

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

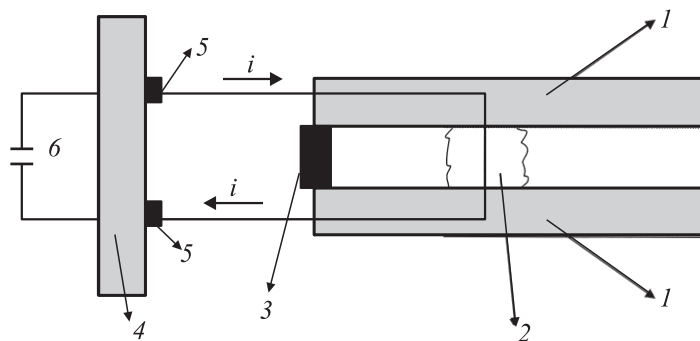
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: boris.resnikov@mail.ioffe.ru

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 мм<sup>2</sup>. 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-

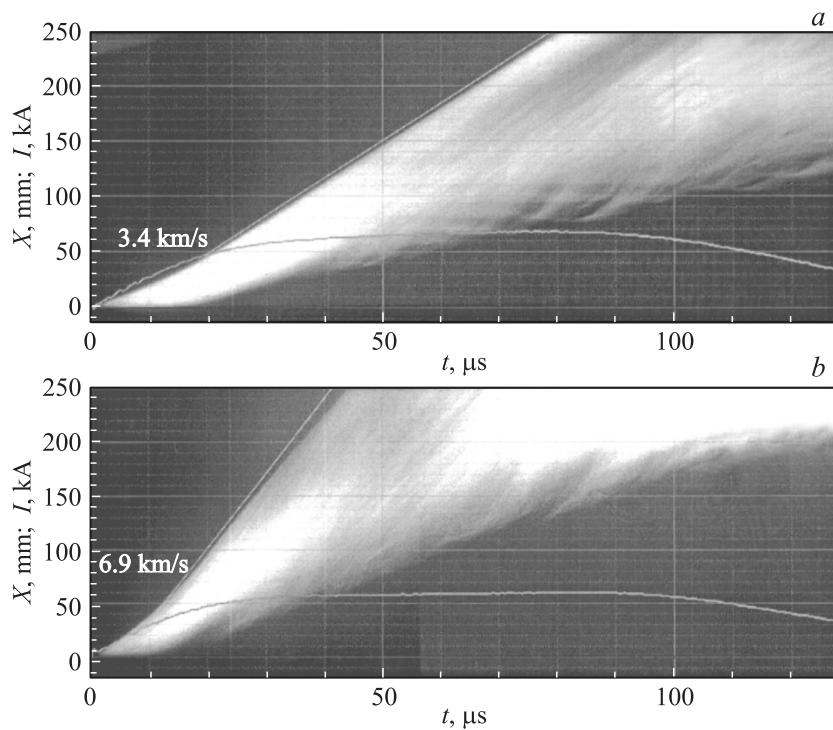


**Рис. 1.** Схема рельсового электромагнитного ускорителя (рельсотрона): 1 — электроды, 2 — плазменный поршень, 3 — заглушка, 4 — фланец вакуумной камеры, 5 — токовводы, 6 — источник питания.

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  $\rho_1$  значительно менять число Маха ударной волны, давление  $p_2$  и плотность  $\rho_2$  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 трапециевидный 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  $i$ ,  $\rho_1$  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:

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

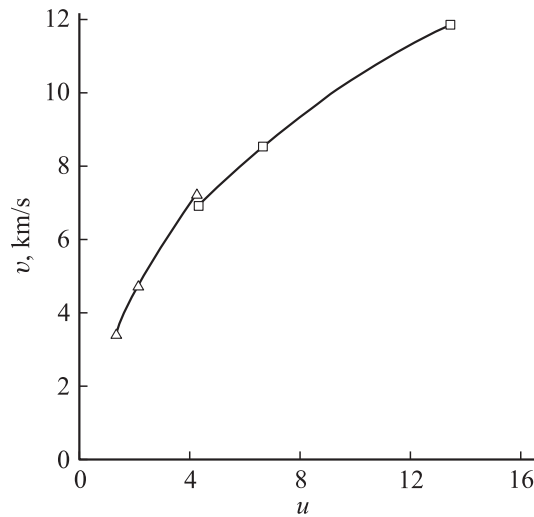
Первая зависит от  $(L'/\rho_1 A)^{1/2}$ , вторая от отношения  $L'/k$ . Обе скорости  $v_s$  и  $v_e$  пропорциональны току  $i$ . Предельная скорость  $v_{lim}$  меньше каждой из скоростей  $v_s$  и  $v_e$

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

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

Степень отличия зависит от отношения этих скоростей  $\beta$ . 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  $\beta$  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  $\beta$  скорость  $v_{lim} \approx v_e$  и не зависит от сечения канала  $A$  и плотности  $\rho_1$ .

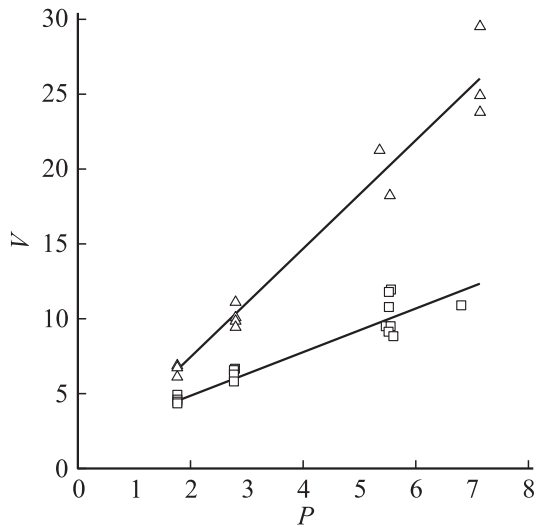
Зависимости максимальной скорости ПП от плотности среды в канале при заполнении камеры аргоном и гелием ( $U = 3.2 \text{ kV}$ ,  $A = 86 \text{ mm}^2$ ), представленные на рис. 3, близки к закону  $v_m \sim \rho_1^{-1/2}$ . В случае гелия, особенно при низких давлениях  $p_1 < 250 \text{ Torr}$ , эта зависимость является более слабой. Рассмотрим этот вопрос более подробно. Оценки величины  $\beta$  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  $\rho_{11}$  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.