

48. Гилев С. Д., Трубочев А. М. Получение сильных магнитных полей ударными волнами в веществе // Письма в ЖТФ.— 1982.— Т. 8, вып. 15.
49. Гилев С. Д., Трубочев А. М. Получение сильных магнитных полей МК-генераторами на пористом веществе // ПМТФ.— 1983.— № 5.
50. Nagayama K. New method of magnetic flux compression by means of the propagation of shock-induced metallic transition in semiconductors // Appl. Phys. Lett.— 1981.— V. 38, N 2.
51. Nagayama K., Oka T., Mashimo T. Experimental study of a new mechanism of magnetic flux cumulation by the propagation of shock-compressed conductive region in silicon // J. Appl. Phys.— 1982.— V. 53, N 4.
52. Биченков Е. И., Гилев С. Д., Трубочев А. М. Ударно-волновые МК-генераторы // Сверхсильные магнитные поля: Тр. 3-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей.— М.: Наука, 1984.
53. Bichenkov E. I., Gilev S. D., Riabchun A. M. et al. Shock wave method for generation of megagauss magnetic fields // Megagauss Technology and Pulsed Power Applications: Proc. 4th Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Fields Generation.— N. Y.; L., 1987.
54. Биченков Е. И., Гилев С. Д., Рябчун А. М. и др. Ударно-волновой метод генерации мегагауссных магнитных полей // ПМТФ.— 1987.— № 3.
55. Nagayama K., Mashimo T. Explosive-driven magnetic flux cumulation by the propagation of shock-compressed conductive region in highly porous metal powders // J. Appl. Phys.— 1987.— V. 61, N 10.
56. Сахаров А. Д., Людаев Р. З., Смирнов Е. И. и др. Магнитная кумуляция // ДАН СССР.— 1965.— Т. 165, № 1.
57. Fowler C. M., Caird R. S., Carn W. B. Production of very high magnetic fields by explosion // J. Appl. Phys.— 1960.— V. 31, N 3.
58. Павловский А. И., Колокольчиков Н. П., Долотенко М. И. и др. Каскадный магнитокумулятивный генератор сверхсильных магнитных полей // Сверхсильные магнитные поля: Тр. 3-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей.— М.: Наука, 1984.
59. Pavlovskii A. I., Bykov A. I., Dolotenko M. I. et al. Limiting value of reproducible magnetic field in cascade generator MC-1 // Megagauss Technology and Pulsed Power Applications: Proc. 4th Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Fields Generation.— N. Y.; L., 1987.

Поступила 3/VIII 1988 г.

УДК 538.4 + 533.95

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ПЛАЗМЕННОГО ПОРШНЯ В РЕЛЬСОТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

А. Г. Анисимов, Ю. Л. Башкатов, Г. А. Швецов

(Новосибирск)

В последние годы, начиная с работы [1], значительное внимание исследователей уделяется изучению возможностей ускорения в рельсотронных ускорителях диэлектрических твердых тел плазменным поршнем. Ожидается, что эта схема позволит снять тепловые ограничения на скорость металлических частиц и получить скорости, значительно превышающие достигнутый экспериментальный уровень [2]. Появились работы, авторы которых рассматривали возможность и обсуждали проекты устройств для ускорения частиц массой порядка грамма до скоростей 12 [3], 15 [4, 5], 20 [6, 7], 25 [4, 6, 8], 50 км/с [9] и др. Следует, однако, заметить, что, несмотря на почти десятилетний период с выхода публикации [1] и значительные усилия, существенного прогресса в технике получения высоких скоростей не достигнуто. Экспериментальные результаты представляются весьма скромными и находятся на уровне результатов [4].

В настоящее время общепризнано, что основные причины, ограничивающие достижение высоких скоростей макрочастиц в рельсотронных ускорителях с плазменным поршнем, связаны с эрозией стенок канала под действием мощного теплового потока от движущегося плазменного поршня и протекающего в цепи тока. Анализ критической плотности тока, при которой температура поверхности электродов достигает температуры плавления, показывает [10], что обеспечить эффективное ускорение тела и избежать эрозии электродов, по-видимому, не представляется возможным. Эффект эрозии электродов сказывается различным образом. Наличие дополнительной массы приводит к появлению «предельных» значений скорости ускоряемой частицы независимо от механизма эрозии [10], перераспределению тока в плазменном поршне и к отставанию последнего от ускоряемого тела [11]. В числе причин, которые могут привести к отставанию плазменного поршня от ускоряемого тела, в [11] выделяется дунтирование тока, текущего непосредственно за ускоряемым телом, испарившимся электродов металлом (вторичные пробой).

Полной ясности в связи между эрозией электродов и вторичными пробоями нет, хотя косвенные эксперименты позволяют, на наш взгляд, делать заключение о

такой связи, особенно если допустить, что в рельсотронных ускорителях макрочастиц с плазменным поршнем реализуются условия, приводящие к образованию высокоскоростных высокотемпературных струй пара из материала электродов [12]. Если это так, то рождение и отмирание струй внесут свои особенности в структуру плазменного поршня, в частности, поставят под вопрос возможность реализовать в ускорителе магнитоприжатый разряд, что в свою очередь приведет к уменьшению силы, ускоряющей тело.

Цель настоящей работы — изучение структуры плазменного поршня. Эксперименты проведены в условиях, максимально приближенных к экспериментам по ускорению макрочастиц [11, 13].

1. Схема экспериментов представлена на рис. 1, где C — конденсаторная батарея, $L(t)$, $R(t)$ — индуктивность и сопротивление цепи, 1 — электроды, 2 — ускоряемое тело, 3 — металлическая фольга, 4 — стеклянные стенки, 5 — разрядник. При запуске разрядника конденсаторная батарея разряжается на рельсотрон, фольга взрывается, образуется плазменный поршень, который, двигаясь под действием силы Лоренца, ускоряет тело.

В экспериментах использовалась конденсаторная батарея емкостью от 10,2 до 20,4 мФ при напряжении 5 кВ. Амплитуда и форма импульса тока задавались подбором начального напряжения, емкости батареи и начальной индуктивности цепи. Амплитуда токов изменялась от 300 до 500 кА. Для создания плазмы использовалась медная фольга толщиной 30 мкм. Длина рельсотрона 250—400 мм, сечение электродов 19×10 мм, высота стеклянных изоляторов 10 мм, сечение канала 10×9 мм. Ускоряемое тело из капролона. Размер тела $10 \times 10 \times 9$ мм, масса ≈ 1 г.

В экспериментах регистрировались ток на входе в рельсотрон, напряжение на входе и выходе рельсотрона. С помощью индуктивных датчиков находилось распределение тока в плазменной перемычке. Основное внимание было обращено на оптическую регистрацию плазменного поршня. В ряде экспериментов вместо ускоряемого тела ставилась диэлектрическая заглушка. Это позволяло провести фотографирование плазменного поршня в стационарном режиме.

2. Оптическая съемка показала, что на начальной стадии сильного разряда (примерно в течение 25—30 мкс) различия в поведении плазмы в опытах с диэлектрической заглушкой и ускоряемым телом незначительны. Образующаяся при электрическом взрыве фольги плазма под влиянием электромагнитных и газодинамических сил претерпевает сложные изменения. В обоих случаях сразу после взрыва фольги быстро увеличивается длина плазменного сгустка. За время ≈ 10 мкс плазма заполняет пространство длиной ≈ 40 мм. При этом к заглушке (к телу) примыкает более холодная часть. Высокотемпературная часть плазмы отходит от заглушки на расстояние 2—4 см и в течение 25—30 мкс остается примерно в одном месте, незначительно увеличиваясь в размерах и совершая небольшие пространственные колебания к заглушке и от нее. Затем длина плазмы увеличивается до 5—7 см, в ней появляются отдельные горячие участки (дуги, страты), время жизни которых колеблется в пределах 1—10 мкс. Их число в настоящих экспериментах не поддается учету и меняется со временем. В течение всего времени оптической регистрации режим магнитоприжатого локализованного разряда не реализуется. В некоторых экспериментах с заглушкой отсутствует эрозия электродов на участке 10—20 мм, прилегающем к заглушке, но наблюдается сильная эрозия далее на участке длиной до 30 мм.

На рис. 2—5 представлены фотографии, показывающие развитие процесса во времени в экспериментах с ускоряемым телом, где 0 — место установки фольги, 1—5 — индуктивные датчики. В экс-

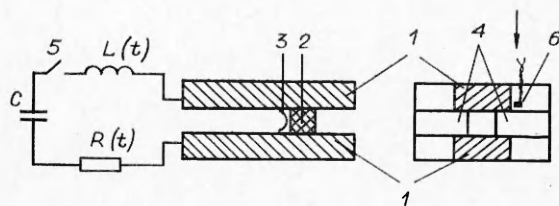


Рис. 1

перименте (рис. 2, время между кадрами 3,3 мкс) позади тела на расстоянии 35 мм канал закрыт заглушкой. Из фотохронограммы видно, что образующийся при взрыве фольги плазменный поршень быстро увеличивает свою длину в направлении против сил магнитного давления. Метаемое тело в течение первых 20—30 мкс практически не сдвигается с места.

В эксперименте (рис. 3, время между кадрами 8 мкс) канал позади тела открыт. На фотографиях видно, что в плазменном поршне выделяется область яркого свечения, задняя граница которой сначала распространяется в направлении, обратном движению тела, затем останавливается и далее движется вслед за ускоряемым телом, непрерывно изменяя свои очертания и внутреннюю картину свечения. Менее яркая часть плазмы продолжает расширяться в направлении, обратном движению тела, затем она распадается на отдельные участки и перестает светиться.

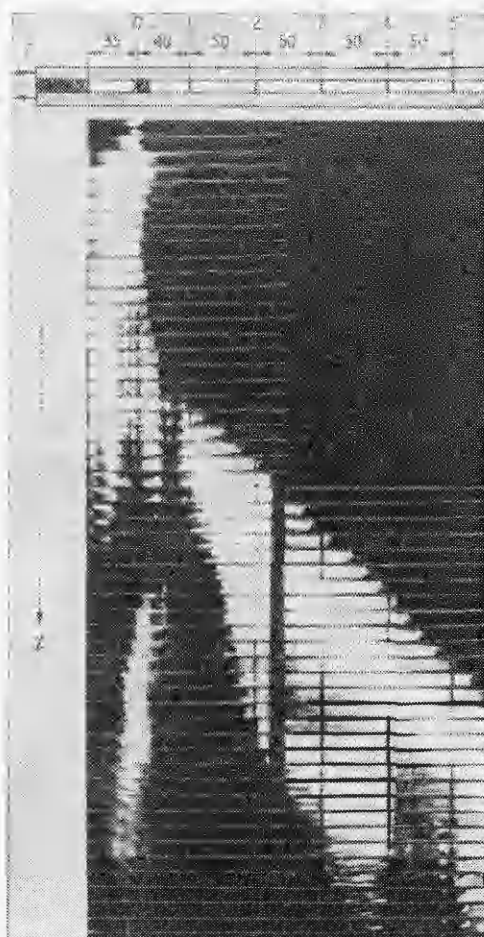
В проведенных экспериментах с каналом квадратного сечения со стеклянными изоляторами наблюдался прорыв плазмы вперед тела примерно через 30 мкс после взрыва фольги. Индуктивные датчики фиксировали протекание тока по прорвавшейся плазме.

На рис. 4 (время между кадрами 3,37 мкс) штриховой линией показана траектория движения ускоряемого тела. Скорость передней границы плазмы, прорвавшейся вперед тела, при выходе из рельсотрона $\approx 2,2$ км/с, скорость тела $\approx 1,5$ км/с.

На рис. 5 (время между кадрами 4,5 мкс) штриховая линия — траектория движения тела, которая пересекает зону, где не наблюдается свечение, однако индуктивные датчики показывают наличие в этой зоне плазменного поршня и большого тока, протекающего по нему. По-видимому, в области, где нет на фотографиях свечения от поршня, стеклянные стенки потеряли свою прозрачность. Потерей прозрачности стекла можно объяснить и «полосатую» структуру плазмы. Темные полосы зарождаются в месте установления фольги и распространяются на соседние участки. Через некоторое время (после разрушения стеклянных стенок) появляется свечение плазмы, вырвавшейся из канала.

На рис. 3 видно, что часть поршня, примыкающая к телу, постепенно теряет яркость, а из места начальной установки фольги зарождается новый плазменный сгусток, который догоняет тело уже после выхода из ствола рельсотрона. На фотографиях видно, что после удара о тело по этому сгустку идет отраженная ударная волна.

Наряду с оптической регистрацией плазменного поршня в экспериментах проводились измерения распределения тока в нем. Магнитные зонды располагались около канала рельсотрона (рис. 1, 6 — магнитный зонд). Направление оси датчика показано стрелкой. На рис. 6 приведены



Р и с. 2



Р и с. 3

осциллограммы сигналов с индуктивных датчиков 1—5 в эксперименте (см. рис. 5). Начало сигналов на всех осциллограммах совпадает с приходом фронта свечения плазмы, просочившейся вперед тела. Стрелками отмечены моменты прохождения тела мимо датчиков. Из приведенных данных видно, что оценка скорости тела по показаниям индуктивных датчиков и свечению фронта плазменного поршня может оказаться некорректной.

На рис. 7 даны зависимости от времени тока на входе в рельсотрон (верхняя кривая) и проинтегрированные сигналы с индуктивных датчиков 1—5 в эксперименте (см. рис. 5). Из графика можно оценить в различные моменты времени величину тока, протекающего в прорвавшейся впе-

ред тела плазме, в плазме, следующей за телом, и протекающего в дуге в месте установления фольги.

Во всех экспериментах (см. рис. 2—5) на месте установки фольги дуга горит в течение всего времени оптической регистрации (≈ 200 мкс); в этом месте, а также на расстоянии 30—35 мм вверх по потоку наблюдалась сильная эрозия электродов. Далее (вверх по потоку) эрозия незначительна, но следы сильного температурного воздействия на электроды заметны на расстоянии до 150 мм. В направлении движения тела на электродах видны следы потоков материала электродов.

Хотя представленные в данной работе результаты не раскрывают в полной мере внутреннюю структуру плазменного поршня и во многом обусловлены спецификой проведения экспериментов, связанной с наличием стеклянных изоляторов, они, как показывают натурные эксперименты по ускорению макрочастиц, носят общий характер. Естественно, в этом случае при тщательном изготовлении канала и прецизионной подгонке размеров ускоряемого тела к размерам канала удается избежать прорыва плазмы вперед тела, однако реализовать магнитопржатый разряд не удастся. Датчики показывают, что по мере движения тела в канале длина плазменного сгустка непрерывно увеличивается, происходит перераспределение тока по длине плазмы от фронта к тыльной части, приводящее в конечном счете к отрыву (к отставанию) плазмы от ускоряемого тела [11]. Отставание плазмы в экспериментах с круглым рельсотроном с диаметром канала 5,7 мм при ускорении тела массой 0,2 г иллюстрирует рис. 8 (1—4 — скорость плазменного поршня, определенная по сигналам с индуктивных датчиков, 5 — оптическая регистрация скорости тела, 6 — расчет скорости тела по эюре тока). Аналогичная картина имеет место при ускорении макрочастиц в рельсотроне круглого сечения диаметром 11,7 мм [11]. Исходя из полученных в настоящей работе данных, можно также заключить, что оценивать кинематические характеристики рель-

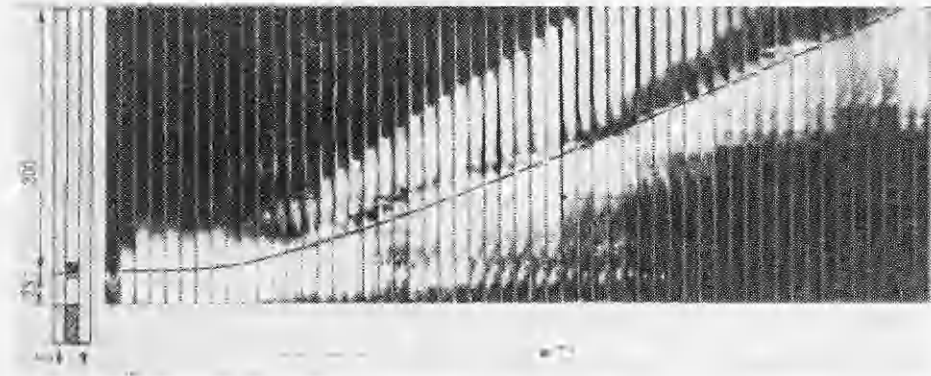


Рис. 4

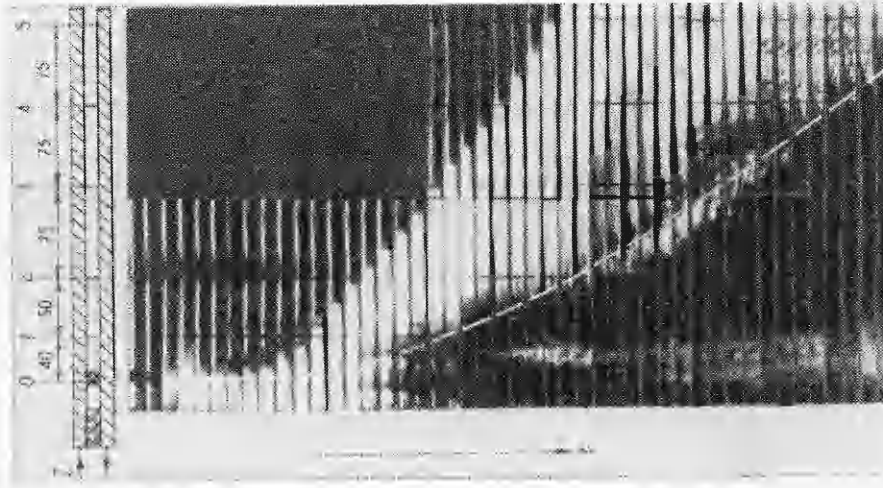


Рис. 5

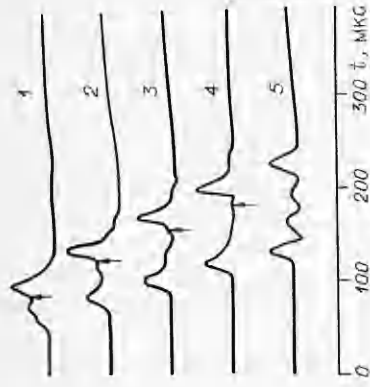


Рис. 6

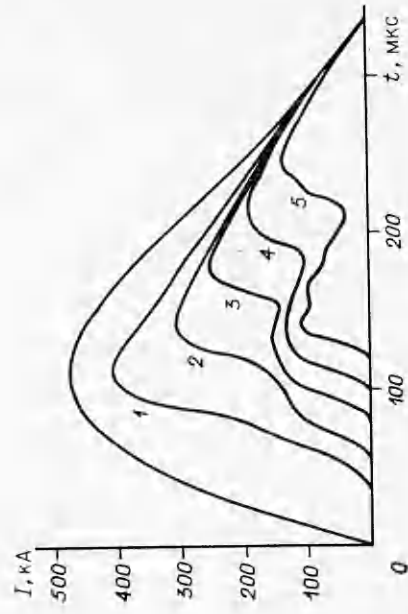
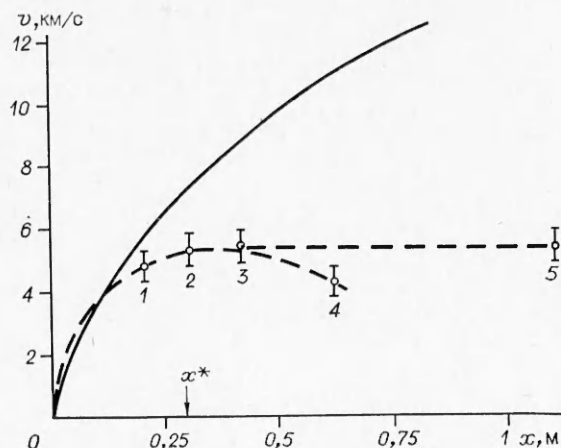


Рис. 7



Р и с. 8

сотронных ускорителей твердых тел с плазменным поршнем в приближении движения центра масс (как это сейчас широко применяется в литературе) надо крайне осторожно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rashleigh S. C., Marshall R. A. Electromagnetic acceleration of microparticles to high velocities // J. Appl. Phys.— 1978.— V. 49.— P. 2540.
2. Титов В. М., Швецов Г. А. Ускорение макрочастиц до высоких скоростей // Динамика сплошной среды.— Новосибирск: ИГ СО АН СССР, 1986.— Вып. 78.
3. Hawke R. S., Nellis W. J. et al. Rail accelerator development for ultrahigh pressure research // IEEE Trans. on Magnetics.— 1984.— V. MAG-20, N 2.
4. Fox W. E., Cummings C. E. et al. Mechanical design aspects of the HYVAX railgun. Ibid.
5. Usaba S., Kondo K., Sawaoka A. Status of electromagnetic mass-accelerator development and prospect of application to high pressure research // Shock waves in condensed matter: Proc. of the APS Top. Conf., Santa Fe, 1983.
6. Hawke R. S., Brooks A. C., Mitchel A. et al. Railguns for equation of state research— Tech. Rep. UCRL — 85298, 1981.
7. Hawke R. S., Scudder J. K. Magnetic propulsion railguns: their design and capabilities // Megagauss Physics and Technology: Proc. Conf., Washington, 1979.— N. Y.; L.: Plenum Press, 1980.
8. Fowler C. M., Peterson D. R., Hawke R. S. et al. Railgun development for EOS research // Shock waves in condensed matter: AIP Conf. Proc.— N. Y., 1982.
9. Langlin R. L., Gully J. H., Nalty K. E., Zowarka R. C. System of the ultrahigh velocity GEDI experiment // IEEE Trans. on Magnetics.— 1986.— V. MAG-22, N 2.
10. Shvetsov G. A., Titov V. M., Anisimov A. G. et al. Railgun accelerators of macro particles. Pt I. General characteristics // Megagauss technology and pulsed power applications: Proc. Conf., Santa Fe, 1986.— N. Y.; L.: Plenum Press, 1987.
11. Shvetsov G. A., Titov V. M., Anisimov A. G. et al. Railgun accelerators of macro particles. Pt II. Experimental investigations // Ibid.
12. Любимов Г. А., Раховский В. М. Катодное пятно вакуумной дуги // УФН.— 1978.— Т. 125, № 4.
13. Швецов Г. А., Титов В. М. и др. Исследование работы рельсотронного ускорителя твердых тел с питанием от взрывного МГД-генератора // Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение.— М.: Наука, 1984.

Поступила 4/VIII 1988 г.

УДК 539.374

О ПРОНИКАНИИ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ В ПРОЧНУЮ ПРЕГРАДУ

С. А. Кинеловский, К. К. Маевский

(Новосибирск)

Гидродинамическая теория кумуляции довольно хорошо описывает процесс внедрения кумулятивной струи (КС) при достаточно высоких скоростях проникания, однако при снижении скорости наблюдается з