

- [9] U e d a T., N i s h i S., K a w a r a d a Y.  
et. al. // Jap. J. Appl. Phys. 1986. V. 25. N 9.  
P. L789-L791.
- [10] V a r r i o J., A s o n e n H., L a m m a -  
s n i e m i J. et. al. // Appl. Phys. Lett. 1989.  
V. 55. N 19. P. 1987-1989.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе  
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию  
26 апреля 1990 г.  
В окончательной редакции  
6 сентября 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 2

26 января 1991 г.

04

© 1991

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ПЛАЗМЕННОГО ПОРШНЯ  
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО УСКОРЕНИЯ ТЕЛА

Э.М. Д р о б ы ш е в с к и й, С.И. Р о з о в,  
Б.Г. Ж у к о в, Р.О. К у р а к и н,  
В.М. С о к о л о в

Эксперименты по электродинамическому ускорению тел массой  $m \approx 1-2$  г плазменным поршнем (ПП) магнитопржатого разряда рельсотронной конфигурации после начального участка, описываемого простой теорией (см., например, [1]), показывают насыщение скорости на уровне  $V_c \approx 3.5-6$  мм/мкс [1-4]. Варьируя параметры разряда, мы нашли, что  $V_c$  нарастает как  $\sim m^{-1/2}$  вплоть до  $m \approx 0.9$  г, но остается неизменным с увеличением силы тока  $I$  и его длительности  $\Delta t$ , с изменением погонной индуктивности электродов  $L'$ .

Причины насыщения скорости пока не ясны полностью. Обычно эффект связывают с изменением структуры ПП. Действительно, наблюдения канала разряда через (прозрачные) боковые диэлектрические стенки показывают расширение ПП вдоль ускорительного канала и даже постепенное смещение максимума свечения в нем назад по отношению к переднему фронту (рис. 1, а) (см. также [5]). Магнитные зонды показывают также отставание максимума плотности тока.

Казалось бы, если поршень непроницаем, само по себе перераспределение плотности тока ведет только к изменению распределения объемных пондеромоторных сил и соответствующего им газового

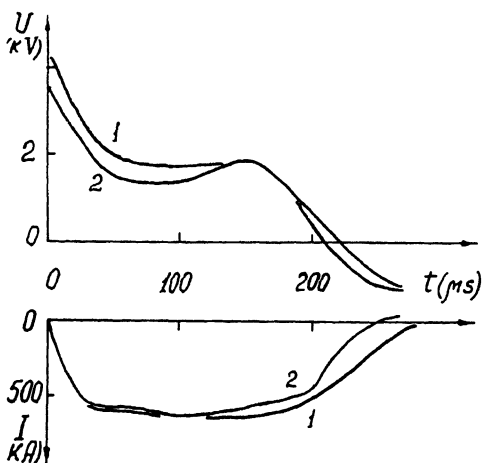


Рис. 1. Осциллограммы напряжения на входе электродов (верхняя кривая) и тока (нижняя) для типичных режимов. 1 – эксперимент со свободным ПП от 26.03.90, 2 – эксперимент со сжатым ПП от 25.09.90.

давления по длине ПП, но не должно менять полный интеграл этих сил, ускоряющих тело.

Какова реально степень проницаемости ПП, неизвестно. Нет уверенности и в том, что причиной насыщения скорости действительно является расширение ПП. Поэтому целью данной работы было выяснение влияния компактности ПП на эффективность его действия.

Выдвигались разные предположения о причинах наблюдаемого отставания ПП: вторичные пробои в хвостовой части [2], перегрузка его материалом, аблирующим с электродов и диэлектрических стенок канала [6], газодинамическое расширение из-за уменьшения магнитного давления на спадающей ветви тока [7] и т.д.

Наши эксперименты велись в режиме почти постоянного тока, близкого к максимально допустимому значению по испарению поверхности электродов и по прочности тела [1], поэтому последняя причина, казалось бы, не должна работать. Перегрузка ПП испаряющимся веществом, по-видимому, в самом деле происходит, но это ограничивает скорость только при  $m \lesssim 0.9$  г.

Явных вторичных пробоев сзади также не наблюдалось [1], хотя, возможно, происходит плавное перераспределение тока к задней части ПП, где условия его протекания более благоприятны (меньшее значение индуктивной противо-ЭДС и омического падения напряжения в скин-слое электродов, подготовленная для прохождения тока поверхность и т.п.), из-за чего напряжение на входе электродов остается в течение разряда практически постоянным (рис. 2).

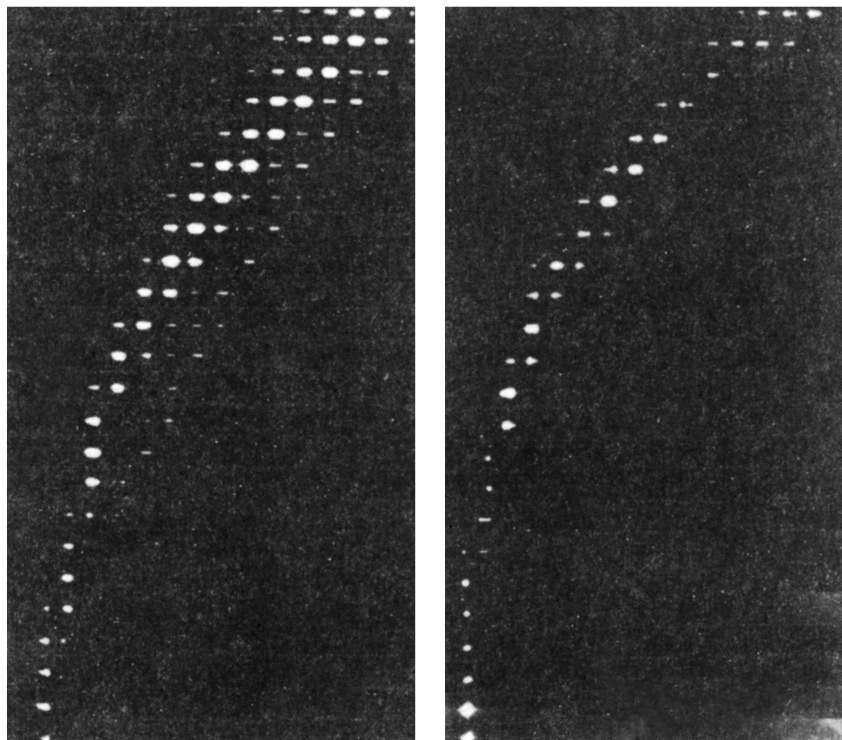


Рис. 2. Сверхскоростная фоторегистрограмма свечения в канале ускорителя. Слева – эксперимент со свободным ПП (26.03.90), справа – со сжатым ПП (25.09.90). ПП движется слева направо, толкая тело перед собой; затененные области – боковые болты камеры (расстояние между их осями 4 см). Временная развертка – снизу-вверх; кадры через 8 мкс, экспозиция кадра 4 мкс.

Паркер [6] обсудил возможные способы предотвращения протекания тока в следе ПП, что, по его мнению, вызывает перекачку туда энергии, расширение и в конечном счете отставание от тела.

1. Продольное секционирование электродов (конструктивное или электрическое) для подведения тока к участку, примыкающему к телу. Это усложняет систему, но в экспериментах [6, 8] показало свою перспективность.

2. Уменьшение абляции вещества понижением энергетической нагрузки на стенки канала или применением более стойких материалов, – тогда каналы вторичных пробоев будут догонять ПП и сливаться с ним.

3. Ликвидация уменьшения противо-ЭДС в отстающем следе ПП путем подпора его достаточно быстрым (6–8 мм/мкс) потоком нейтрального газа.

Дата эксперимента	Масса тела, г	Начальное напряжение, кВ	Энергия в накопителе, кДж	Дли-тельность „полочки“то-ка, мкс	Сила посто-янного тока, кА	Скорость тела на выходе, мм/мкс	КПД систе-мы те-ло/нако-питель, %
21.03.90	1.6	4.95	285	150	665	4.9	6.7
26.03.90	0.96	5.0	290	150	665	6.1	6.2
30.03.90	1.59	5.0	290	150	665	5.6	8.7
09.08.90	1.0	4.55	240	150	605	6.4	8.5
25.09.90	1.0	4.72	258	150	630	7.1	9.7

Результаты экспериментов по ускорению тел со свободным (21.03.90 и 26.03.90) или сжатым (все остальные) плазменным поршнем (емкость батареи  $C=23.2$  мФ,  $L' \approx 0.24$  мкГн/м); при вычислении скорости на выходе из системы учитывалось торможение тела воздухом в полете на длине  $=0.55$  м до центра измерительного поля сверхскоростного фоторегистратора (коэффициент сопротивления кубика принимался  $= 1.6[9]$ ).

\*В некоторых экспериментах создавалось монотонное отклонение тока от постоянного значения до  $\sim 5-7\%$  в ту или иную сторону.

4. Повышение напряжения пробоя за ПП путем охлаждения и деионизации его следа. Способ испытывался неоднократно, он до сих пор не давал определенных результатов [6]. Он был применен нами и оказался многообещающим.

Принятые меры сократили длину ПП до 5-8 калибров вплоть до выхода тела из канала (рис. 1, б). Эффективность действия сжатого ПП резко поднялась (см. таблицу), зависимость основных выходных параметров системы в пределах точности ( $+3-5\%$ ) наших измерений ( $L', I, \Delta t, V$ ) стала подчиняться простейшей теории ( $V = L'I^2 \Delta t / 2m$ ) [1]. В частности, напряжение на электродах по мере ускорения тела увеличивается (рис. 2), как и должно быть вследствие роста индукционной противо-ЭДС.

В результате совместные возможности разрядной системы (длина электродов  $\leq 56$  см) и накопителя ( $C=250$  мФ,  $W=250-300$  кДж), имевшихся в нашем распоряжении, были использованы почти полностью: лексановое тело  $m=1$  г было ускорено до  $V=7.1$  мм/мкс при полном КПД системы движущееся тело/накопитель  $\approx 10\%$ . Величина почти постоянного во времени неразрушающего ускорения составляла  $\approx 4.5 \cdot 10^6 g$ .

Можно сделать вывод, что главной причиной падения эффективности ускоряющего действия расширенного ПП была его повышенная проницаемость по отношению к газу, находящемуся между ним и телом, что не противоречит представлению о структуре

ПП как совокупности многих сливающихся и разделяющихся дуговых каналов (см. также [10]). Не исключено, что повышается также роль трения более развитой поверхности ПП о стенки канала.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Д р о б ы ш е в с к и й Э.М., Ж у к о в Б.Г., Н а з а р о в Е.В., Р о з о в С.И., С о к о л о в В.М., В е с е л к о в Д.Е., К у р а к и н Р.О., С а в е л ь е в М.А., Ю ф е р е в С.В. // Препринт ФТИ-1315. Л., 1989.
- [2] H a w k e R.S., H e l l i s W.J., N e w m a n G.H., R e g o J., S u s o e f f A.R. // IEEE Trans. Magnetics. 1986. V. 22. N 6. P. 1510-1515.
- [3] К о н д р а т е н к о М.М., Л е б е д е в Е.Ф., О с т а ш е в В.Е., С а ф о н о в В.И., Ф о р т о в В.Е., У л ь я н о в А.В. // Т В Т . 1988. Т. 26. № 1. С. 159-164.
- [4] S h r a d e r J.E., B o h n A.J., T h o m p s o n J.G. // IEEE Trans. on Magnetics. 1986. V. 22. N 6. P. 1739-1741.
- [5] А н и с и м о в А.Г., Б а ш к а т о в Ю.Л., Ш в е ц о в Г.А. // П М Т Ф . 1989. № 2. С. 145-150.
- [6] P a r k e r J.V. // IEEE Trans. Magnetics. 1989. V. 25. N 1. P. 418-424.
- [7] H a w k e R.S. // In: Shock Waves in Condensed Matter 1987. /Ed. by Schmidt S.C. and Holmes N.C. North Holland, 1988. P. 643-648.
- [8] H a i g h t C.H., T o w e r M.M. // IEEE Trans Magnetics. 1986. V. 22. N 6. P. 1499-1502.
- [9] Б е д и н А.П., М е л е ш к о В.П., М и ш и н Г.И., Ч и с т ь к о в а М.В. // В к н.: Физико-газодинамические баллистические исследования. Л.: Наука, 1980. С. 25-33.
- [10] M a r s h a l l R.A. // IEEE Trans. Magnetics. 1986. V. 22. N 6. P. 1609-1612.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе  
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию  
15 ноября 1990 г.