

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ АППАРАТЫ И КОНСТРУКЦИИ

УДК 533.9 + 620.193.1

### ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В МПУ-КАНАЛАХ С РАЗЛИЧНЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ ТОКОПОДВОДА

© 1993 г. О. В. Фатьянов, В. Е. Осташев, Е. Ф. Лебедев

НО ИВТ РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 30.09.92 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований трех модификаций магнитоплазменного ускорителя диэлектрических макротел (МПУ). Схемы различались направлением подвода тока к подвижной токовоплазменной арматуре ускорителя (ТПА). При прямом сопоставлении выявлены преимущества схем с обращенным и комбинированным токоподводом в сравнении с каноническим МПУ в части реализации запаса по устойчивости ТПА по отношению к возможности ее распада с образованием паразитных шунтирующих перезамыканий рабочего тока. Преимущества этих схем МПУ проявляются также в сохранении устойчивости ТПА при значительном уменьшении пондеромоторной силы в процессе движения, повышении степени пространственной локализации ТПА и эффективности ее воздействия на ускоряемое макротело в связи с сокращением протяженности бестоковой буферной зоны между ними.

Достижение высоких скоростей в неразрушающем гиперскоростном разгоне макротел связывают с созданием электромагнитных ускорителей и, в частности, рельсотронов [1 - 5]. Канонический рельсотрон представляет собой линейный электродвигатель (рис. 1а), в котором подвижный элемент рабочего электрического контура с током  $I$  (якорь 1) ускоряется в собственном магнитном поле  $B$  этого контура. Воспроизводимые в экспериментах скорости разгона до 6 - 7 км/с получены при ускорении неэлектропроводящих макротел (МТ) массой  $\sim 1$  г в рельсотронах с плазменным якорем (токовоплазменной арматурой), так называемых магнитоплазменных ускорителях [6 - 9].

Причины ограничения эффективности преобразования электромагнитной энергии в кинетическую в МПУ многообразны [10 - 14]. Одной из основных является пространственная делокализация ТПА в МПУ-канале, сопровождающаяся, в частности, образованием паразитных перезамыканий тока в рабочем контуре – межэлектродном промежутке канала – как позади ТПА, в следе арматуры [15 - 17], так и перед МТ [18 - 20].

В каноническом МПУ поиски путей предотвращения перезамыканий рабочего тока в следе ТПА сосредоточены, в основном, на различных вариантах ограничения интенсивности эрозионных (абляционных) потоков в МПУ-канал, обусловленных мощными потоками тепла на его стенки, либо за счет использования конструктивных материалов с повышенной тепло- и эрозионной стойкостью [21 - 25], либо за счет тепловой разгрузки канала при уменьшении разрядного тока [26 - 28] или пролетного времени ТПА [29].

В [10 - 14] показано, что влияние эрозии на процессы в МПУ многообразно, а утверждение, что эрозия – основная причина нереализуемости ожидаемых параметров МПУ, ограничено, а возможно, и ошибочно [16, 30]. Действительно, на путях борьбы с эрозией не было получено новых результатов по скорости разгона МТ. Далее, в соответствии с [30], задача принципиального исключения эрозионных потоков в канал при разгоне в МПУ массивных МТ ( $\sim 1 - 10$  г) с умеренных начальных скоростей ( $\sim 1$  км/с) является задачей гипотетической и потому вряд ли разрешимой. Есть данные, показывающие, что устойчивость следа ТПА по отношению к возможности формирования там паразитных шунтирующих перезамыканий рабочего тока увеличивается при увеличении массовой плотности следа [28, 31, 32], т.е. если эрозия неизбежна, то, как это ни парадоксально, в целях стабилизации электропроводящего эрозионного следа ТПА ее необходимо интенсифицировать [16].

Поскольку вопрос о влиянии эрозии и газодинамических потоков, ею порождаемых, на динамику разгона МТ в МПУ является сложным, а исследования этих процессов оказались малорезультативными с точки зрения преодоления сложившихся рубежей скоростей разгона МТ, представляют несомненный интерес иные попытки решения основных проблем реализации эффективного разгона в МПУ и, прежде всего, проблем устойчивости следа ТПА по отношению к возникновению паразитных перезамыканий рабочего тока в МПУ-канале. Так, например, в [33] построен полный ряд возможных схмотехнических модификаций рельсотрона. Приведены схемы, отличающиеся от канонической направлением

подвода тока к подвижному якорю (направление соотносится с направлением движения якоря). Показано, что условия токоподвода (прямой, обратный, двусторонний) изменяют, в частности, уровни межэлектродных электрических напряжений в МПУ-канале и характер распределения потенциала вдоль электродов. Указано, что схемы с прямым и обратным токоподводом являются полярными по уровню устойчивости к паразитным переключениям рабочего тока в МПУ-канале: первая – худшая по устойчивости следа движущегося якоря, но лучшая по устойчивости фронтальных областей канала и, наоборот, для схемы с обратным токоподводом. Схема с двусторонним токоподводом занимает в этом ряду промежуточное положение. Ввиду важности условий токоподвода к движущемуся якорю для организации его электромагнитного разгона, в [33] предложено включить их составной частью в базовую классификацию схемотехнических модификаций рельсотронов, образованную по следующим признакам: по типу подвижного якоря, по способу организации ускоряющего магнитного поля, по способу энергоподвода к рельсотрону.

Цель данной работы состояла в экспериментальном исследовании эволюции токовоплазменной арматуры в МПУ-каналах, отличающихся направлением токоподвода к ТПА, а также в прямом сопоставлении этих схем по уровню устойчивости ТПА по отношению к возможности ее распада с образованием в канале паразитных переключений рабочего тока.

### Экспериментальная установка

Основой экспериментальной установки был МПУ с прямоугольным каналом сечением от  $6 \times 4$  до  $10 \times 8$  мм<sup>2</sup>. Длина базы разгона ускорителя составляла 1 м. Т-образные электроды были изготовлены из меди, латуни, дюралюминия, а электроизолирующие стенки МПУ-канала – из стеклотекстолита или оргстекла. Дополнительный виток подмагничивания располагался симметрично в плоскости рабочего контура, образуемого электродами канонической схемы МПУ-канала. Коэффициент связи этих контуров по соотношению магнитных полей на оси канала при равных токах составлял 0.7. Задача его увеличения не ставилась.

Система электропитания на основе секционированного емкостного накопителя с независимо управляемыми коммутаторами обеспечивала необходимый уровень разрядных токов в цепях МПУ.

В качестве средств диагностики были использованы: замкнутые и разомкнутые пояса Роговского для измерения токов; до 15 индукционных магнитных зондов, распределенных вдоль оси канала в одной из электроизолирующих его стенок с шагом 65 мм, начиная от места начального раз-

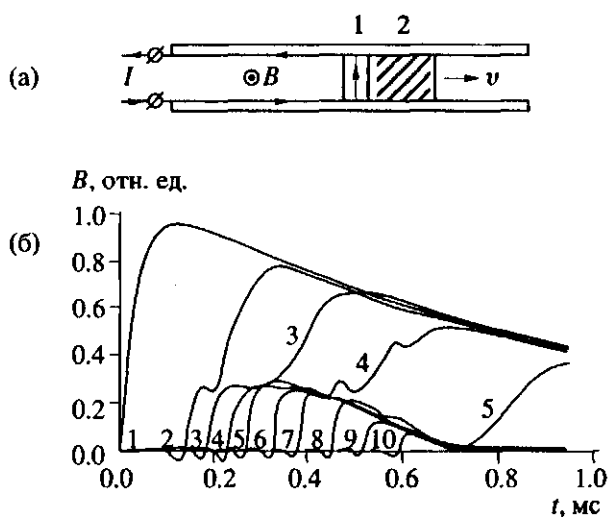


Рис. 1. Канонический МПУ. а – схема: 1 – локализованная ТПА; 2 – ускоряемое макротело. б – временная зависимость полного тока  $I$  и магнитного поля в канале для последовательного ряда зондов 2 - 10.

мещения МТ; помехоустойчивые измерители электрических напряжений на входе и выходе электродов, витке дополнительного подмагничивания; скоростная фоторегистрация МТ и контактные датчики времяпролетного сигнала для определения скорости МТ и установления соответствия пространственно-временных диаграмм движения МТ на баллистическом участке траектории и ТПА в МПУ-канале. Последнее использовано для диагностики положения ТПА по отношению к МТ.

Регистрация электрических сигналов производилась с помощью восьмиразрядных АЦП типа Ф4226 (20 МГц), входящих в комплекс автоматизированной системы сбора и обработки информации.

Использованные в экспериментах средства диагностики были адекватны поставленной задаче исследования эволюции ТПА в МПУ-канале. Погрешность регистрации разрядных токов, электрических напряжений, скоростей токовых фронтов и МТ не превышала 10%, а индуцированных магнитных полей – 20%. После каждого опыта производились осмотр разобранного МПУ-канала и анализ состояния его рабочих поверхностей. Во всех случаях при неизменных условиях постановки опытов (схема, геометрия и конструкционные материалы канала, масса МТ, способ инициирования ТПА, уровни разрядных токов и т.п.) их результаты были воспроизводимыми как в части динамики токовоплазменных образований в канале, так и скоростей вылета МТ.

### Обсуждение результатов

В экспериментах с канонической схемой МПУ (рис. 1а) использован канал с поперечным сечени-

ем  $6 \times 4 \text{ мм}^2$  и погонной индуктивностью электродной системы  $L \approx 0.25 \text{ мкГн/м}$ . Сечение канала выбрано сравнительно малым, чтобы при ограниченной его длине увеличить относительную роль газодинамических процессов, дестабилизирующих состояние ТПА, спровоцировать выраженный ее распад. С той же целью процесс был организован в основном на спадающей ветви рабочего тока (градиент  $\sim 80 \text{ кА/мс}$ ) [34]. При этом спад пондеромоторной силы  $Lidl/dt$ , определяемой по величине рабочего тока и соответствующего ему магнитного поля в канале, составил  $\sim 0.16 \times 10^4 \text{ Н/мс}$ . Отметим, что структура тока в МПУ-канале на рис. 1а изображена схематично и не отображает действительное его продольное распределение (то же для рис. 2а и рис. 3а).

На рис. 1б представлены результаты измерения полного тока  $I$  (амплитуда 110 кА) и магнитного поля разрядного контура (зонды 2 - 10). По магнитным зондам надежно зарегистрирован распад ТПА с образованием паразитного шунтирующего разряда в ее следе. Аналогичные по своему характеру данные приведены в [35, 36]. Головная ТПА протяженностью 2 - 5 см и средней плотностью тока 20 - 25 кА/см<sup>2</sup> затухала от уровня тока  $\sim 30 \text{ кА}$  и скорости 1.3 - 1.4 км/с вплоть до ее исчезновения примерно на 700 мкс от начала процесса (за 20 - 25 см до выхода из канала). При этом полный ток на входе МПУ составлял половину амплитудного значения. Протяженность паразитной шунтирующей ТПА в следе головной была 4 - 7 см. Эта ТПА отставала от головной структуры. К моменту затухания головной ТПА шунтирующая полностью перехватывала рабочий ток и в дальнейшем затухала по амплитуде и скорости в связи с его уменьшением. Вследствие затухания тока в МПУ-канале концевая зона электродов ( $\sim 30 \text{ см}$ ) практически не имела следов эрозии их рабочих поверхностей. Торможение разрядов, вплоть до остановки, отмечено также в [30, 32].

Макротело покидало МПУ-канал на 560 - 580 мкс со скоростью 1.6 - 1.7 км/с, превышающей максимальную скорость головной ТПА. К этому времени ТПА была удалена от МТ на расстояние до 30 см. Наличие этой бестоковой буферной зоны указывает, что ТПА в рассматриваемом случае не являлась токовым поршнем, непосредственно воздействующим на МТ в соответствии с представлениями о физической модели рельсотрона. В соответствии с [16, 30, 37] действие ТПА на МТ может быть опосредованным: пондеромоторная сила в разряде ускоряет поток электропроводного газа продуктов эрозии, который уносит механический импульс и тормозит разряд; ускоренный поток тормозится на диэлектрическом МТ и создает ускоряющую его газодинамическую силу; разряд при этом не связан с фиксированной массой газа и не локализован у поверхности МТ. Протяженность бестоковой буферной зоны является одним из параметров,

характеризующих меру приближения реального процесса к физической модели МПУ как ускорителя электромагнитного типа. Возможность существования буферной зоны отмечена в [38] и зарегистрирована в [39].

Торможение разрядов при уменьшении протекающего через них тока означает, что относительная роль сил торможения увеличивается. Одна из таких сил  $\sim \dot{m} v$  связана с ускорением некоторой части эрозионного потока со стенок МПУ-канала (размерность  $\dot{m}$  - г/с). Если принять, что поток этой массы  $\dot{m} \sim I$  [23, 40, 41], то допустимая его скорость  $v \approx F/\dot{m} \sim I$  действительно уменьшается при уменьшении разрядного тока ( $F$  - пондеромоторная сила). С возрастанием полной массы ускоряемого в разряде потока (в разряде, но не обязательно с разрядом [12, 16, 30, 37]) увеличивается также и относительная роль сил газодинамического торможения потока в пристеночных областях канала [42]. Эффекты торможения, обусловленные другими причинами, не обсуждаем.

Подтверждением того, что наблюдаемые процессы эволюции ТПА и динамика разряда действительно связаны с эрозионными потоками со стенок МПУ-канала (но, конечно же, не исчерпываются только ими [12 - 14, 37]), являются эксперименты с изменением величин этих потоков за счет изменения дугостойкости электроизолирующих стенок канала [30, 31, 34], ограничения рабочего тока [43], в том числе и в сочетании с дополнительным подмагничиванием [28], улучшения дугогасящих свойств продуктов эрозии за счет внесения галогеноподобных присадок [11, 28].

Таким образом, в представленных результатах экспериментов с канонической схемой МПУ, являющихся базовыми для последующих сравнений, проиллюстрированы: распад ТПА в канале, эволюция и динамика головного и паразитного шунтирующего плазодинамических разрядов, некоторые их электрофизические и кинематические параметры, наличие протяженной бестоковой буферной зоны, разделяющей МТ и ТПА.

Для реализации обращенного токоподвода к ТПА был модифицирован канал канонического МПУ (рис. 2а). Он был дополнен парой электродов для организации токоподводов, а также последовательно включенным контуром дополнительного подмагничивания для полной компенсации магнитного поля перед МТ. В целом этот канал имел погонную индуктивность, меньшую, чем канонический (0.15 мкГн/м), что должно было увеличить относительную роль газодинамических процессов, дестабилизирующих состояние ТПА. Вследствие подобия продольного распределения поперечного магнитного поля распределению в канонической схеме, рассматриваемая схема может быть и охарактеризована (описана) подобно канонической.

На рис. 26 представлены результаты измерений полного тока  $I$  и магнитного поля многовиткового разрядного контура (зонды 2 - 12). В основной своей фазе, как и в базовой серии опытов, процесс происходил на спадающей ветви рабочего тока, однако при несколько меньшем его градиенте ( $\sim 65$  кА/мс). Амплитуда рабочего тока в представляемой серии была выбрана большей, чем в базовой (150 кА), для интенсификации процессов распада ТПА в соответствии с экспериментальными результатами [30, 31, 34] и выводами [16, 17, 37], а также для сохранения на прежнем уровне скорости уменьшения пондеромоторной силы ( $\sim 0.15 \times 10^4$  Н/мс).

Магнитные зонды (см. рис. 26) отображают наличие в МПУ-канале двух токовых структур. Ток в головной ТПА составлял  $\geq 70\%$  текущих значений полного тока и оставался практически постоянным ( $\sim 100$  кА) при его уменьшении. Соответственно, ток в паразитной ТПА уменьшался от 55 до 35 кА к моменту вылета МТ из МПУ-канала ( $\sim 460$  мкс). По существу в этой схеме МПУ не паразитная ТПА шунтирует головную, а, наоборот, головная – паразитную, вследствие того, что отделена от источника электропитания меньшим электрическим сопротивлением. Это является одной из предпосылок к повышению устойчивости головной ТПА по отношению к дестабилизирующему влиянию паразитных перезамыканий рабочего тока в ее следе в МПУ с обращенным токоподводом. Повышение погонного сопротивления электродов канала в этой схеме способствует стабилизации ТПА позади МТ [33].

Протяженность головной ТПА составляла 4 - 5 см, средняя плотность тока в ней – 50 - 60 кА/см<sup>2</sup>, что указывает на более высокую степень пространственной локализации плазмодинамического разряда. Скорость фронта ТПА у выхода канала, как и скорость МТ, составляла 2.5 - 2.7 км/с. Протяженность бестоковой буферной зоны между фронтом головной ТПА и торцом МТ была на уровне погрешности ее измерения ( $\leq 5$  см). В отличие от базовой серии опытов с канонической схемой МПУ сильноточная ТПА проходила всю длину канала, что диагностировано также и по следам эрозии рабочих поверхностей электродов.

Важно указать, что в этих экспериментах при спаде полного тока не было отмечено торможения головной ТПА при практически постоянном токе через нее. Если предположить, что торможение в основном обусловлено ускорением части эрозийного потока с рабочих поверхностей МПУ-канала, то из баланса сил  $F = \dot{m} v$  для приведенных экспериментальных результатов следует, что  $\dot{m} = 0.3$  г/с, а соответствующий скорости образования этого потока эффективный коэффициент электроэрозионного переноса  $\dot{m}/I = 3$  мг/Кл. Эти данные соответствуют приведенным в [21, 23,

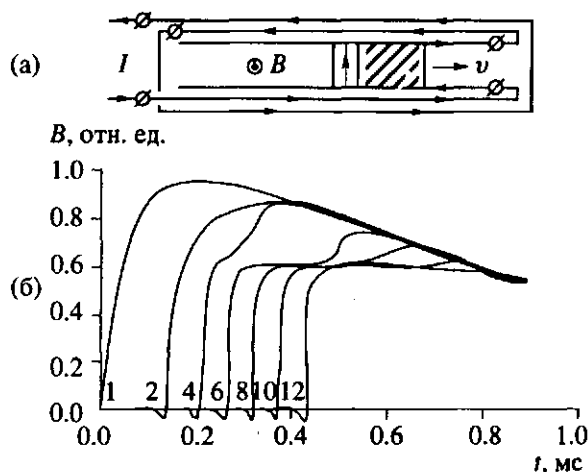


Рис. 2. МПУ с обращенным токоподводом к ТПА и дополнительным витком подмагничивания. а – схема; б – временная зависимость полного тока  $I$  и магнитного поля в канале для последовательного ряда зондов 2 - 12.

44], а также используемым в простейших расчетных моделях МПУ [19, 31, 40, 45 - 47].

Таким образом, эволюция ТПА в МПУ-канале с обращенным токоподводом к ней качественно отличается от эволюции ТПА в канонической схеме МПУ. Прежде всего это касается повышения устойчивости головной ТПА и уровня плотности тока в ней (степени пространственной локализации плазмодинамического разряда), отсутствия торможения этого разряда при спаде рабочего тока, уменьшения протяженности бестоковой буферной зоны, что в целом повышает эффективность работы ТПА, затрачиваемой на ускорение МТ.

В экспериментах с МПУ с двусторонним токоподводом к ТПА (рис. 3а) использован канал той же конструкции, но с поперечным сечением  $9.5 \times 7.6$  мм<sup>2</sup>. МПУ запитывался от трех независимых гальванически изолированных источников электропитания емкостного типа. Источники рабочего тока  $I$  присоединялись к электродам с противоположных концов каждый, были конструктивно тождественны, заряжались до одинакового напряжения и запускались одновременно. Поскольку их электрические нагрузки одинаковы, то и рабочие токи в обоих контурах практически совпадали, а в ТПА, общем элементе этих контуров, они суммировались. Соединение электродов канала с источниками электропитания осуществлено коаксиальными проводниками. Детали практической реализации схемы не обсуждаем.

В проведенной серии экспериментов токи подмагничивающего и рабочих контуров варьировались. Их амплитуды достигали 500 и 220 кА соответственно, а соотношения устанавливались так, чтобы магнитные поля позади и перед ТПА совпадали по направлениям, что соответствует условию отсутствия перерегулирования рабочего то-

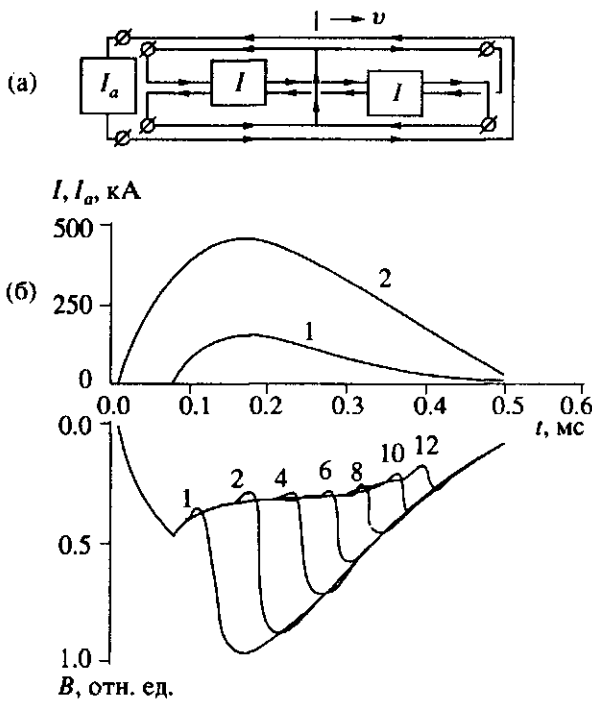


Рис. 3. МПУ с двусторонним токоподводом к ТПА (внутри канала – только ток в ТПА). а – схема; б – временная зависимость рабочего  $I$  и подмагничивающего  $I_a$  токов, магнитного поля  $B$  для последовательного ряда зондов 1 - 12.

ка [33]. Токи в этих контурах инициировались либо одновременно, либо с задержкой включения рабочего тока на 70 - 80 мкс. Как и в предыдущих опытах, в основной своей фазе процесс разгона МТ в МПУ был организован так, что происходил преимущественно при уменьшающихся во времени токах. Спад пондеромоторной силы за время пролета МТ МПУ-канала мог составлять до 90% от ее амплитудных значений, а скорость спада превышала значения в предыдущих опытах более чем на порядок величины. На рис. 3б представлены типичные результаты измерений токов в рабочих  $I$  и подмагничивающем  $I_a$  контурах, магнитного поля в канале (зонды 1 - 12). В приведенном опыте амплитуда тока подмагничивания была 460 кА, рабочего тока – 160 кА (в ТПА – 320 кА), спад пондеромоторной силы составил  $\sim 4 \times 10^4$  Н/мс, выходная скорость МТ массой 1.1 г – 3.4 км/с, вылет МТ из МПУ происходил через 350 - 360 мкс после включения рабочего тока.

Общим для этой серии экспериментов было отсутствие распадов ТПА с образованием паразитных шунтирующих разрядов в ее следе, выраженного торможения ТПА при значительном уменьшении пондеромоторной силы, а также отсутствие бестоковой буферной зоны. Протяженность ТПА не превышала 8 см, а в опытах с опережающим включением поля подмагничивания – 6 см. Полуширина профиля плотности тока составляла соответственно 2 - 4 и 1.5 - 3 см, а ее

амплитудные значения превосходили 100 кА/см<sup>2</sup>. Протяженность ТПА сокращалась при уменьшении рабочего тока, увеличении поля подмагничивания, а также при опережающем его включении. На основе полученных данных авторам не удалось с удовлетворительной точностью оценить усредненную напряженность электрического поля в разряде по измерению напряжения на выходе электродов рабочего контура с тем, чтобы оценить положение этого разряда на вольт-амперной характеристике, приведенной в [21, 48]

Таким образом, экспериментальные исследования схемы МПУ с двусторонним токоподводом к ТПА показали, что эволюция ТПА в этой схеме качественно отличается от эволюции в схеме канонической. В интервале исследованных параметров и скоростей разгона МТ до  $\sim 4$  км/с ТПА локализована до плотностей тока, превышающих уровень 100 кА/см<sup>2</sup>, не распадается и не тормозится при значительном уменьшении пондеромоторной силы, следует практически непосредственно за МТ (бестоковая буферная зона не регистрируется использованным методом).

При электромагнитном ускорении в рельсотроне сосредоточенный якорь должен ускоряться в соответствии с зависимостью  $\dot{v} \sim I^2$  для любого временного профиля рабочего тока. В каноническом МПУ наблюдаются распады и торможение ТПА, причем чаще на спадающей ветви рабочего тока [32]. В исследованных схемах МПУ с обращенным и двусторонним токоподводом не было отмечено ни распадов, ни торможения ТПА и при значительном уменьшении пондеромоторной силы в процессе движения. Учитывая погрешность измерений кинематических параметров, авторы не имеют достаточных оснований утверждать, что в модифицированных схемах МПУ ускорение ТПА осуществлялось в режиме электромагнитного разгона во всем диапазоне исследованных токов. Отмечено, однако, что с возрастанием амплитуды рабочего тока расхождение расчетных (по модели рельсотрона) и экспериментальных результатов по скорости ТПА увеличивалось.

Представленные экспериментальные результаты, полученные при прямом сопоставлении исследуемых схем МПУ, иллюстрируют преимущества схем с обращенным и комбинированным токоподводом в сравнении с каноническим МПУ. Они проявляются в реализации большего запаса по устойчивости ТПА по отношению к возможности ее распада с образованием паразитных шунтирующих перезамыканий рабочего тока, в сохранении устойчивости ТПА при значительном уменьшении пондеромоторной силы в процессе движения, в повышении степени пространственной локализации ТПА и эффективности ее воздействия на МТ в связи с сокращением протяженности бестоковой буферной зоны между ними.

Отмеченные отличительные качества модифицированных схем рельсотронов создают необходимые предпосылки для постановки задачи о реализации электромагнитного режима разгона МТ в магнитоплазменном ускорителе и достижения на этой основе гиперскоростей метания, превосходящих по своему уровню достигнутые в типовых режимах электрогазодинамического разгона, при высокой эффективности преобразования электромагнитной энергии в кинетическую.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barber J.P., Marshall R.A., Rashleigh S.C. // In *Megagauss Physics and Technology* // Ed. P.J. Turchi. N.Y.: Plenum Press, 1980. P. 287.
2. Proc. III Symp. on EML Technology // IEEE Trans. Magn. 1986. V. 22. No. 6.
3. Proc. IV Symp. on EML Technology // IEEE Trans. Magn. 1989. V. 25. No. 1.
4. Proc. V Symp. on EML Technology / IEEE Trans. Magn. 1991. V. 27. No. 1.
5. Материалы I Всесоюзного семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле / Под ред. М.Ф. Жукова. Новосибирск: ИТФ СО РАН, 1990.
6. Rashleigh S.C., Marshall R.A. // J. Appl. Phys. 1978. V. 49. No. 4. P. 2540.
7. Hawke R.S. // Nuclear Instr. and Methods in Physics Res. 1989. V. 40/41. P. 1084.
8. Shvetsov G.A., Titov V.M. // *Megagauss fields and pulsed power systems* // Ed. V.M. Titov, G.A. Shvetsov. N.Y.: Nova Sci. Publ., 1990. P. 767.
9. Дробышевский Э.М., Розов С.И., Жуков Б.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 2. С. 23.
10. Parker J.V. // In [3]. P. 418.
11. Barber J.P., Marshall R.A. // In [4]. P. 323.
12. Лебедев А.Д. В [5]. С. 333.
13. Осташев В.Е. В [5]. С. 346.
14. Лебедев Е.Ф., Осташев В.Е., Фортвов В.Е. // В кн.: II Всесоюзный симп. по радиац. плазмодинамике. Тез. докл. Ч. 1. М.: МГТУ, 1991. С. 15.
15. Ray P.K. // In [3]. P. 485.
16. Протасов Ю.С., Чувашев С.Н., Осташев В.Е., Фортвов В.Е. // Докл. АН СССР. 1989. Т. 309. № 3. С. 339.
17. Davidson P.A. // J. Appl. Phys. 1991. V. 69. No. 3. P. 1237.
18. Кондратенко М.М., Лебедев Е.Ф., Осташев В.Е. и др. // ТВТ. 1988. Т. 26. № 1. С. 159.
19. Дьяков Б.Б., Резников Б.И. // В [5]. С. 38.
20. Stainsby D.F., Bedford A.J. // IEEE Trans. Magn. 1984. V. 20. No. 2. P. 332.
21. Игнатко В.П., Кресанова А.Н., Минакова Р.В., Теодорович О.К. // Proc. II Int. Symp. on switching arc phenomena. Lodz, 1973. P. 318.
22. Askew R.F., Chin B.A., Tatarchuk B.J. et al. // In [2]. P. 1380.
23. Donaldson A.L., Engel T.G., Kristiansen M. // In [3]. P. 138.
24. Лебедев А.Д., Малевинский К.В. // В [5]. С. 160.
25. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Численный расчет нестационарных электромагнитных и тепловых процессов в зоне высокоскоростного скользящего контакта // Препринт № 714. Киев: Ин-т электродинамики, 1992.
26. Shrader J.E., Born A.J., Thompson J.G. // In [2]. P. 1739.
27. Марио Т., Фуџиока К., Нагаока К. et al. // In [4]. P. 65.
28. Осташев В.Е., Поляков А.А., Фатьянов О.В. // ТВТ. 1992. Т. 30. № 2. С. 379.
29. Hawke R.S., Susoeff A.R., Asay J.R. et al. // In [4]. P. 28.
30. Осташев В.Е., Фатьянов О.В. // ТВТ. 1992. Т. 30. № 6. С. 1061.
31. Parker J.V., Parsons W.M., Cummings C.E., Fox W.E. // AIAA Paper. 1985. No. 1575.
32. Witherspoon F.D., Burton R.L., Goldstein S.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1989. V. 17. No. 3. P. 353.
33. Фатьянов О.В., Осташев В.Е., Лопырев А.Н., Ульянов А.В. // ТВТ. 1993. Т. 31. № 3. С. 462.
34. Witherspoon F.D., Burton R.L., Goldstein S.A. // In [3]. P. 605.
35. Parker J.V., Parsons W.M. // In [2]. P. 1633.
36. Shvetsov G.A., Bashkatov Yu.L., Anisimov A.G., Stadnichenko I.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1989. V. 17. No. 3. P. 365.
37. Осташев В.Е., Лебедев Е.Ф., Фортвов В.Е. // ТВТ. 1993. Т. 31. № 2. С. 313.
38. Zollweg R.J. // In [3]. P. 648.
39. Clothiaux E.J., Villecco R.A., Cobb K.K. // In [4]. P. 294.
40. Хижняк Н.А., Бальбердин В.В. // В сб.: Исследование плазменных сгустков. Киев: Изд-во АН УССР, 1967. С. 89.
41. Колесников П.М. Электродинамическое ускорение плазмы. М.: Атомиздат, 1971.
42. Rolader G.E., Batteh J.H. // In [4]. P. 120.
43. Hawke R.S., Nellis W.J., Newman G.H. et al. // In [2]. P. 1510.
44. Белкин Г.С., Киселев В.Я. // ЖТФ. 1966. Т. 36. Вып. 62. С. 384.
45. Jackson G.L., Tower M.M., Haight C.H. // In [3]. P. 252.
46. Shahinpoor M., Hawke R.S. // In [3]. P. 508.
47. Weeks D.A., Weldon W.F., Zowarka R.C. // In [3]. P. 580.
48. Игнатко В.П., Чернявский Г.М. // В [5]. С. 88.