

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗГОНА МАКРОЧАСТИЦ В МАГНИТОПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ

УДК 533.92;621.384

А. В. Плеханов, А. В. Кудрявцев, В. Б. Железный, Д. В. Хандрыга

Люберецкое научно-производственное объединение «Союз»,
140056 Дзержинский Московской области

Магнитоплазменные ускорители (МПУ) (или, по другой терминологии, рельсовые электромагнитные ускорители с плазменным поршнем в качестве якоря) являются наиболее простыми по конструкции устройствами, способными разгонять макрочастицы массой в несколько граммов до гиперскоростей. В многочисленных опытах с МПУ получают скорости $5 \div 7$ км/с. Дальнейшее увеличение дульной скорости затруднено наличием сильной эрозии материалов канала ускорителя и неустойчивостью плазменного поршня.

Детальный численный анализ распределения температуры в рельсах показал [1], что: 1) контактная поверхность рельсов в процессе выстрела сильно прогревается и частично проплавляется, 2) наиболее существенно оплавляются участки рельсов на входе в МПУ (область казенной части ускорителя), 3) с увеличением начальной скорости положение максимальной величины проплавленного материала смещается по направлению движения макрочастицы, а глубина расплава уменьшается (с 60 мкм при начальной скорости $V_0 = 0$ до 20 мкм при $V_0 = 2$ км/с), 4) повышение скорости инъекции выше 2 км/с не меняет распределения температуры внутри рельсов. Эти выводы подтверждаются визуальным осмотром и рентгеноструктурным анализом рельсов и изоляторов после опытов [2]. Однако стремление ослабить негативную роль начального участка за счет предускорителя, обеспечивающего инъекцию макрочастицы с инициатором в канал МПУ с некоторой начальной скоростью, породило проблему инициации дуги и формирования плазменного поршня.

Другая проблема, препятствующая достижению макрочастицей скорости 10 км/с и выше, — неустойчивость плазменного поршня, которая особенно проявляется в моменты изменения градиента тока в цепи ускорителя.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований процессов инициации дуги и формирования плазменного поршня в зависимости от начальной

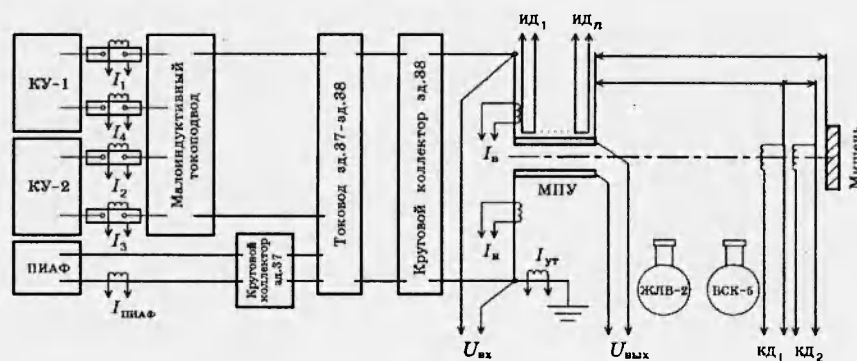


Рис. 1

Таблица 1

Модули батареи	Емкость, Ф	Зарядное напряжение, кВ	Основной коммутатор
КУ-1	0,037	до 8,5	Воздушный разрядник
КУ-2	0,048	до 8,5	То же
ПИАФ-2,5	0,05	до 10,0	Игнитроны

Таблица 2

Начальная скорость, м/с	Время взрыва фольги t_1	Время формирования плазменного поршня t_2
	мкс	
0	40 ÷ 50	150 ÷ 160
700	25	100 ÷ 120
900 ÷ 1100	Нестабильная инициация	

скорости макрочастицы и поведения плазменного поршня при изменении градиента тока в цепи МПУ.

Серия экспериментов выполнена на установке ЭММУ-10, принципиальная электрическая схема которой показана на рис. 1. Источник электропитания построен по принципу «длинной линии», позволяющей формировать импульс тока в МПУ требуемой формы. Параметры источника приведены в табл. 1. Модули батареи электрически независимы и могут подключаться к нагрузке одновременно или последовательно друг за другом с задержками по времени. В процессе эксперимента измерялись: токи (до ускорителя I_B , после I_H , утечки I_{UT} , в отдельных модулях батареи I_1, I_2, I_3, I_4) с помощью пояса Роговского, напряжения на входе $U_{ВХ}$ и выходе $U_{ВЫХ}$ МПУ делителями напряжения, скорость плазменного поршня внутри ствола индуктивными датчиками ИД₁, ..., ИД_n, скорость макрочастицы в полете рамками с разрывными проволочками КД₁, КД₂ и с помощью

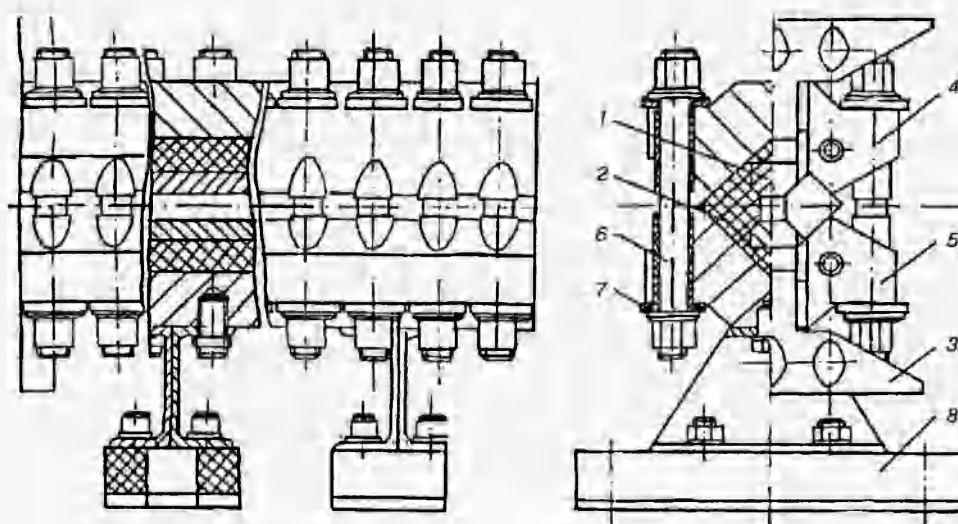


Рис. 2

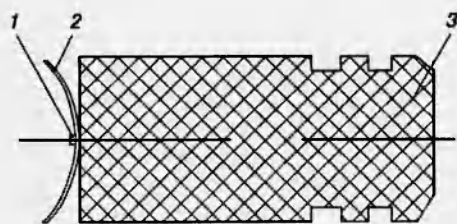


Рис. 3

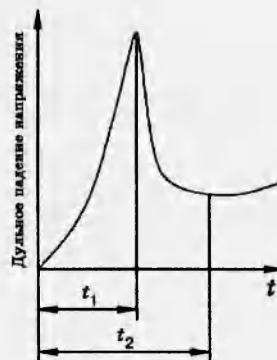


Рис. 4

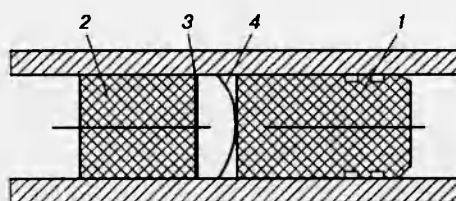


Рис. 5

высокоскоростной киносъемки камерами ЖЛВ-2 и ВСК-5. Расстояние между ИД было $150 \div 250$ мм и определялось конструкцией ускорителя. Показания датчиков регистрировались многоканальными устройствами типа ADAM-TMS-2008, а затем обрабатывались на ПЭВМ АТ/286.

Экспериментальные исследования проведены на МПУ типа Т2М, поперечное сечение которого показано на рис. 2. Силовой корпус ускорителя выполнен из высокопрочной стали, термообработанной до твердости по Роквеллу 380...420 МПа. Он состоит из крышки 4 и основания 5, соединенных вместе шпильками 6. Шпильки сделаны из стали, термообработанной до $\sigma_b = 1400 \dots 1600$ МПа, с относительным удлинением более чем 8%. Длина корпуса 2 м; калибр канала, его конфигурация, материалы рельсов и изоляторов могут изменяться в зависимости от задачи эксперимента за счет изготовления соответствующего сменного внутреннего модуля. Последний состоит из рельсов 1 и межрельсовых изоляторов 2. После сборки финишная обработка канала производится набором специальных разверток. При этом отклонение размеров канала не превышает 20 мкм. Обычно рельсы изготавливаются из прошедших температурную обработку специальных бронз, а изоляторы — из стеклотекстолита. Токоподвод к рельсам осуществляется медными шинами 3.

Расчеты напряженно-деформированного состояния конструкции показали, что она работоспособна при токах до 2 МА.

Эксперименты проведены при градиенте нарастания тока в цепи ускорителя $\approx 10^9$ А/с, характерного для установки ЭММУ-10.

Макротела с инициатором простейшей конструкции (рис. 3, где 1 — винт, 2 — фольга (Cu), 3 — поликарбонат). Масса фольги менялась от 0,1 до 0,25 г. В табл. 2 представлены основные результаты экспериментов данной серии.

Рис. 4 поясняет введенные понятия времени взрыва фольги t_1 и формирования плазменного поршня t_2 .

Как показал анализ экспериментов, инициатор простейшей конструкции обеспечивает

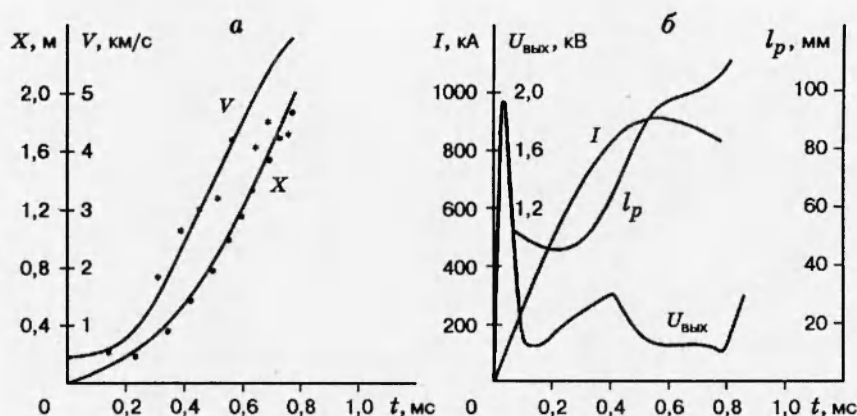


Рис. 6

устойчивое формирование плазменного поршня при начальной скорости до 700 м/с. Попытки применить данную конструкцию инициатора при начальной скорости 900...1000 м/с оканчивались неудачно: процесс инициации был неустойчивым; он мог как закончиться в середине канала ускорителя, так и не произойти совсем.

Дуэтное метаемое тело (рис. 5). В соответствии с названием дуэтное тело состоит из двух частей: макрочастицы 1 с инициатором 4 и вспомогательного поршня 2, масса которого в 2–5 раз больше массы макрочастицы; между ними помещается войлочный пыж 3. Впервые идея дуэтного тела была высказана А. Д. Лебедевым [3]. Составная конструкция метаемого тела образует систему, позволяющую ограничить объем, в котором формируется плазменный поршень на начальной стадии развития.

При использовании дуэтной конструкции метаемого тела удалось достичь стабильной инициации и формирования плазменного поршня при начальных скоростях до 1100 м/с. При этом время взрыва фольги $t_1 = 50 \div 70$ мкс, а время формирования плазменного якоря $t_2 = 200 \div 300$ мкс.

Типичные зависимости скорости V и положения X метаемого тела, тока в цепи I , напряжения на выходе ускорителя $U_{\text{вых}}$, длины поршня l_p от времени приведены на рис. 6, а, б.

В процессе экспериментов выяснено, что: 1) при начальных скоростях выше 1100 м/с процессы инициации и формирования плазменного поршня снова становятся нестабильными, 2) дуэтная конструкция метаемого тела не предохраняет поршень от расслоения при изменении градиента тока в цепи ускорителя.

Якорь переходного типа. Два типа конструкции макрочастицы с переходным якорем показаны на рис. 7. В хвостовой части макрочастицы с помощью винта 1 крепится кольцо или «скоба» из сплава алюминия, масса которого $2 \div 10$ г в зависимости от массы макрочастицы (2 — поликарбонат).

При метании макрочастицы с инициатором такой конструкции режим протекания тока через поверхность раздела рельс/якорь последовательно проходит три стадии: металлический режим, квазиметаллический (микродуговой) и дуговой. Об этом можно судить по виду падения напряжения на выходе из ускорителя. Типичные зависимости скорости, положения метаемого тела, тока в цепи, напряжения на выходе ускорителя и длины поршня от времени приведены на рис. 8, а, б.

При использовании макрочастицы с переходным якорем достигнуты надежная инициация и формирование плазменного якоря при начальной скорости до 1200 м/с. Косвенные результаты по ускорению макрочастиц массой $50 \div 300$ г [3] с металлическим якорем позволяют утверждать, что подобное решение будет работоспособным, по крайней мере, при

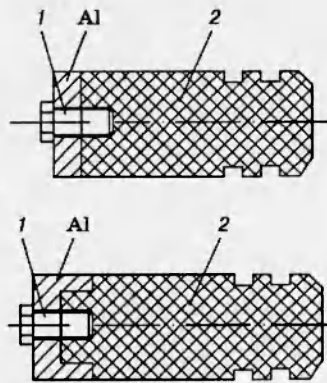


Рис. 7

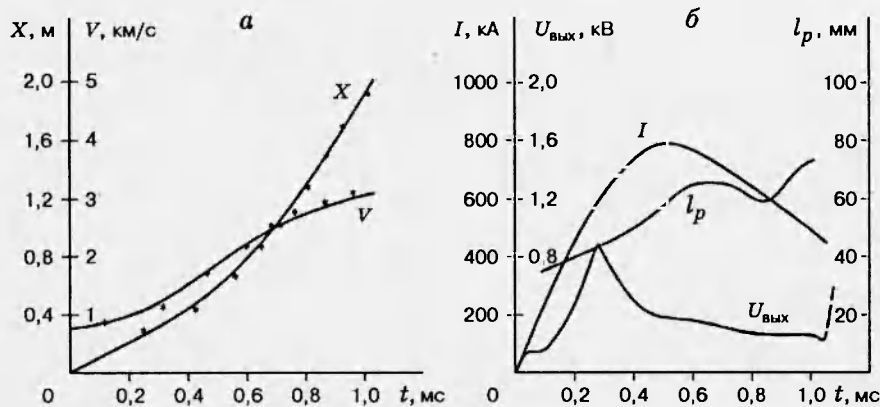


Рис. 8

начальных скоростях $1800 \div 2000$ м/с.

Переходный якорь также позволяет убрать пик напряжения в цепи ускорителя, вызванного взрывом инициатора. Это улучшает работу источника электропитания МПУ.

Экспериментальные исследования показали, что после формирования плазменный поршень ведет себя устойчиво при положительном градиенте тока в цепи ускорителя. Характерные особенности такого режима следующие: длина плазменного поршня составляет $3 \div 5$ калибров канала МПУ, расчет по методике в электротехническом приближении при задании эффективных параметров поршня, взятых из данного опыта, соответствует эксперименту.

Если ток в цепи МПУ содержит участки резкого изменения градиента, то плазменный поршень расслаивается, его длина резко увеличивается (до 10 калибров и более).

Отметим, что расслоение поршня происходит именно в том случае, если его формирование завершилось до момента изменения градиента тока. Если в момент изменения градиента тока в цепи режим протекания тока через поверхность рельс/якорь носит металлический или микродуговой характер, то в дальнейшем плазменный поршень нормально формируется и остается компактным даже при отрицательном градиенте тока в цепи МПУ.

С этой ролью хорошо справляется так называемый переходный якорь. Сказанное выше иллюстрируется зависимостями длины плазменного поршня от времени для дуэтного

тела и макрочастицы с переходным якорем, приведенными на рис. 6 и 8 соответственно. Применение переходного якоря позволило обеспечить устойчивое ускорение макрочастицы при уменьшении тока до 0,6 его максимального значения, что особенно важно при использовании источника электропитания, базирующегося на накопителях энергии индуктивного типа.

Таким образом, проведено сравнение различных конструкций инициатора, позволяющих обеспечить устойчивое формирование плазменного поршня в МПУ при начальных скоростях до 1200 м/с. Также предложено решение, дающее возможность сохранить плазменный поршень компактным при изменении градиента тока в цепи ускорителя. Результаты исследований могут быть применены при разгоне макрочастиц до гиперскоростей в МПУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жигар Т. А., Кудрявцев А. В., Кучерявая И. Н. и др. Математическое моделирование электромеханических и тепловых переходных процессов в магнито-плазменном ускорителе // Теплофизика высоких температур. 1991. Т. 29, вып. 2. С. 360–364.
2. Bedford A. J. Rail damage in a small calibre railgun // IEEE Trans. Magn. 1984. V. 20, N 2. P. 348–351.
3. Железный В. Б., Лебедев А. Д., Плеханов А. В. Воздействие на динамику разгона якоря в РЭУ // Материалы II Всесоюз. семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 1992. С. 16–32.

Поступила в редакцию 30/XII 1994 г.
