

03;04

Генерация высокоскоростных потоков плазмы в рельсовых каналах, заполненных газами различной плотности

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

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

Поступило в Редакцию 16 сентября 2009 г.

Изучено движение плазменного поршня (ПП) в канале рельсового электромагнитного ускорителя. Эксперименты проведены в каналах сечениями 36 и 86 мм². Ускоритель помещался в откачиваемую камеру, которая заполнялась гелием или аргоном с давлениями 25–250 Торг. Обнаружено, что установившиеся скорости движения ПП зависят от давления и сорта газа. Результаты эксперимента удовлетворительно описываются предложенной расчетной моделью, при этом по опытным данным определяются эффективные значения погонной индуктивности ускорителя и коэффициента эрозии материала электродов.

Потоки низкотемпературной плазмы широко применяются в современных плазменных технологиях, например, для обработки поверхности, нанесения покрытий [1], управления обтеканием тел при воздействии плазмы на набегающий сверхзвуковой поток [2]. В электромагнитных рельсовых ускорителях (рельсотрон) ПП, находящийся в магнитном поле тока, протекающего в рельсах-электродах, разгоняет диэлектрический ударник [3]. Основной целью исследователей было получение максимальной скорости ударника, и динамика движения свободного ПП (без ударника) практически не изучалась.

Цель настоящей работы — исследование рельсотрона как ускорителя плазмы и влияния на динамику ПП факторов, противодействующих его разгону: противодействия газа, сжатого ударной волной, и увеличения массы ПП за счет эрозии электродов. Эрозия существенно определяет химический состав и массу плазмы в канале рельсотрона. В отличие от экспериментов, проведенных в [4], использовались режимы ускорения с меньшей линейной плотностью тока, меньшими давле-

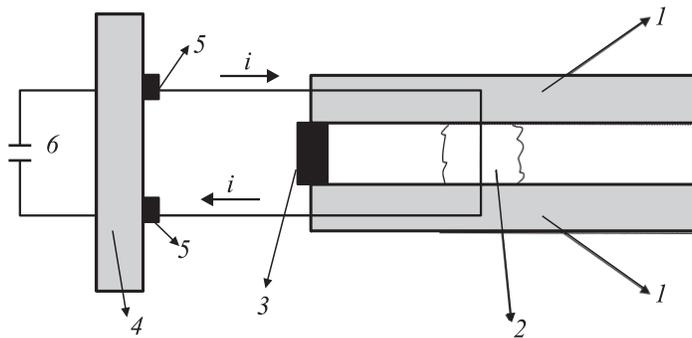


Рис. 1. Схема рельсового электромагнитного ускорителя (рельсотрона): 1 — электроды, 2 — плазменный поршень, 3 — заглушка, 4 — фланец вакуумной камеры, 5 — токовводы, 6 — источник питания.

ниями газов в канале и значительно меньшим коэффициентом эрозии электродов, что достигалось заменой медных рельсов графитовыми.

Ускоритель в сборке помещался в специальной камере, оборудованной смотровыми окнами и специальным фланцем с токовводами, обеспечивающими подвод к электродам импульсных токов до 100 кА (рис. 1). Использовались рельсовые каналы почти квадратного сечения $A = 36\text{--}86\text{ мм}^2$ с длиной канала 25 см. Камера откачивалась до форвакуума и после нескольких промывок исследуемым газом (гелий или аргон) заполнялась до рабочего давления $p_1 = 25\text{--}250\text{ Торр}$. Плотности и молярные массы аргона и гелия различаются на порядок. Это позволяет при одинаковой начальной плотности газа в канале ρ_1 значительно менять число Маха ударной волны, давление p_2 и плотность ρ_2 в ударном слое и соотношение факторов, влияющих на ограничение скорости плазмы.

Накопитель энергии в виде LC-линии (20 конденсаторов емкостью $100\text{ }\mu\text{F}$ каждый) подключался к рельсотрону через игнитронный разрядник. Для инициации разряда на торцевую заглушку, расположенную в казенной части канала, наносилась тонкая графитовая пленка. В разрядной цепи формировался трапециевидальный импульс тока с почти плоской вершиной. Разрядный ток регистрировался поясом Роговского и варьировался изменением начального напряжения $U = 2\text{--}4.5\text{ кВ}$ на батарее конденсаторов. Поскольку внутреннее сопротивление батареи было значительно выше суммарного сопротивления рельсового канала

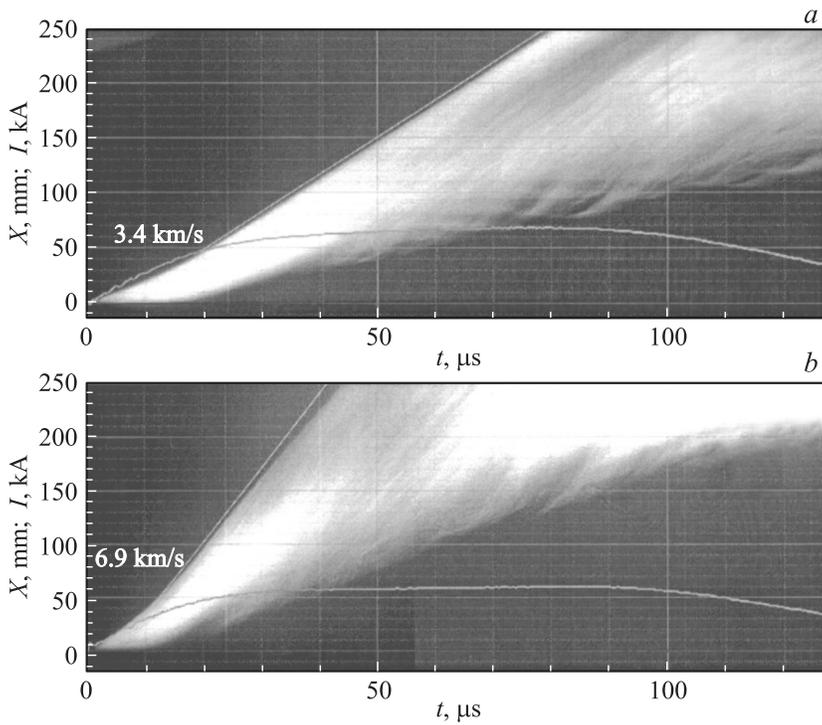


Рис. 2. ЖФР-граммы движения плазмы в каналах ($A = 36 \text{ mm}^2$), заполненных аргоном (а) и гелием (б) при $U = 3.2 \text{ kV}$, $p_1 = 250 \text{ Torr}$. Касательная линия к переднему фронту ПП соответствует максимальной скорости плазмы. Внизу показана зависимость тока от времени.

и ПП, разрядный ток практически не зависел от способа инициации разряда, сорта газа, материала электродов и скорости движения плазмы.

Боковые диэлектрические стенки канала изготавливались из прозрачного плексигласа, что позволяло применять оптические методы регистрации движения ПП. Движение светящегося ПП по каналу регистрировалось ждущим фоторегистратором (ЖФР). Типичные ЖФР-граммы вместе с зависимостью тока от времени приведены на рис. 2. На фотографиях видно, что после пробоя межэлектродного пространства ПП распространяется вдоль канала с нарастающей скоростью. После выхода разрядного тока на насыщение ($t \approx 20 \mu\text{s}$) скорость движения

фронта свечения перестает расти и остается примерно постоянной до тех пор, пока ток сохраняет постоянное значение. Расстояние, на котором фронт свечения достигает максимальной скорости, примерно равно нескольким сантиметрам и много меньше длины канала. Из рис. 2 видно, что задний фронт светящейся области распространяется в канале с меньшей скоростью, в результате толщина светящейся области увеличивается со временем. Было проведено свыше 50 опытов, в которых были получены зависимости скорости ПП от плотности среды в канале, стационарного значения тока в ПП и сечения канала. Максимальные скорости ПП были получены в гелии при давлении в камере $p_1 \approx 25$ Torr. Для гелия значения этих скоростей составляли 8.4–13.3 km/s, для аргона — около 8 km/s. Минимальные скорости были получены при давлении в камере $p_1 \approx 250$ Torr. Для гелия эти значения были 3.9–7.8 km/s, а для аргона 2.3–3.4 km/s. Различие скоростей связано с разными напряжениями на батарее конденсаторов и разными сечениями каналов.

Для интерпретации эксперимента и определения характеристик рельсотрона по данным измерений использовалась модель непроницаемого тонкого токового слоя переменной массы, движущегося в среде с сопротивлением [2]. Предполагалось, что движение плазменного поршня в канале происходит под действием трех сил. Первая — ускоряющая амперова сила $F = L'i^2/2$, создаваемая магнитным полем тока i , протекающего в рельсах (L' — эффективная погонная индуктивность, совпадающая с погонной индуктивностью электродов при бесконечно тонком токовом слое). Вторая сила сопротивления $F_{aer} = -p_2A \sim \rho_1 v^2$, создаваемая давлением газа p_2 , сжатого плоской ударной волной, генерируемой ПП в канале. Третья — сила $F_{er} = -\dot{m}v$, возникающая из-за того, что эрозионная масса, захваченная поршнем $m = \dot{m}t$, имеет нулевую составляющую скорости в направлении движения плазмы. Существенно, что при расплывании ПП величина F/i^2 зависит от распределения тока в плазме и изменяется со временем, а коэффициент $k = \dot{m}/i$ учитывает только массу, присоединенную поршнем.

Скорость ПП возрастает, пока $F_{sum} = F + F_{aer} + F_{er} > 0$. Поскольку максимум скорости ПП достигается, когда величина тока близка к постоянному значению, рассмотрим связь максимальной скорости ПП с параметрами рельсотрона L' , A , k и условиями опытов i , ρ_1 при $i = \text{const}$. Выражение для верхнего предела скоростей выводится из равенства нулю суммы сил, действующих на плазму $F_{sum}(v_m) = 0$. Из этого условия следует, что максимальная скорость v_m или предельная

скорость плазмы v_{lim} определяются через предельные скорости v_s и v_e , порождаемые только сопротивлением среды или только присоединением эрозионной массы к ПП:

$$v_s = \left(\frac{2F}{C\rho_1 A} \right)^{1/2} = i \sqrt{\frac{L'}{C\rho_1 A}}, \quad v_e = \frac{F}{\dot{m}} = \frac{L'}{2k} i, \quad C = \frac{2}{1 - \rho_1/\rho_2}. \quad (1)$$

Первая зависит от $(L'/\rho_1 A)^{1/2}$, вторая от отношения L'/k . Обе скорости v_s и v_e пропорциональны току i . Предельная скорость v_{lim} меньше каждой из скоростей v_s и v_e

$$v_{lim} = \frac{v_s}{\chi(\beta)} = \frac{2}{1 + \kappa(\beta)} v_e, \quad \beta = \frac{v_s}{2v_e},$$

$$\chi(\beta) = \beta + \sqrt{1 + \beta^2}, \quad \kappa(\beta) = \frac{\sqrt{1 + \beta^2}}{\beta}. \quad (2)$$

Степень отличия зависит от отношения этих скоростей β . Наименьшая из скоростей v_s и v_e определяется главным фактором, ограничивающим скорость плазмы. При $v_s \ll v_e$, $\beta \ll 1$ преобладает сопротивление среды. При $v_s \gg v_e$, $\beta \gg 1$ преобладает влияние эрозии электродов. Из выражений (1), (2) следует, что при малых значениях β скорость $v_{lim} \approx v_s/(1 + \beta)$ и пропорциональна линейной плотности тока i/\sqrt{A} и величине $1/\sqrt{\rho_1}$. При больших значениях β скорость $v_{lim} \approx v_e$ и не зависит от сечения канала A и плотности ρ_1 .

Зависимости максимальной скорости ПП от плотности среды в канале при заполнении камеры аргоном и гелием ($U = 3.2 \text{ kV}$, $A = 86 \text{ mm}^2$), представленные на рис. 3, близки к закону $v_m \sim \rho_1^{-1/2}$. В случае гелия, особенно при низких давлениях $p_1 < 250 \text{ Torr}$, эта зависимость является более слабой. Рассмотрим этот вопрос более подробно. Оценки величины β с использованием выражений (1) и (2) показывают, что при $p_1 \geq 25 \text{ Torr}$ для всех экспериментов в аргоне ($L' = 0.2 \mu\text{H/m}$, $k = 0.2 \text{ mg/C}$) максимальное значение $\beta \leq 0.1$. В каналах, заполненных гелием, $\beta \leq 0.3$. Это означает, что в рельсотроне с графитовыми электродами влияние эрозии на скорость плазмы не слишком велико и в большинстве экспериментов максимальная скорость ПП близка к пределу, заданному сопротивлением среды v_s . Это позволяет предположить, что экспериментальные зависимости максимальной скорости плазмы v_m от тока, давления и сечения канала аналогичны

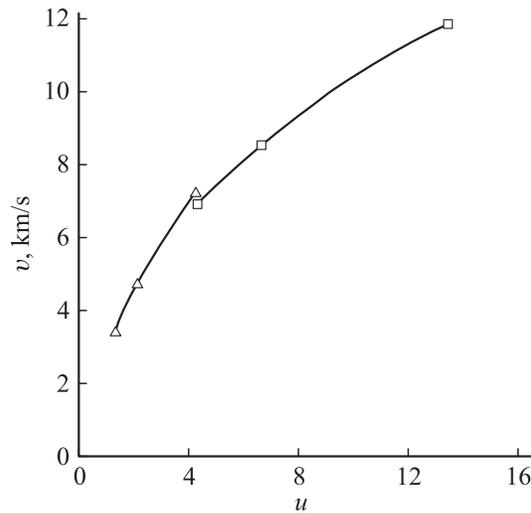


Рис. 3. Зависимость максимальной скорости ПП от плотности среды в канале $u = [\rho_{11}(p_1/760)]^{-1/2}$: для аргона — \triangle и гелия — \square .

зависимостям $v_s(i, p_1, A)$, именно $v_s, v_m \sim i/\sqrt{\rho_1 A} = i/\sqrt{\rho_{11}(p_1/760)A}$. Для выяснения зависимости $v_m(p_1)$ приведем экспериментальные данные для гелия и аргона к одному значению тока, одной плотности при нормальных условиях ρ_{11} и к одному сечению канала. Для этого нормируем экспериментальные значения скорости на величину $\Psi = (i/50)/\sqrt{\rho_{11}/\rho_{11}(\text{He})(A/86)}$. Зависимости скорости $V = v_m/\Psi$ от безразмерной переменной $P = (p_1/760)^{-1/2}$ показаны на рис. 4. Группировка экспериментальных точек около линейных зависимостей показывает, что в исследованном интервале давлений в канале скорость плазмы изменяется по закону, близкому к $\sqrt{1/p_1}$. Наклон зависимостей, определяющий dV/dP , для аргона и гелия разный. Учитывая, что производная $dv_s/dp_1^{-1/2} \sim (L'/CA)^{1/2}$, и предполагая, что качественное поведение зависимостей $v_m(p_1)$ и $v_s(p_1)$ одинаково, приходим к выводу, что при ускорении плазмы в гелии эффективная погонная индуктивность F/i^2 (совпадающая при сосредоточении тока в тонком слое с погонной индуктивностью электродов L') меньше, чем при ускорении в аргоне.

Оценим эффективные значения параметров рельсотрона с использованием массива измеренных в эксперименте значений максимальной

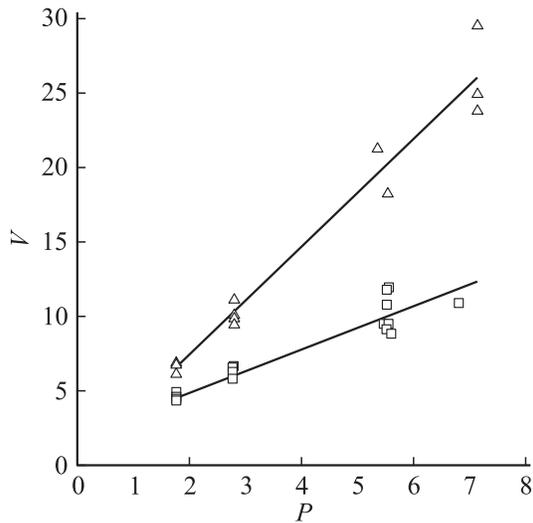


Рис. 4. Зависимость скорости $V = v_{\text{exp}}/\Psi$ от безразмерного давления в канале $P = \sqrt{760/p_1}$: для аргона — \triangle и гелия — \square . Аппроксимации экспериментальных данных линейной зависимостью получены методом наименьших квадратов.

скорости ПП (обратная задача). Будем предполагать, что для группы экспериментов значения L' и k одинаковы, а измерение скорости ПП проводится в момент, когда $F_{\text{sum}}(v_m) \approx 0$. Требование минимума средне-квадратичного отклонения от нуля суммы квадратов равнодействующих сил, действующих на плазму при $v = v_m$, дает линейную систему для определения параметров L' и k . Обработка экспериментов при заполнении камеры аргоном показывает, что значение погонной индуктивности рельсотрона лежит в интервале $L' = 0.22\text{--}0.26 \mu\text{H/m}$, а коэффициент эрозии $k = 0.15\text{--}0.19 \text{ mg/C}$. Значения этих параметров, полученных из опытов при заполнении камеры гелием, равны $L' = 0.13\text{--}0.16 \mu\text{H/m}$ и $k = 0.17\text{--}0.19 \text{ mg/C}$. Параметры L' и k , определенные по данным экспериментов в каналах с различными сечениями, несколько различаются, однако эти различия находятся в пределах 10–15% и не существенны. Эффективный коэффициент эрозии графитовых электродов k , несмотря на его высокую чувствительность к погрешностям эксперимента, имеет практически одинаковое значение для всех обработанных опытов. Причина того, что при ускорении ПП в гелии значение эффективной

погонной индуктивности ниже, чем при ускорении в аргоне, заключается в большей ширине ПП при заполнении канала гелием.

Проведенные эксперименты показали, что рельсотрон — эффективный генератор высокоскоростных плазменных потоков. Скорость ПП достигает максимального значения при установлении тока в цепи. Это происходит на расстоянии несколько сантиметров от начального сечения, что много меньше длины канала ускорителя. Состав плазмы и величина массы ПП на вылете из канала определяются эрозией материала электродов.

После достижения ПП максимальной скорости зафиксировано его расплывание и перераспределение тока в ПП. Ширина ПП и скорость его расплывания зависят от рода газа. Большая ширина поршня при заполнении канала гелием приводит к уменьшению плотности тока вблизи переднего фронта ПП и ускоряющей силы.

Аналитические выражения для максимальной скорости ПП, полученные в рамках расчетной модели, качественно и количественно описывают эксперимент. Решение обратной задачи позволяет определить параметры рельсового канала.

Для рельсотрона с графитовыми электродами сопротивление среды является главным фактором, ограничивающим скорость плазмы в достаточно плотных газах. В этом случае максимальная (предельная) скорость ПП пропорциональна току и обратно пропорциональна корню из произведения плотности газа на площадь сечения канала. При малых начальных плотностях газа в канале влияние эрозии электродов на движение плазмы возрастает.

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН П-12 и гранта РФФИ 09-08-00964-а.

Список литературы

- [1] *Ионные инжекторы и плазменные ускорители* / Под ред. А.И. Морозова, Н.Н. Семашко. М.: Энергоатомиздат, 1990. 257 с.
- [2] *Shang J.S.* // *Progress in Aerospace Sciences*. 2001. V. 37. P. 1–20.
- [3] *Осташев В.Е., Лебедев Е.Ф., Фортвов В.Е.* // *ТВТ*. 1993. Т. 31. В. 2. С. 313–320.
- [4] *Жуков Б.Г., Резников Б.И., Куракин Р.О., Розов С.И.* // *ЖТФ*. 2007. Т. 77. В. 7. С. 43–49.