

9. А. А. Губайдуллин, А. И. Ивандаев, Р. И. Нигматулин. ЖВМ и МФ, 1977, 17, 8.
10. Р. И. Нигматулин. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978.
11. А. И. Ивандаев, А. Г. Кутушев, Р. И. Нигматулин. Изв. АН СССР, МЖГ, 1982, 1.
12. Л. Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973.
13. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1953.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ РЕЛЬСОТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ПИТАНИЕМ ОТ ВЗРЫВНОГО МГД-ГЕНЕРАТОРА

*Г. А. Швецов, В. М. Тиглов, Ю. Л. Башкатов,  
И. А. Стадниченко, А. В. Орлов*

*(Новосибирск)*

В последние годы, начиная с [1], опубликовано значительное количество работ, посвященных исследованию возможностей электродинамического ускорения твердых тел в рельсотронных ускорителях и анализу физических процессов, происходящих в них (например, [2—5]). В указанных работах рассматривается возможность применения рельсотронных ускорителей для инициирования термоядерного синтеза, генерации сверхвысоких давлений, исследования уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях, имитации соударения метеоритов и других задач. По каждому из названных приложений исследователи надеются уйти в диапазон параметров, значительно превышающий современный уровень. Следует, однако, заметить, что большинство опубликованных работ — теоретические, иллюстрирующие лишь возможности электромагнитного ускорения по получению скоростей порядка 10—20 км/с и более при массе частиц в несколько грамм. Экспериментальные результаты [6, 7] более скромные и находятся на уровне [1]. Экспериментальные исследования как других авторов, так и наши собственные показывают, что надеяться на легкий путь в достижении высоких скоростей ускоряемых частиц не приходится. Требуются значительные дальнейшие усилия по пониманию физических процессов, происходящих в рельсотроне, техническим проработкам конструкций, оптимальному выбору материалов и т. п. Вместе с тем принципиальных физических ограничений на получение высоких скоростей не видно, и это вызывает повышенный интерес исследователей.

В качестве источника энергии для рельсотронного ускорителя используют униполярный генератор, конденсаторные батареи, взрывомагнитные генераторы и другие источники.

В данной работе исследуется возможность использования в качестве источника энергии взрывного МГД-генератора, работающего на газокумулятивных струях [8]. Интерес к данной схеме ускорения обусловлен тем, что магнитное число Рейнольдса газокумулятивной струи больше единицы и, кроме того, струя обладает большой кинетической энергией и высокой скоростью. КПД преобразования энергии ВВ в кинетическую энергию газокумулятивной струи достигает 40%, скорость ударной волны в воздухе при нормальном давлении 10—13 км/с, при давлении 1 мм рт. ст. скорость возрастает до 18 км/с [8]. Поэтому представлялось возможным использовать газокумулятивную струю в качестве рабочего тела взрывного МГД-генератора, у которого электродами являются шины рельсотронного ускорителя. В такой системе тело ускоряется сначала под действием электромагнитных сил, затем, когда газокумулятивная струя догонит тело, возможно дополнительное его ускорение газовым потоком,двигающимся с высокой скоростью.

**Электродинамическое ускорение твердых тел.** Схема рельсотронного ускорителя твердых тел с питанием от взрывного МГД-генератора изображена на рис. 1.

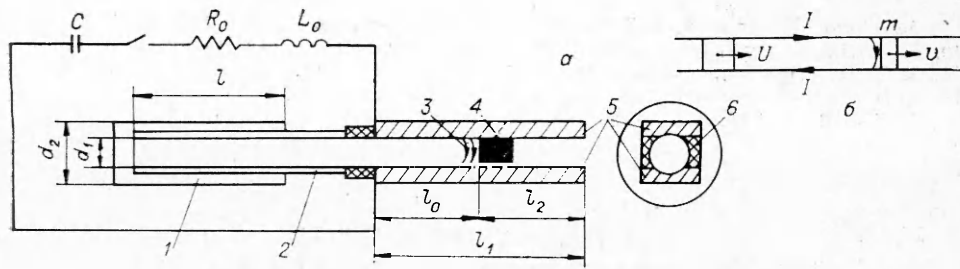


Рис. 1. Схемы рельсотрона с питанием от взрывного МГД-генератора (а) и работы взрывного МГД-генератора на рельсотрон (б).

1 — газокумулятивный заряд ВВ; 2 — облицовка газокумулятивного заряда; 3 — металлическая фольга; 4 — непроводящее ускоренное тело; 5 — электроды; 6 — изолятор.

При разряде конденсаторной батареи металлическая фольга взрывается, образуется плазма, которая, ускоряясь под действием протекающего в цепи тока, ускоряет тело. Процесс электродинамического ускорения твердого тела в рассматриваемой схеме можно разбить на две фазы: 1) ускорение от конденсаторной батареи, 2) ускорение от взрывного МГД-генератора. Включение генератора происходит в момент максимума тока разряда конденсаторной батареи. Пренебрегая силами трения и противодавления, можно записать уравнения для указанных фаз ускорения тела

$$i \leq i_1: \quad m \frac{dv}{dt} = \frac{I^2}{2} b, \\ \frac{d(L_1 I)}{dt} + R_1 I = \varphi_0 - \frac{1}{C} \int_0^t I dt, \quad (1)$$

$$L_1 = L_0 + b \left( l_0 + \int_0^t v dt \right);$$

$$i \geq i_1: \quad m \frac{dv}{dt} = \frac{I^2}{2} b,$$

$$\frac{d(L_2 I)}{dt} + R_2 I = 0, \quad (2)$$

$$L_2 = b \left( l_0 + \int_0^t v dt - \int_{i_1}^t U dt \right).$$

Здесь  $t$  — время, отсчитываемое от начала разряда батареи конденсаторов;  $t_1$  — момент максимума тока разряда батареи;  $m$ ,  $v$  — масса и скорость ускоряемого тела;  $I$  — ток в цепи рельсотрона;  $b$  — индуктивность канала на единицу длины;  $L_0$  — индуктивность подводящих линий;  $L_1$  — индуктивность рельсотрона при  $t \leq t_1$ ;  $L_2$  — индуктивность рельсотрона при  $t \geq t_1$ ;  $R_1$  — сопротивление подводящих линий и плазменной перемычки;  $l_0$  — начальное положение тела (см. рис. 1);  $R_2$  — сопротивление кумулятивной струи, шин и плазменной перемычки;  $C$  — емкость конденсаторной батареи;  $\varphi_0$  — начальное напряжение на конденсаторной батарее;  $U$  — скорость газокумулятивной струи.

Система (1), (2), описывающая процесс электродинамического ускорения твердого тела, допускает только численное решение. Для  $t > t_1$  изменение скорости тела можно представить следующим образом:

$$v = v_1 + \frac{b}{2m} \int_{t_1}^t \left\{ I_0 \frac{L_2(t_1)}{L_2(t)} \exp \left[ - \int_{t_1}^t \frac{R_2(t)}{L_2(t)} dt \right] \right\}^2 dt. \quad (3)$$

Здесь  $v_1$  — скорость тела при  $t = t_1$ . Если затухание в цепи конденсатор-

ной батареи меньше критического и смещение тела не изменяет существенно индуктивность цепи, т. е.

$$\alpha = \frac{R_1}{2\sqrt{L_1/C}} < 1, \quad b \int_0^{t_1} \frac{v dt}{L_0 + bl_0} \ll 1, \quad (4)$$

существует простое аналитическое решение системы (1) [9—11]

$$v_1 = \frac{b}{2m} \left( \frac{\varphi_0}{\omega L_1} \right)^2 \int_0^i \left[ \exp \left( -\frac{Rt}{2L_1} \right) \sin(\omega t) \right]^2 dt, \quad (5)$$

где  $\omega = \sqrt{1 - \alpha^2} / \sqrt{L_1 C}$ . В контуре без потерь ( $R_1 = 0$ ) в момент  $i_1 = \pi/2 \cdot \sqrt{L_1 C}$

$$v_1 = \frac{I_0^2 b}{16m} t_1. \quad (6)$$

Здесь  $I_0 = \varphi_0 / \sqrt{L_1 C}$ .

При  $R_2(t) / [dL_2(t)/dt] = \beta = \text{const}$  можно получить аналитическое выражение для второго члена в выражении (3), определяющего скорость тела при работе взрывомагнитного генератора на рельсотронный ускоритель. Будем полагать также, что скорость поршня остается при этом постоянной:  $U = U_0 = \text{const}$ .

В системе координат, движущейся со скоростью поршня  $U_0$ , можно выделить две стадии в работе устройства. На первой оно работает как генератор: кинетическая энергия тела  $mU_0^2/2$  переходит в электромагнитную энергию. Тело тормозится, пока не достигнет точки поворота  $x_t$ . На второй стадии тело будет ускоряться в обратном направлении. Физический смысл этой стадии соответствует работе индуктивного накопителя на рельсотронный ускоритель.

Скорость тела до точки поворота изменяется следующим образом:

$$\frac{v_2}{U_0} = \begin{cases} 1 - \sqrt{1 - \frac{A}{1-2\beta} \left[ \left( \frac{l_0}{l_0-x} \right)^{1-2\beta} - 1 \right]}, & \beta \neq 0,5, \\ 1 - \sqrt{1 - A \ln \frac{l_0}{l_0-x}}, & \beta = 0,5. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь  $(l_0 - x)$  — расстояние между телом и поршнем;  $A = \frac{L_2(0) I_0^2}{mU_0^2}$ . После точки поворота  $x_t$

$$\frac{v_2}{U_0} = 1 + \sqrt{\frac{A}{1+2\beta} \left( \frac{l_0}{x_t} \right)^{1-2\beta} \left[ 1 - \left( \frac{x_t}{l_0-x} \right)^{1+2\beta} \right]}. \quad (8)$$

Минимальное расстояние тела от поршня

$$\frac{x_t}{l_0} = \begin{cases} \left( \frac{A}{1+A-2\beta} \right)^{1/(1-2\beta)}, & \beta \neq 0,5, \\ \exp(-1/A), & \beta = 0,5. \end{cases} \quad (9)$$

Полученные аналитические выражения (3)—(9) позволяют рассчитать работу взрывомагнитного генератора на рельсотронный ускоритель. График зависимости  $v_2/U_0$  от  $(l_0 - x)/l_0$  при различных значениях  $\beta$  представлен на рис. 2. В предельном режиме работы генератора на рельсотронный ускоритель ( $\beta = 1$ ) ток в контуре остается постоянным. В этом случае  $v_2 = AU_0/2 \cdot t/T$ ,  $T = l_0/U_0$ . Время ускорения ограничено промежутком, за который поршень догонит ускоряемое тело. В дальнейшем возможно газодинамическое ускорение тела.

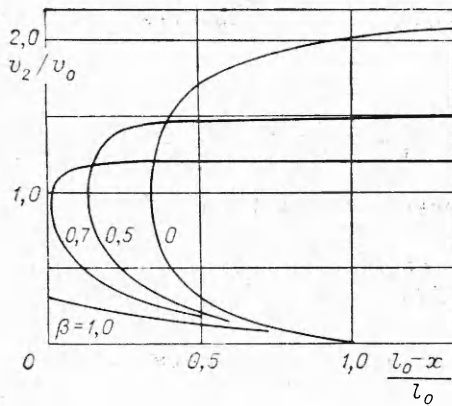


Рис. 2. Расчетная зависимость  $v_2/U_0$  от  $(l_0 - x)/l_0$  при  $A = 0,5$ .

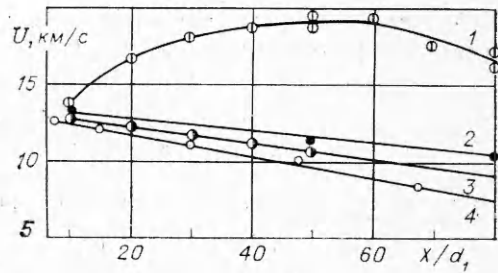


Рис. 3. Зависимость скорости ударной волны от пройденного расстояния  $X$ .

1 — заряд без облицовки при давлении воздуха 1 мм рт. ст.,  $l/d_1=25$ ; 2 — заряд с алюминиевой облицовкой при атмосферном давлении,  $l/d_1=15$ ; 3, 4 — заряд без облицовки при атмосферном давлении,  $l/d_1=25$  и 15 соответственно.

**Оптимизация газокумулятивного заряда ВВ.** Для создания проводящего поршня — рабочего тела МГД-генератора использован трубчатый заряд ВВ. Обозначим через  $d_2$ ,  $d_1$ ,  $l$  — соответственно внешний, внутренний диаметры и длину заряда ВВ,  $\delta$  — толщину облицовки внутренней полости заряда ВВ. В рассматриваемой комбинированной схеме ускорения твердых тел в рельсотронном ускорителе взрывной источник плазмы должен удовлетворять следующим требованиям:

1) необходимо обеспечить максимальную величину  $\eta$  коэффициента преобразования химической энергии ВВ в кинетическую энергию газового потока;

2) затухание скорости струи  $U$  с пройденным расстоянием должно быть минимальным.

Для газокумулятивного заряда ВВ  $\eta$  и  $U$  есть функции геометрических размеров заряда и толщины облицовки. На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость  $U(X/d_1)$ . Кинетическая энергия струи определялась по объему кратера  $V$  в стальной плите на расстоянии 50 мм от заряда. Как показывают многочисленные исследования по высокоскоростному удару и взаимодействию кумулятивных струй с преградами, объем кратера пропорционален кинетической энергии ударника [12]. На рис. 4 приведена экспериментальная зависимость  $V/M$  (величина, пропорциональная  $\eta$ ) от  $\delta$ . Зависимости  $V/M$  от  $l/d_1$  и  $V$  от  $l/d_1$  приведены на рис. 5. Большинство экспериментов выполнено с зарядами ВВ с наружным диаметром  $d_2 = 36$  мм,  $d_2/d_1 = 2,4$ , что близко к оптимальному [8].

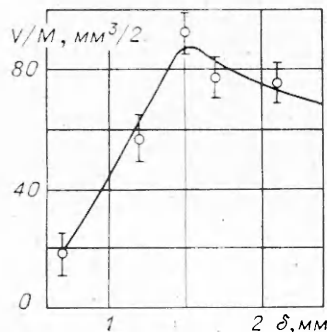


Рис. 4. Эффективность преобразования энергии ВВ в кинетическую энергию газокумулятивной струи в зависимости от  $\delta$ ;  $l/d_1 = 15$  ( $M$  — масса ВВ).

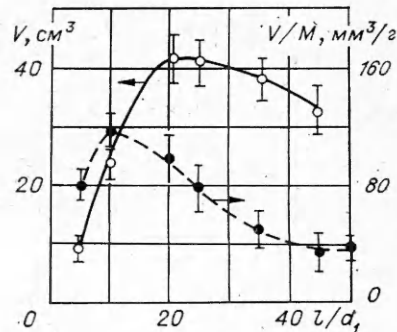


Рис. 5. Эффективность преобразования энергии ВВ в кинетическую энергию струи и кинетическая энергия струи в зависимости от  $l/d_1$ .

Из приведенных графиков следует, что для рассматриваемого заряда ВВ существуют оптимальные значения  $\delta$ ,  $l/d_1$ . В экспериментах по электродинамическому — газодинамическому ускорению твердых тел наиболее эффективно использовать заряды длиной  $(15 \div 25) d_1$  и  $\delta = 1,5$  мм.

**Эксперименты по метанию твердых тел.** Рельсотронный ускоритель представлял собой МГД-канал круглого сечения диаметром 11,7 мм. Длина МГД-канала — рельсотрона 1,8 м, электроды — из меди, боковые изоляторы — из текстолита, ускоряемое тело — из специальной пластмассы. Для создания необходимой прочности МГД-канал генератора и ускорителя помещали в стальную трубу и заливали эпоксидным компаундом. Для создания плазмы использовали медные фольги толщиной 30 мкм. При токе разряда 300—500 кА сопротивление плазмы, образующейся при взрыве фольги, равнялось  $5 \cdot 10^{-4} - 10^{-3}$  Ом. В качестве начального источника энергии использовали конденсаторную батарею ( $C = 20,4 \times 10^{-3}$  Ф,  $\varphi_0 = 5$  кВ). Взрывной МГД-генератор с оптимизированным зарядом ВВ обеспечивал поддержание тока в цепи величиной  $I_0$  в течение времени движения газокумулятивной струи в МГД-канале.

При токе 400 кА,  $l_2 = 0,9$  м и  $m = 1,3$  г в воздухе при атмосферном давлении стабильно регистрировались скорости 4,5—5 км/с. При увеличении тока до 500 кА наблюдалось незначительное повышение скорости в канале рельсотрона, однако тело после выхода из канала разваливалось. По-видимому, одна из основных проблем развития этого метода ускорения твердых тел заключается в подборе материала ускоряемого тела, способного выдерживать высокие динамические давления.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали, что предложенная комбинированная электродинамическая — газодинамическая схема ускорения твердых тел в рельсотронном ускорителе с питанием от взрывного МГД-генератора, электроды которого являются одновременно и электродами рельсотронного ускорителя, перспективна для получения скоростей 5—10 км/с. Для экспериментального освоения верхней части указанного диапазона скоростей необходимо, на наш взгляд, прежде всего решить вопросы, связанные с подбором материала ускоряемого тела. Увеличение длины рельсотронного ускорителя и вакуумирование канала также должно содействовать экспериментальному освоению диапазона скоростей 7—10 км/с.

Поступила в редакцию 24/XI 1983

#### ЛИТЕРАТУРА

1. S. C. Rashleigh, R. A. Marshall. J. Appl. Phys., 1978, 49, 4.
2. J. P. Barber, R. A. Marshall, S. C. Rashleigh. Megagauss Physics and Technology. N. Y.—L.: Plenum Press, 1980.
3. R. S. Hawke, J. K. Scudder. Ibid.
4. Proc. of the Impact Fusion Workshop. LA-8000-C, 1979.
5. Proc. of the Conference on Electromagnetic Guns and Launchers. San Diego, 1980.
6. C. M. Fowler, D. R. Peterson a. o. LA-UR-81-1883, 1981.
7. R. S. Hawke, A. L. Brooks a. o. UCRL-84875, 1980.
8. G. A. Shvetsov, V. M. Titov. Megagauss Physics and Technology. N. Y.—L.: Plenum Press, 1980.
9. Л. А. Арцимович, С. Ю. Лукьянов и др. ЖЭТФ, 1957, 33, 1 (7).
10. Г. Кнопфель. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
11. Г. А. Шнейерсон. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. Л.: Энергоиздат, 1981.
12. Физика быстропротекающих процессов. М.: Мир, 1971.