

УДК 629.036

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗГОНА В РЕЛЬСОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ МАСС

С. С. Кацнельсон, А. В. Загорский

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Изучена возможность стабилизации плазменной области в канале рельсового электромагнитного ускорителя путем ее пространственного ограничения и изменения скорости роста тока (в первом случае рассматривается составное тело ограничитель — ударник с электрическим разрядом между ними). Исследовано влияние начальной скорости составного тела и массы ограничителя на динамику разгона. Показано, что при таком подходе можно значительно уменьшить амплитуду колебаний параметров в плазменном поршне, его длину и в итоге повысить выходную скорость ударника. Возможность компактирования плазменной области за счет увеличения скорости роста тока изучена на примере линейного закона изменения тока. Получена оценка зависимости времени компактирования от скорости нарастания тока, совпадающая с результатами численных расчетов.

Введение. Интерес к проблеме ускорения легких тел до гиперзвуковых скоростей связан с метеоритной проблемой и ее моделированием в лабораторных условиях, а также с исследованиями в области физики высоких энергий. При решении этих задач наибольшее применение получили рельсовые электромагнитные ускорители (РЭУ). Анализ результатов их работы показал, что ускоряемая система метаемое тело — плазменный поршень обладает длительной “памятью” по отношению к начальным возмущениям. Нарушение силового равновесия в плазменном поршне на начальном этапе разгона приводит в дальнейшем к большим колебаниям электрических и газодинамических параметров, что, в свою очередь, влечет за собой дополнительные механические нагрузки на конструкцию, потери импульса, повышение вероятности вторичных пробоев за телом. В экспериментах обнаружено, что если на начальном этапе не происходило формирования компактной плазменной области, то эффективность разгона заметно снижалась. Нарушение силового равновесия связано с тем, что при нарастании тока от нуля магнитная сила вначале не в состоянии уравновесить газодинамическое давление, и сгусток плазмы, образовавшийся в результате электрического пробоя, быстро расширяется. К моменту, когда эти силы становятся равными, длина сгустка существенно больше равновесной длины, и при дальнейшем росте тока он начинает обжиматься. Возникает колебательный режим.

Возможными способами стабилизации плазменной области в начале процесса являются использование ее пространственного ограничения и увеличение скорости роста тока. Впервые экспериментально эти вопросы изучались в [1]. Представленные ниже результаты получены на основе численного моделирования работы РЭУ в рамках обобщенной модели токовой перемишки [2] и квазиодномерного приближения [3].

1. Использование составного тела для пространственного ограничения плазменной области. Рассматривается РЭУ с сечением канала $1,5 \times 1,5$ см и источником энергии, обеспечивающим постоянное напряжение 4 кВ. Монтажные индуктивность и сопротивление внешней цепи задавались равными 1 мкГн и 1 мОм соответственно. Предпо-

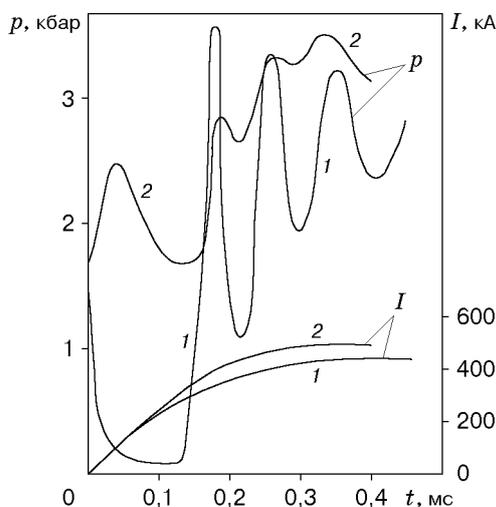


Рис. 1

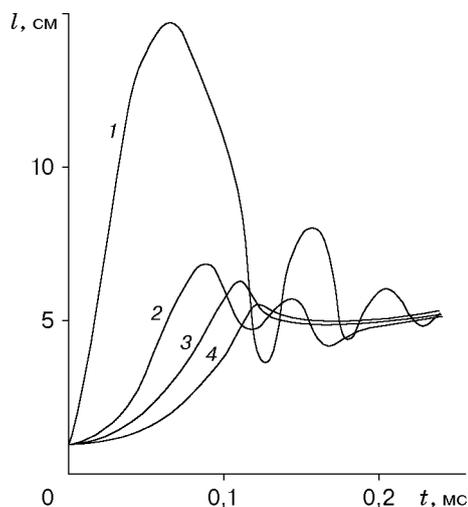


Рис. 2

лагается, что в начальный момент плазменный поршень образуется в результате подрыва фольги, расположенной между ударником и ограничивающим пространство телом, которое в дальнейшем будем называть ограничителем. В расчетах начальный процесс моделировался следующим образом. Задавалась узкая (менее 1 см) плазменная область с массой примерно 0,2 г при $t = 0$. Масса метаемого тела полагалась равной 5 г. Начальная скорость системы ограничитель — плазма — ударник изменялась в пределах $0 \div 6$ км/с, что предполагало наличие предускорительной секции, обеспечивающей заданную скорость.

На рис. 1 представлены давление плазмы на поверхность тела и полный ток для режимов ускорения с начальной скоростью 4 км/с без ограничителя (кривые 1) и с ограничителем массой 5 г (кривые 2). В первом случае вначале происходит газодинамический разлет сгустка, и давление в нем быстро падает. К моменту времени $t = 0,09$ мс магнитная сила прекращает расширение плазмы, задняя граница плазменной области начинает догонять ударник, формируя мощную волну сжатия, которая достигает тела при $t \approx 0,15$ мс. Затем процесс повторяется, в результате чего возникают колебания, затухающие вследствие трения, поступления в плазму эродированной массы и перераспределения тока в самом сгустке.

При наличии ограничителя процесс ускорения качественно меняется. Скорость расширения плазменной области и падение давления в ней существенно уменьшаются. К моменту $t \approx 0,04$ мс устанавливается баланс теплоподвода и излучения, рост температуры прекращается, и давление начинает падать, поскольку расстояние между границами области увеличивается (переднее тело ускоряется, заднее тормозится). При $t = 0,13$ мс магнитная сила отрывает газ от ограничителя и начинает обжимать плазму. Однако, поскольку к этому времени сгусток был достаточно компактным (7 см по сравнению с 19 см в случае отсутствия ограничителя), амплитуда возникающих затем колебаний мала и они практически не влияют на дальнейший процесс. При этом тело, пройдя в канале расстояние 1 м, приобретает скорость на 0,5 км/с больше, чем при отсутствии ограничителя.

Рассмотрим влияние массы и начальной скорости ограничителя на формирование плазменного поршня.

На рис. 2 представлены временные зависимости длины плазменного поршня l при начальной скорости $V_0 = 0$ и массе ограничителя $M = 0, 1, 5, 50$ г (кривые 1–4 соответственно). Видно, что уже при $M > 1$ г амплитуда осцилляций резко уменьшается и при $M \approx 5$ г они практически отсутствуют. В предельном случае очень тяжелого ограничителя ($M = 50$ г) формирование плазменного поршня происходит без каких-либо газо-

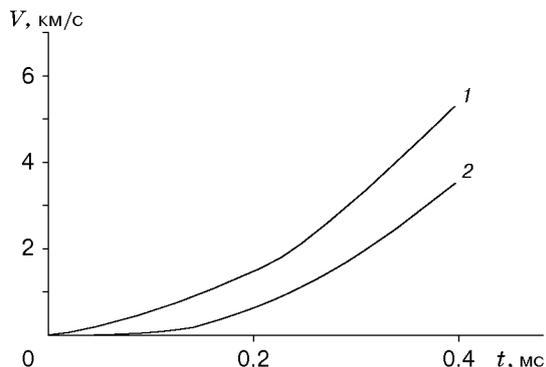


Рис. 3

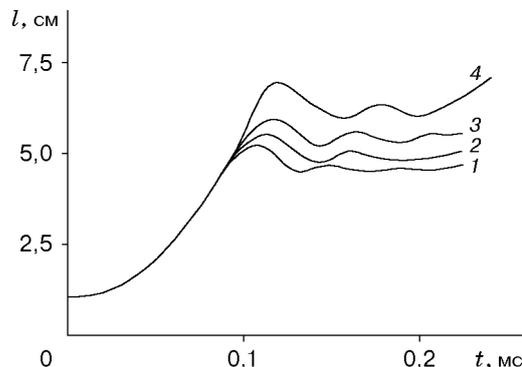


Рис. 4

динамических возмущений. На рис. 3 показана динамика разгона метаемого тела в двух предельных случаях: $M = 50$ г (кривая 1) и $M = 0$ (кривая 2). Видно, что в случае тяжелого ограничителя скорость разгона существенно выше.

На рис. 4 показано влияние начальной скорости на поведение плазменного поршня при $M = 5$ г: $V_0 = 0, 2, 4, 6$ км/с (кривые 1–4 соответственно). Наличие пятиграммового ограничителя обеспечивает компактность плазменного поршня в течение всего времени установления квазиравновесия.

2. Формирование плазменного поршня при различных скоростях роста тока. Для исследования поведения ускоряющейся системы при различных скоростях роста тока в расчетах параметры внешней цепи задавались такими, чтобы обеспечить изменение тока по линейному закону $I(t) = kt$. На рис. 5 представлены результаты расчетов при $V_0 = 4$ км/с, $M = 0$ и $k = 2 \cdot 10^9, 4 \cdot 10^9, 8 \cdot 10^9, 16 \cdot 10^9$ А/с (кривые 1–4 соответственно). Видно, что скорость изменения тока сильно влияет на процессы, происходящие на начальной стадии ускорения, поскольку чем быстрее растет ток, тем меньше успевает расшириться плазменный поршень до начала компактирования.

Время компактирования τ можно оценить следующим образом. Если скорость расширения сгустка (примерно равная скорости истечения в вакуум) V_p , то импульс, приобретаемый газом при разлете, будет порядка $m_{\text{п}}V_p$ ($m_{\text{п}}$ — масса плазмы). Для того чтобы скомпактировать сгусток, система должна передать плазме импульс того же порядка:

$$\int_0^{\tau} \frac{L_x I^2(t)}{2} dt \approx m_{\text{п}} V_p,$$

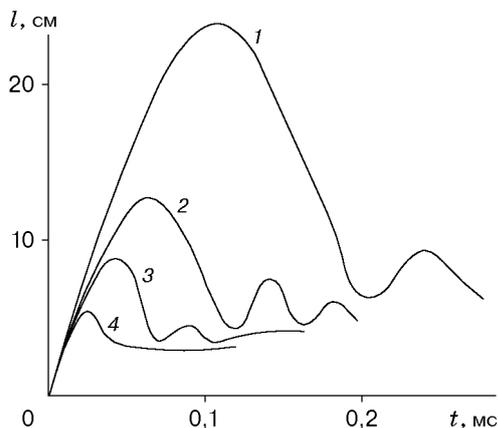


Рис. 5

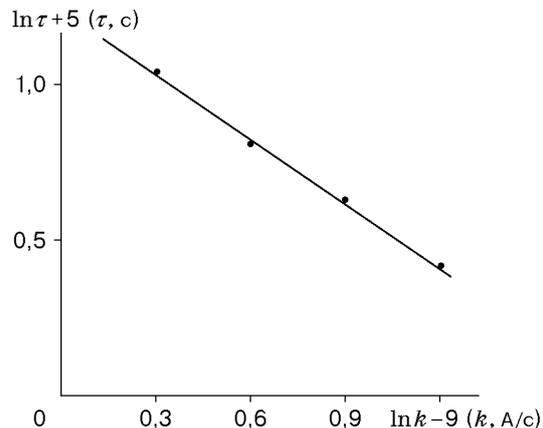


Рис. 6

где L_x — погонная индуктивность. Отсюда при $I = kt$ имеем $L_x k^2 \tau^3 / 6 \approx m_{\text{п}} V_p$ или $\tau \approx (m_{\text{п}} V_p / (L_x k^2))^{1/3}$. Следовательно, время компактирования τ определяется, главным образом, скоростью нарастания тока: $\tau \approx k^{-2/3}$.

На рис. 6 в логарифмических координатах представлена зависимость $\tau(k)$ (точки — данные расчетов, сплошная линия — их аппроксимация). Угловым коэффициентом наклона прямой равен приблизительно 0,7, что подтверждает сделанную выше оценку.

Заключение. Как показали проведенные исследования, начальный этап формирования плазменного поршня оказывает существенное влияние на динамику разгона ударника в целом, поэтому начальное компактирование плазменного поршня является необходимым условием повышения эффективности работы РЭУ. Показано, что использование задней подвижной стенки (ограничителя) обеспечивает компактирование плазменного поршня на начальном этапе ускорения. С увеличением скорости роста тока интенсивность компактирования плазменного поршня возрастает.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Железный В. Б., Лебедев А. Д., Плеханов А. В.** Воздействия на динамику разгона якоря в РЭУ // Материалы II Всесоюз. семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле, Новосибирск, 4–6 дек. 1991 г. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 1992. С. 16–32.
2. **Кацнельсон С. С.** Развитие обобщенной модели токовой перемычки // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1990. Вып. 2. С. 83–90.
3. **Загорский А. В., Кацнельсон С. С.** Динамика плазменного поршня в канале рельсового ускорителя масс // Теплофизика высоких температур. 1991. Т. 29, № 3. С. 446–452.

Поступила в редакцию 23/II 2000 г.
