mg	Максимальная скорость, km/s	Длина разгона, mm	Суммарная энергия накопителей, kJ
1	1	4.5	100	15–20
2	10	5.7	160	25–30

80 mm), вплоть до выхода из канала, следов эрозии поверхности рельса не отмечалось. Из этого следует, что тело набирает скорость ~ 1 km/s за счет расширения разогретых паров испарившейся меди, а не за счет электродинамического ускорения, т.е. энергия накопительной батареи расходуется в основном не на разгон тела, а на разрушение и разогрев перемычек, шунтирующих межрельсовый промежуток в окрестности начального положения тела.

Попытки изменить режим ускорения путем варьирования времени нарастания тока, а также применение секционированных электродов с отдельным энергоподводом к каждой секции, не дали положительных результатов. Чтобы выйти из режима катастрофической эрозии, необходимо уменьшить силу полного тока на порядок, что уменьшает ускорение и соответственно результирующую скорость. При приемлемой длине канала (10–20 см) для mm-тела не получить скорость на выходе свыше 0.2–0.3 km/s.

Решением проблемы преодоления катастрофической эрозии на начальных участках разгона в каналах малого сечения явилось наложение дополнительного внешнего импульсного магнитного поля, сонаправленного с собственным полем рельсов и сопоставимого с ним по величине (~ 10 T). Это позволило создать малогабаритный рельсотрон оригинальной конструкции и разогнать 1-mm и 2-mm диэлектрические тела вплоть до скоростей около 6 km/s (см. таблицу).

Схема малогабаритного ускорителя приведена на рис. 1. Ускорительный канал снабжен двумя последовательно соединенными одновитковыми катушками 1, создающими внутри канала дополнительное магнитное поле. Его направление такое же, как и магнитного поля в канале, создаваемого током, протекающим через электроды-рельсы 2. Катушки расположены симметрично по обе стороны канала на всю его длину и запитываются от своего источника. Конденсаторные батареи для

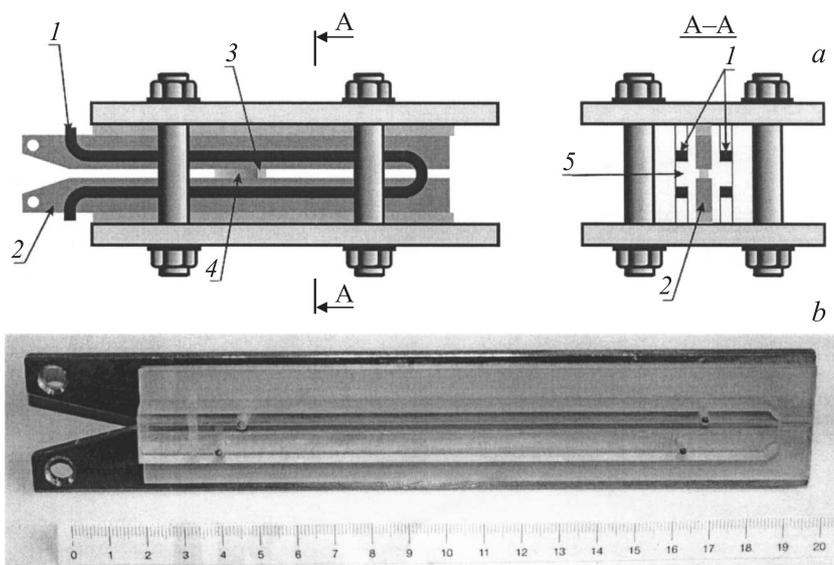


Рис. 1. *a* — схематический чертеж рельсового ускорителя с внешним магнитным полем. 1 — витки для генерации внешнего поля, 2 — электроды (рельсы), 3 — разгоняемое тело (пеллет), 4 — плазменный поршень, 5 — диэлектрические боковые стенки (плексиглас). *b* — фотография канала (без витков).

запитки как канала, так и витков собраны по схемам длинных LC -линий и подключаются к нагрузкам с помощью игнитронных разрядников. Накопители дают трапецеидальные импульсы тока с крутым передним фронтом и протяженным плато. Величина тока в нагрузке варьируется изменением зарядного напряжения на конденсаторах. Максимальный энергозапас батареи, питающей разряд, составляет 12 кДж, магнитные витки — 25 кДж. Электроды канала 2 выполнены из меди в виде плоских пластин прямоугольного сечения с соотношением сторон 1:4 или 1:5. Выбранная геометрия электродов и расположение магнитных витков ведут к концентрации магнитного поля в межэлектродном зазоре. За счет концентрации значение индукции поля в зазоре возрастает в 2–3 раза. Боковые диэлектрические стенки канала 5 сделаны из

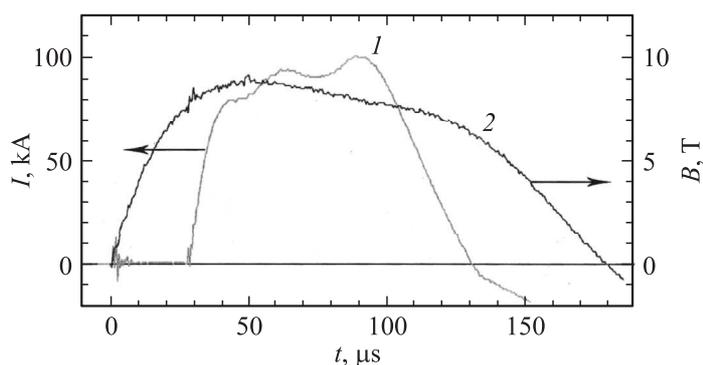


Рис. 2. Осциллограммы для рельсового канала калибром 2 мм: 1 — разрядный ток, 2 — индукция магнитного поля.

плексигласа, что позволяет вести оптическую регистрацию движения плазменного поршня по каналу. Метаемое тело помещается в канал на расстоянии нескольких калибров от заднего среза. Для инициации разряда на боковые стенки канала у заднего торца тела наносятся тонкие графитовые полоски, электрически соединяющие электроды. Импульс тока на витки подмагничивания подается на 20–30 мкс раньше, поэтому в момент подачи импульса тока на электроды величина магнитного поля в канале близка к максимальной. Вследствие такой коммутации образование плазменного поршня и ускорение тела начинаются до того, как ток в канале и эрозия электродов достигают максимальных значений.

Осциллограммы разрядного тока и индукции внешнего магнитного поля в канале для рельсотрона калибром 2 мм приведены на рис. 2. Поле регистрировалось миниатюрной катушкой диаметром 2 мм при отсутствии разрядного тока в канале. Сигнал с катушки после интегрирующей RC-цепочки поступал на осциллограф. Калибровка датчика поля осуществлялась с помощью специальных катушек Гельмгольца, рассчитанных на пропускание больших импульсных токов. Измерения показали, что поле мало меняется по длине канала, спадая (не более 10%) к началу и концу канала.

Все запуски ускорителей и регистрация тел в свободном полете проводились в воздухе при атмосферном давлении. Для измерения ско-

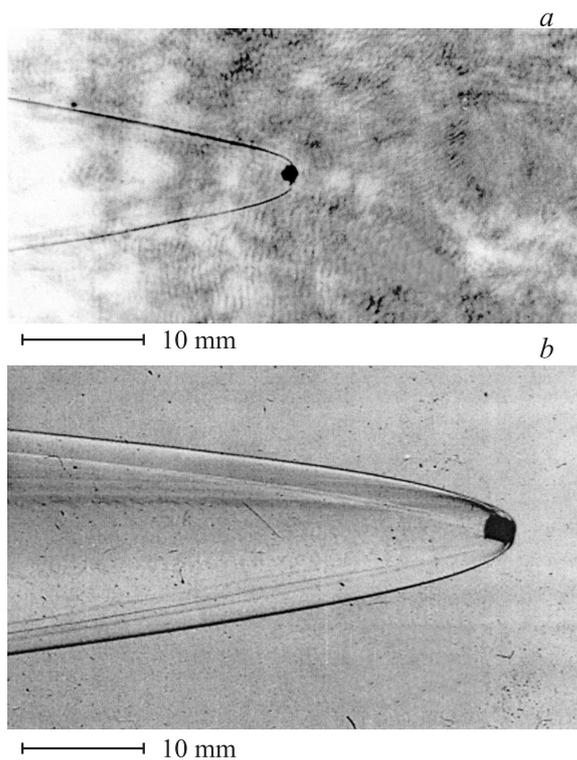


Рис. 3. Теневые фотографии полета пеллетов (кубики из поликарбоната) в воздухе: *a* — кубик со стороной 1 мм, скорость — 4.5 км/с, *b* — кубик со стороной 2 мм, скорость 5.7 км/с. Время экспозиции кадра 20 нс.

рости использовалась система специальных тонкопленочных датчиков, успешно реализованная ранее [10]. Полученные по осциллограммам с датчиков значения скоростей тел в свободном полете приведены в таблице. База между датчиками составляла 100–110 мм, первый датчик располагался на расстоянии 150–200 мм от дульного среза. Пеллеты в свободном полете после выхода из канала ускорителя регистрировались также при помощи лазерной теневой съемки. Время экспозиции кадра определялось длительностью светового импульса лазера и составляло 20 нс. На рис. 3 представлены теневые фотографии полета 1-мм и

2-мм пеллетов в атмосфере. На снимках видны кубики, их ориентация в полете, ударные волны в воздухе и гиперскоростной след. Среднее ускорение при разгоне по каналу превышает значение 10^7 m/s^2 , однако, как видно из рисунка, тела в полете сохраняют свою целостность.

Таким образом, наложение внешнего импульсного магнитного поля позволило преодолеть „катастрофическую“ эрозию электродов в рельсовых каналах малого сечения, что позволило разгонять тела 1-мм и 2-мм размеров до скоростей $\sim 6 \text{ km/s}$. Наложение внешнего магнитного поля, с одной стороны, увеличивает эффективное ускорение плазменного поршня, а с другой стороны, подавляет сверхзвуковые плазменные струи, вырывающиеся при больших токах с электродов [11]. Это сокращает, особенно на начальном участке, долю эрозионной массы, поступающей в плазменный поршень, с единицы длины канала. Малое время разгона и достаточно стабильные временные характеристики малогабаритных рельсотронов позволяют осуществлять их прецизионную синхронизацию с работой других импульсных устройств. Длина трассы (ускоритель, система датчиков скорости, зона теневой съемки) не превышает 1.5 м, а вся установка размещается в лабораторной комнате средних размеров.

В термоядерных исследованиях, по нашему мнению, с помощью рассмотренных устройств можно реализовать глубокий ввод топлива в зону реакции, осуществляя разгон пеллетов из LiD. Малые времена разгона и высокие скорости тел являются важными характеристиками при возможном использовании ускорителей в системах аварийной остановки термоядерных установок.

Работа поддержана программами президиума РАН П-02 и П-25 и грантом РФФИ № 12-08-01050.

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. et al. // Fusion Engineering and 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 Physics and Controlled Fusion. 2007. V. 49. N 8. R87.
- [6] Combs S.K. et al. // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67. P. 837–839.

- [7] Дробышевский Э.М., Жуков Б.Г., Назаров Е.В. и др. // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 4. С. 170–179.
- [8] Hawke et al. // AIAA Journal. 1982. V. 20. N 7. P. 978–985.
- [9] Drobyshevski E.M., Rozov S.I., Zhukov B.G. et al. // IEEE Trans. Magn. 1995. V. 31. N 1. P. 295–298.
- [10] Дробышевский Э.М., Жуков Б.Г., Сахаров В.А. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 17. С. 45–48.
- [11] Богомаз А.А., Будин А.В., Коликов В.А. и др. // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 1. С. 28–35.