

Эффективный коэффициент эрозии и ограничение скорости плазмы в канале электромагнитного рельсового ускорителя

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: boris.reznikov@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 22 августа 2013 г.)

Для описания динамики разгона плазмы в канале рельсового электромагнитного ускорителя введено понятие эффективного коэффициента эрозии, учитывающее захват и вовлечение в движение ускоряемой плазмой только части эрозионной массы, потерянной электродами рельсового ускорителя. Величина этого параметра определялась при сравнении экспериментальных и теоретических значений скорости плазмы на стадии ее насыщения. Последнее рассчитано в рамках модели, включающей силу давления ударно сжатого газа и силу торможения, возникающую при захвате эрозионной массы плазменным поршнем. Установлено, что отношение захваченной массы к массе, потерянной электродами, зависит от тока и для меди равно $1/4-2/3$. Значение эффективного коэффициента эрозии при токах ~ 40 кА составило $0.6-0.7$ мг/С.

Введение

Потоки низкотемпературной плазмы широко применяются в современных технологиях, например, для обработки поверхности и нанесения покрытий [1]. Эксперименты по ускорению свободного плазменного поршня (без ударника) в канале электромагнитного рельсового ускорителя (рельсотрона) показали, что рельсотрон разгоняет плазму до высоких скоростей [2,3]. Химический состав плазмы определяется материалом поверхности электродов, а увеличение массы ускоряемой плазмы количеством продуктов эрозии, поступающих в плазменный поршень. Значения рабочего тока и начальной плотности газа в канале позволяют варьировать в широких пределах скорость плазмы на выходе из канала. Таким образом, коэффициент эрозии является важным физическим параметром, влияющим на динамику разгона и параметры плазмы в выходном сечении канала [4]. Последние могут рассматриваться как начальные значения физических параметров струи в случае последующего расширения и охлаждения плазмы в сопле с образованием многоатомных кластеров в газовом потоке [5,6].

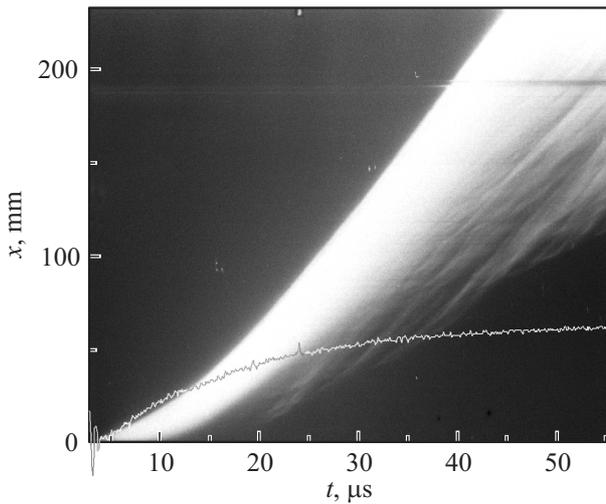
На начальном этапе исследований влияния эрозии электродов на движение ускоряемой плазмы [7] использовались численные оценки коэффициента эрозии, основанные на измеренных значениях массы, потерянной электродами при колебательном разряде батареи конденсаторов в воздухе [8,9]. Разгон плазмы в рельсотроне происходит при совершенно других условиях. Токовая перемычка — плазменный поршень перемещается вдоль электродов, при этом только часть массы, эродированной электродами, захватывается и вовлекается в движение. В результате увеличение массы плазмы и снижение ускорения определяются эффективным коэффициентом эрозии k , который значительно меньше, чем коэффициент эрозии k_{tot} , характеризующий общую потерю массы электродов в результате действия всех факторов,

влияющих на эрозию. К ним относятся перенос заряда, нагрев поверхности электродов, а также тепловое и динамическое воздействия потоков ионизованного пара („струи“) на поверхность противоположного электрода [9]. Различие между величинами k и k_{tot} становится еще больше, когда часть эродированного материала (медь) поступает в канал в виде жидкокапельной взвеси.

Цель настоящей работы — определение эффективного коэффициента эрозии и силы торможения, ограничивающей скорость движения плазмы. Для описания движения плазменного поршня мы будем использовать наиболее простую модель ускорения тонкого токового слоя переменной массы амперовой силой. Скорость плазмы ограничивается силой давления газа за ударной волной и силой, возникающей при захвате плазменным поршнем и вовлечении в движение части эрозионной массы.

1. Формулировка задачи

1.1. Плазменный поршень, ускоряемый в канале рельсотрона, сжимает находящийся перед ним газ и генерирует в канале ударную волну, которая удаляется от его переднего фронта со скоростью $D - v$, где D — скорость ударной волны, а v — скорость переднего фронта плазмы. Типичная ЖФР-грамма распространения свечения по каналу (см. рисунок) показывает, что начиная с некоторого момента времени рост скорости плазменного поршня прекращается, и передний фронт свечения движется с почти постоянной скоростью, близкой к максимальному значению [3]. На этой стадии суммарная сила, действующая на плазменный поршень, уменьшается до значений, много меньших ускоряющей амперовой силы $F = LI^2/2$. Это происходит из-за увеличения силы давления ударно-сжатого газа $F_d = P_2A$ при возрастании давления газа в ударном слое P_2 и действия силы торможения $F_{er} = \dot{m}v$, возникающей при захвате плазмой части эрозионного потока массы нормального



ЖФР-грамма движения плазмы в канале ($A = 36 \text{ mm}^2$), заполненном аргоном при начальном давлении в канале $P_1 = 1.33 \cdot 10^4 \text{ Pa}$. Зарядное напряжение на батарее конденсаторов $U = 3.2 \text{ kV}$. Внизу показана зависимость тока от времени.

поверхности электродов и оси канала [2]. Здесь L' — погонная индуктивность рельсов, зависящая от геометрии канала, I — ток, протекающий в плазменном поршне, $A = h^2$ — сечение канала, \dot{m} — количество эрозионной массы, захватываемой ускоряемой плазмой в единицу времени.

Считая передний фронт плазменного поршня непроницаемой плоской границей и используя законы сохранения массы и импульса, находим зависимость $v(D)$, давление $P_2 \gg P_1$ и силу F_d

$$v = D(1 - \rho_1/\rho_2), \quad F_d = \frac{\rho_1 A v^2}{1 - \rho_1/\rho_2} = \frac{C}{2} \rho_1 A v^2, \quad (1)$$

$$C = \frac{2}{1 - \rho_1/\rho_2}.$$

Здесь ρ_1, ρ_2 — плотности газа до и за скачком уплотнения. Эффективное значение показателя адиабаты при числе Маха $M \gg 1$ равно $\gamma_{ef} = C - 1$.

1.2. При компактном плазменном поршне закон движения центра масс записывается в виде

$$m \frac{dv}{dt} = F - C \frac{\rho_1 A}{2} v^2 - \dot{m} v. \quad (2)$$

Выражение для максимальной скорости ускоряемой плазмы выводится из равенства нулю правой части уравнения (2). При постоянной амперовой силе $F(L', I) = \text{const}$ эта скорость является предельно достижимой v_{lim} и выражается через естественные масштабы предельных скоростей v_d, v_e , обусловленных действием только силы давления газа в ударном слое

или только эффектами переменности массы [3]

$$v_{\text{lim}} = \frac{v_d}{\chi(\beta)}, \quad v_d = \sqrt{\frac{2F}{C\rho_1 A}},$$

$$v_e = \frac{F}{\dot{m}}, \quad \chi = \beta + \sqrt{1 + \beta^2}, \quad \beta = \frac{v_d}{2v_e}. \quad (3)$$

При отсутствии эрозии электродов $\dot{m} = 0$, значения $v_e = \infty, \beta = 0, \chi = 1$ и $v_{\text{lim}} = v_d$. Из этого равенства следует, что величина χ отражает снижение максимальной скорости плазмы за счет действия силы F_{er} . С использованием определений $\chi(\beta), \beta$ и v_e (3) получаем

$$\dot{m} = \frac{F}{v_d} (\chi - \chi^{-1}), \quad \chi = \frac{v_d}{v_{\text{lim}}}. \quad (4)$$

Если предположить, что в режиме насыщения скорости передний фронт плазмы движется со скоростью, близкой к предельной $v \approx v_{\text{lim}}$, то, измеряя скорость ударной волны и рассчитывая степень сжатия $\rho_2/\rho_1(D), v(D)$ и $\chi \approx v_d/v$, можно оценить значение \dot{m} и коэффициента эрозии k , если известна зависимость $\dot{m}(k)$. В качестве первого приближения будем считать, что скорость изменения массы плазменного поршня пропорциональна току, протекающему в плазме — $\dot{m} = kI$.

Для расчета значения \dot{m} из выражения (4) необходимо знать значения тока I и ускоряющей силы, когда $F - F_d - F_{er} \rightarrow 0$. На этой стадии движения увеличение массы плазмы сопровождается расплыванием плазменного поршня и перераспределением тока по длине ускоряемой плазмы. Это приводит к уменьшению плотности тока вблизи переднего фронта и снижению ускоряющей амперовой силы. Если записать выражение для силы в виде $F = L'_{\text{eff}} I^2 / 2$, то ее уменьшение можно трактовать как снижение эффективной погонной индуктивности L'_{eff} . Последняя всегда меньше или равна L' . Эксперименты по ускорению плазмы в аргоне и гелии [3] показали, что расплывание плазменного поршня уменьшает отношение L'_{eff}/L' . При этом ширина и скорость расплывания плазменного поршня зависят от рода газа и увеличиваются с уменьшением начальной плотности газа, заполняющего канал. Постоянство значений L'_{eff} и I имеет место только для компактного плазменного поршня. В противном случае при известных значениях L', I соотношение (4) дает оценку \dot{m} сверху.

Поскольку выбор положения контрольного сечения не должен влиять на результат, измерение скорости ударной волны следует проводить в моменты времени, когда разрядный ток близок к его максимальному постоянному значению. Заметим, что прямое измерение скорости ударной волны позволяет рассчитать скорость плазмы из (1) без дифференцирования по времени координаты переднего фронта плазмы на ЖФР-грамме.

2. Результаты экспериментов

2.1. Эффективный коэффициент эрозии определялся на основании данных экспериментов, продолжающих

Таблица 1.

Режим	I, kA	U, kV	P_1, Pa	$D, \text{km/s}$	$v, \text{km/s}$	ρ_2/ρ_1	$T_2, 10^3 \text{ K}$	P_2, MPa
1 He	40	2.2	$6.65 \cdot 10^4$	7.3	5.37	3.78	5.06	4.3
2 Ar	27	1.2	$1.33 \cdot 10^4$	4	3.17	4.81	12	2.7
3 Ar	42	2.2	$6.65 \cdot 10^3$	7	6.23	9.09	17.4	4.7

Таблица 2.

Режим	F, N	$v_d, \text{km/s}$	χ	$\dot{m}, \text{g/s}$	$k, \text{mg/C}$	F_{er}, N	F_d, N
1 He	296	7.43	1.38	26.35	0.66	141.5	154.5
2 Ar	134.9	3.685	1.16	11.1	0.41	35.1	99.7
3 Ar	326.3	8.59	1.38	24.8	0.59	154.5	171.8

исследования ускорения плазмы в каналах, заполненных аргоном и гелием, при различных зарядных напряжениях на конденсаторах U и начальных давлениях в канале [3]. Использовался малогабаритный рельсотрон с медными электродами, сечением $A = 36 \text{ mm}^2$ и погонной индуктивностью $L' = 0.37 \mu\text{H/m}$. Скорость ударной волны определялась по отсечке лазерного излучения в сечении канала, расположенного на расстоянии 45 mm от выходного сечения, и в выходном сечении [10].

2.2. Параметры трех экспериментов с токами порядка 40 kA приведены в табл. 1. Там же даны значения параметров ударного слоя, которые рассчитывались нами из законов сохранения массы, импульса и энергии на скачке. Использованный метод расчета основывался на подходах, изложенных в работах [11,12].

Численные значения коэффициента эрозии k и сил F, F_d, F_{er} приведены в табл. 2. Для медных рельсов при токах $\approx 40 \text{ kA}$ (режимы 1 и 3) величина коэффициента эрозии находится в интервале $0.6\text{--}0.7 \text{ mg/C}$. При меньших токах (режим 2) значение k уменьшается, при этом зависимость $k(I)$ близка к линейной. Сравнение значения k с величиной $k_{tot} \approx 2.7 \text{ mg/C}$ [8,9] показывает, что менее $1/4$ эрозионной массы захватывается плазмой. В исследованном диапазоне параметров тормозящая сила, связанная с захватом эрозионной массы, и сила противодействия ударно сжатого газа сравнимы. Наименьшее значение отношения F_{er}/F_d имеет место при наименьшем значении тока (режим 2).

2.3. Существенный интерес представляет сравнение с данными эксперимента, полученными при значительно больших токах [2], когда кроме обычных механизмов термо- и автоэлектронной эмиссии включаются дополнительные процессы, влияющие на эрозию, в частности разрушение противоположного электрода электродными струями и взаимодействие выброшенного материала с магнитным полем тока, протекающего в цепи [9,13]. Эксперимент [2] проводился при практически постоянном значении тока, равном 450 kA , в канале сечением $12 \times 12 \text{ mm}$, заполняемом гелием, воздухом или ксеноном при начальном давлении $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$.

При этом линейная плотность тока $j = I/h$ была равна 37.5 kA/mm , что на 15% меньше максимального значения $j_{\text{max}} = 43 \text{ kA/mm}$, превышение которого вызывает электротермический взрыв поверхностного слоя электродов и засорение разрядного канала продуктами эрозии электродов [14]. Скорость плазмы определялась по кинограмме движения фронта свечения, а скорость ударной волны рассчитывалась. Значение погонной индуктивности электродов $L' = 0.24 \mu\text{H/m}$.

Результаты обработки эксперимента в гелии суммированы в табл. 3. При достигнутых скоростях температура и давление в ударном слое весьма велики и намного превосходят значения, получаемые при генерации ударных волн в ударных трубах при таких же начальных давлениях газа. Мольная доля электронов в слое ударно-сжатого гелия $x_e = n_e/n \approx 0.1$, а электропроводность плазмы, рассчитанная с учетом эффектов неидеальности плазмы [15], равна $\sigma_2 \approx 110 \text{ Mo/cm}$. Скорость возрастания массы плазмы \dot{m} при токе 450 kA в 32 раза больше ее значений при умеренных токах (табл. 2). В то же время эффективный коэффициент эрозии возрастает примерно в 3 раза, так как рабочий ток и перенесенный заряд в этом режиме на порядок больше, при этом значение $k \approx 2/3 k_{tot}$. Существенно, что при столь большом токе отношение сил $F_{er}/F_d \sim 1$ и максимально. При $k = 1.87 \text{ mg/C}$ значения скорости $v_{\text{lim}} \approx v$ в воздухе и в ксеноне, определенные по формулам (3), равны 9.34 km/s и 4.59 km/s и близки к экспериментальным данным [2].

2.4. При столь высоких значениях температуры, концентрации электронов и электропроводности плазмы ударно-сжатого газа в объеме ударного слоя возможны развитие дугового разряда, протекание тока и размывание четкой границы между плазменным поршнем и ударным слоем. Дополнительный разогрев плазмы может изменить параметры газа в ударном слое, в частности степень сжатия ρ_2/ρ_1 и соотношение между скоростями ударной волны — D и плазменного поршня — v . Расчеты показывают, что величина ρ_2/ρ_1 достаточно

Таблица 3.

I, kA	U, kV	$D, \text{km/s}$	$v, \text{km/s}$	ρ_2/ρ_1	$T_2, 10^3 \text{ K}$	P_2, MPa
450	4.5	21.1	17.5	5.88	27.5	60.8
F, N	$v_d, \text{km/s}$	χ	$\dot{m}, \text{g/s}$	$k, \text{mg/C}$	F_{er}, N	F_d, N
24300	27.89	1.59	842	1.87	14700	9600

консервативна, и при $\rho_1/\rho_2 \ll 1$ небольшое изменение степени сжатия слабо влияет на значение \dot{m} и величину эффективного коэффициента эрозии.

Заключение

Все полученные значения k значительно меньше величины $k_{tot} = 2.7 \text{ mg/C}$, определенной из данных по эрозии медных электродов при неподвижном дуговом разряде батареи конденсаторов [8,9]. Это связано с тем, что при большой доле жидкокапельной составляющей величина эрозионной массы, потерянной медными электродами при разряде, значительно больше массы, захваченной движущейся плазмой. Полученные результаты показывают, что эффективный коэффициент эрозии в бегущем дуговом разряде (каким является плазменный поршень) не является физической константой, определяемой только материалом электродов. Ее значение зависит от тока, его линейной плотности, расстояния между электродами и, возможно, от скорости плазмы.

Работа поддержана Программами Президиума РАН П-02 и П-25 и грантом РФФИ № 12-08-01050.

Список литературы

- [1] Ионные инжекторы и плазменные ускорители / Под ред. А.И. Морозова, Н.Н. Семашко. М.: Энергоатомиздат, 1990. 257 с.
- [2] Жуков Б.Г., Резников Б.И., Куракин Р.О., Розов С.И. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 7. С. 43–49.
- [3] Бобашев С.В., Жуков Б.Г., Куракин Р.О., Поняев С.А., Резников Б.И., Розов С.И. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 2. С. 54–61.
- [4] Бобашев С.В., Жуков Б.Г., Куракин Р.О., Поняев С.А., Резников Б.И., Розов С.И. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 12. С. 45–50.
- [5] Резников Б.И., Алексеев Н.И., Бобашев С.В., Жуков Б.Г., Поняев С.А., Куракин Р.О., Розов С.И. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 8. С. 48–52.
- [6] Bobashev S.V., Zhukov B.G., Kurakin R.O., Ponyaev S.A., Reznikov B.I., Rozov S.I., Sedov A.I. VII Intern. Conf. Plasm. Phys. Plasm Technol. PPPT 7. Contributed Papers. Vol. 1. P. 212–215. Minsk, Belarus, September 17–21, 2012.
- [7] Колесников П.М. Электродинамическое ускорение плазмы. М.: Атомиздат, 1971.
- [8] Белкин Г.С., Киселев В.Я. // ЖТФ. 1966. Т. 36. Вып. 2. С. 384–389.
- [9] Donaldson A.L., Kristiansen M., Watson A. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1986. Vol. 22, N 6. P. 1441–1446.
- [10] Bobashev S.V., Zhukov B.G., Kurakin R.O., Ponyaev S.A., Reznikov B.I., Rozov S.I. VII Intern. Conf. Plasm. Phys. Plasm. Technol. PPPT 7, Contributed Papers. Vol. 1, P. 94–97. Minsk, Belarus, September 17–21, 2012.
- [11] Козлов Г.И., Ступицкий Е.А. Таблицы термодинамических параметров аргона и ксенона за падающей и отраженной УВ. М.: Институт проблем механики. 1969.
- [12] Грязнов В.К., Иосилевский И.Л., Фортвов В.Е. // ПМТФ. 1973. Вып. 3. С. 70–76.
- [13] Будин А.В., Коликов В.А., Рутберг Ф.Г. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 8. С. 49–53.
- [14] Hawke R.S., Brooks A.L., Fowler C.M. et al. // AIAA J. 1982, Vol. 20, P. 978–985.
- [15] Воробьев В.С., Хомкин А.Л. // ТВТ. 1977. Т. 15. Вып. 1. С. 188–191.