

3. Титов В. М., Фадеев Ю. И., Титова Н. С. Разгон твердых частиц кумулятивным взрывом.—«Докл. АН СССР», 1968, т. 180, № 5, с. 1051.
4. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений.—УФН, 1965, т. 85, вып. 2, с. 205.
5. Шер Е. Н. Дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, Институт гидродинамики СО АН СССР, 1965.
6. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М., «Наука», 1973.
7. Мерзиевский Л. А. О распределении размеров кратеров, образованных запреградным осколочным полем.— В кн.: Динамика сплошной среды. Новосибирск, изд. Ин-та гидродинамики СО АН СССР, 1970, № 5, с. 33.
8. Кузнецов В. М., Кошелев Э. А., Сафронов С. Т., Черников А. Г. Статистика осколков, образующихся при разрушении твердых тел взрывом.— ПМТФ, 1971, № 2, с. 87.
9. Беляков Л. В., Витман Ф. Ф., Златин Н. А. О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании.— ЖТФ, 1963, т. 33, вып. 8, с. 990.
10. Swift H. F., Preonas D. D., Turpin W. C., Carson J. M. Debris clouds behind plates impacted by hypervelocity pellets.—«J. of Spacecraft and Rockets», 1970, vol. 7, N 3, p. 313.
11. Витман Ф. Ф., Златин Н. А. О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании.— ЖТФ, 1963, т. 33, вып. 8, с. 982.
12. Watson R. W., Becker H. B., Gibson F. C. Thin plate perforation studies with projectiles in the velocity range from 2 to 5 km/sec.— In: Prock 6-th Sump. Hypervelocity Impact. Vol. 3, 1963, S. 1, p. 207.
13. Мерзиевский Л. А., Фадеев Ю. И. Разрушение тонкостенного трубопровода, заполненного жидкостью, при ударах метеоритов.— «Косм. исследования», 1973, т. 11, вып. 6, с. 944.

УДК 538.323:531.551

БЕСКОНТАКТНОЕ ИНДУКЦИОННОЕ УСКОРЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ ДО ГИПЕРЗВУКОВЫХ СКОРОСТЕЙ

В. Н. Бондалетов, Е. Н. Иванов

(Истра)

Приведены результаты экспериментального исследования индукционного ускорения кольцевых проводников массой (0,5—3) грамма в импульсном магнитном поле одновиткового индуктора. Показана эффективность использования малоиндуктивных емкостных накопителей энергии в сочетании с одновитковыми одноразовыми индукторами. Экспериментально получена скорость 3,7 км/с алюминиевого проводника массой 0,77 г. Описаны способы измерения сверхвысоких скоростей метаемых тел. В процессе эксперимента исследовалось взаимодействие ускоряемого проводника с толстыми и тонкими преградами, показана возможность регулирования площади поражаемой поверхности.

Результаты эксперимента хорошо совпадают с расчетом на ЭЦВМ, что свидетельствует о возможности дальнейшего увеличения скорости метания.

Устройства, обеспечивающие высокие скорости метания тел, применяются в настоящее время во многих областях науки и техники для исследования свойств материалов при импульсном нагружении, сварки при высокоскоростном соударении, кратерообразования при высокоскоростном ударе, изучения аэродинамических и физических или физико-химических явлений, возникающих при высокоскоростном полете, и т. д.

Среди разнообразных способов [1, 2, 3] ускорения твердых тел до

высоких и сверхвысоких скоростей перспективным является ускорение проводников в импульсном магнитном поле. При метании алюминиевых дисков массой 10—30 г в импульсном поле плоского индуктора были получены [4] скорости порядка 1 км/с. Для увеличения предельной по условиям нагрева скорости в [5] применено «разделение токов» в метаемом теле и индукторе и получены скорости до 10,5 км/с коротких алюминиевых проволок массой $(1-3) \cdot 10^{-4}$ г. Для ряда исследований требуется метание тел бóльшей массы.

В данной работе исследуется метание проводников массой 0,5—3 г до скоростей 3—5 км/с при использовании для создания сильных магнитных полей емкостного накопителя энергии.

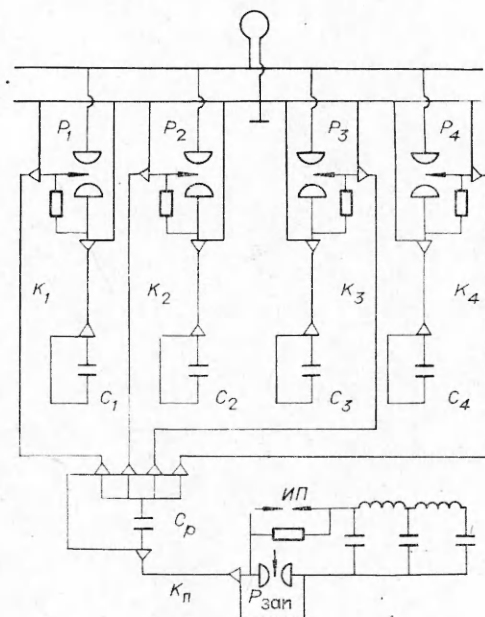
Экспериментальная установка. Применение емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) высокого напряжения в сочетании с малой индуктивностью разрядной цепи позволяет увеличить крутизну тока и соответственно уменьшить время нарастания магнитного поля.

На фиг. 1 представлена принципиальная электрическая схема экспериментальной установки. Конденсаторы каждого из четырех блоков ЕНЭ (C_1, C_2, C_3, C_4) при помощи коаксиальных кабелей подключены к разрядникам соответственно P_1, P_2, P_3, P_4 . В качестве основных коммутаторов использованы разрядники тригatronного типа с кольцевыми электродами, работающие при повышенном давлении воздуха в рабочем объеме. Разрядники объединены плоской ошиновкой из дюралюминия, имеющей малоиндуктивные выводы для подключения индукторной системы.

Конденсаторы батареи заряжаются до требуемого напряжения от зарядного устройства. Необходимое недонапряжение в промежутке между электродами разрядников регулируется давлением воздуха в рабочих камерах.

Напряжение противоположного знака подается на одну из обкладок разделительного конденсатора C_p и кабель поджига K_p . После прихода с пульта управления импульса напряжения на электрод поджига запускающего разрядника ($P_{зап}$), происходит его пробой и срез напряжения распространяется по кабелям (K_p, K_1, K_2, K_3, K_4) к электродам поджига разрядников. После пробоя разрядников происходит разряд четырех блоков ЕНЭ на индуктор.

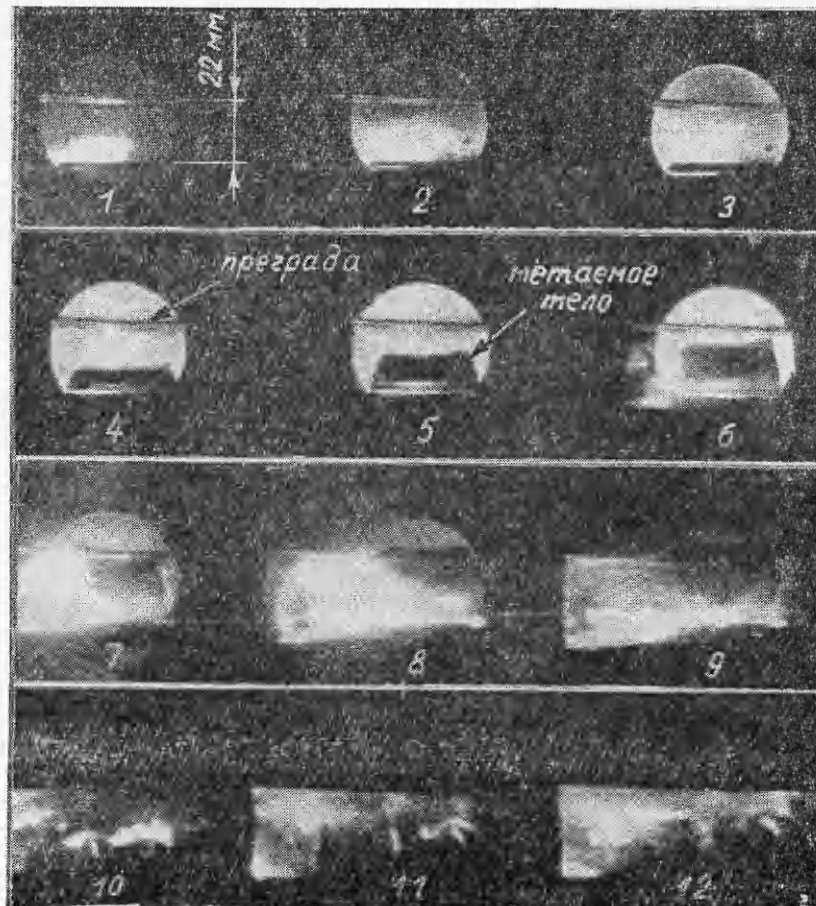
Индукторная система. При ускорении кольцевых проводников до сверхвысоких скоростей в силу ограниченной энергоемкости накопителей высокоскоростное метание может быть реализовано для тел сравнительно небольшой массы, что неизбежно приведет к уменьшению диаметра кольца, так как для достижения высоких по условиям нагрева предельных скоростей необходимо увеличивать сечение метаемого проводника. Для устранения радиальной составляющей силы, действующей на метаемое кольцо, диаметры кольца и индуктора должны быть равны [6].



Фиг. 1

Многokратная работа одновиткового индуктора малых размеров без его полного или частичного разрушения при пропускании больших импульсных токов ограничена механической прочностью индуктора [7, 8] и при полях порядка 100 Т и выше практически неосуществима. Сверхсильное поле можно создать, применяя тонкостенный индуктор, не обладающий большой механической прочностью. Так, в опытах по созданию сверхсильных (до 250 Т) магнитных полей авторы [9] использовали очень простую конструкцию катушки: изгибом медной пластины толщиной 1 мм создавался одновитковый соленоид. При этом, благодаря весьма малому времени нарастания (около 1,8 мкс), магнитное поле достигает максимума раньше, чем наступает существенная деформация и тепловое разрушение соленоида. В данной работе в качестве индуктора применялся кольцевой виток из медной шины шириной 4 мм и толщиной 1,8 мм. Этот виток является частью индукторной системы, которая позволяет надежно подключить индуктор к накопителю и быстро его заменить после разряда.

Измерение скорости метаемого тела. Одной из сложных задач при высокоскоростном ускорении является определение скорости тела. В данной работе измерение скорости производилось при помощи сверхскоростного фоторегистратора СФР-2М и контактнм методом.

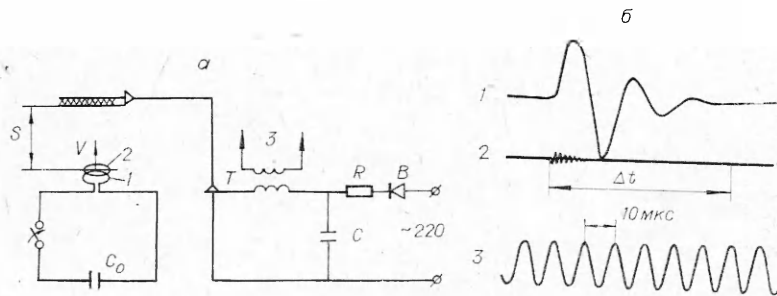


Фиг. 2



Фиг. 3

Сверхскоростное фотографирование процесса ускорения производилось в режиме лупы времени и фоторегистратора в проходящем свете теневого методом. Для подсветки использовалась оптическая система осветителя ОУ-2 с искровым источником света. Искра получала энергию от формирующей линии, которая создавала необходимую интенсивность и длительность подсветки. На фиг. 2 приведена типичная СФР-грамма процесса ускорения в режиме лупы времени. Плотные слои воздуха препятствуют прохождению света, поэтому участки пространства за телом затемнены. Кадр 7 иллюстрирует соударение тела с преградой. На кадрах 7—9 видно активное распространение ионизованных газов при взрыве индуктора. После пробоя алюминиевой преграды толщиной 1 мм продукты взаимодействия тела с преградой продолжали движение примерно с той же скоростью (кадры 8—10).



Фиг. 4

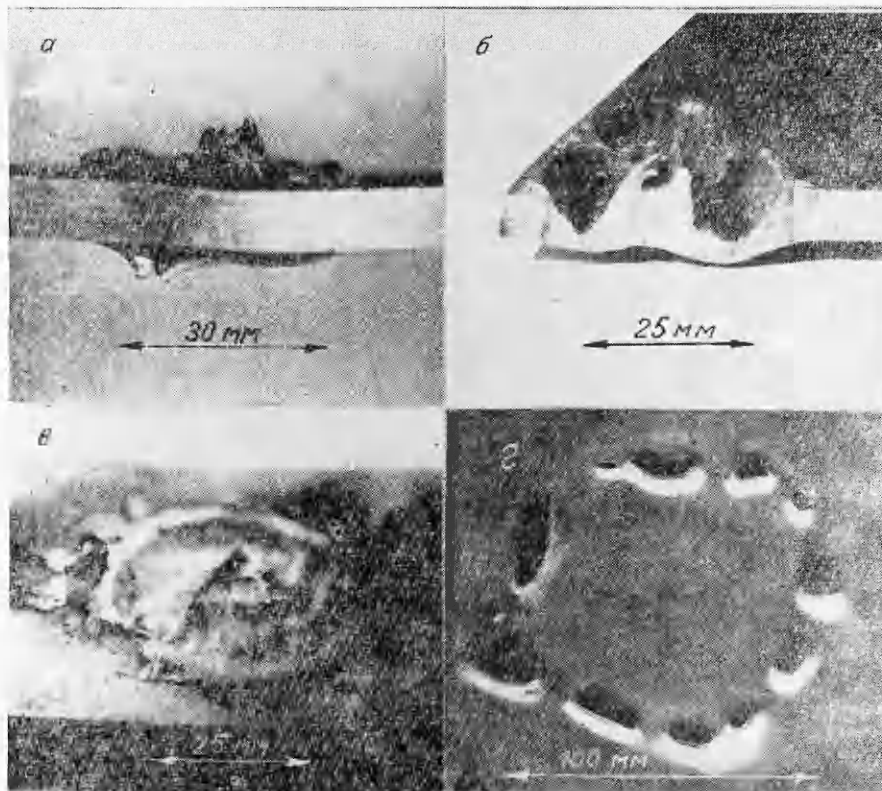
При съемке процесса ускорения в режиме фоторегистратора на пленку проектировались через узкую щель участки тела, находящиеся на линии, проходящей через центр шайбы. На фиг. 3 приведены типичные фотографии процесса ускорения. Съемка в режиме фоторегистратора позволяет видеть участок ускорения и дальнейшее практически равномерное движение тела.

Электрическая схема измерения скорости контактным методом (методом конденсаторного датчика) приведена на фиг. 4, а (1 — индуктор, 2 — метаемое тело, 3 — к осциллографу). Зная базовое расстояние S и время пролета телом этого пути, можно определить скорость как $V = S/\Delta t$. Этим методом определяется средняя скорость тела, так как в базовое расстояние входит путь ускорения. Но, поскольку базовое расстояние в экспериментах выбиралось значительно больше участка ускорения, измеренная скорость отличается от действительной в пределах погрешности измерения. Базовое расстояние измерялось перед каждым экспериментом, а время пролета телом пути S определялось из осциллограмм (фиг. 4, б).

Номер эксперимента	Материал тела	Масса тела, г	Средний диаметр, мм	Начальное напряжение, ЕНЭ, кВ	Скорость, км/с	КПД, %
1	Алюминий	0,91	30	30	3,0	7,6
2	»	0,93	30	30	3,4	10,0
3	»	0,90	30	30	3,5	10,2
4	»	0,70	25	27	3,0	7,2
5	»	0,77	25	30	3,7	9,8
6	»	1,14	35	25	2,1	6,7
7	»	1,00	35	25	2,0	5,3
8	»	1,05	35	20	1,3	3,5
9	»	0,82	30	30	3,5	9,4
10	»	1,22	35	30	3,2	11,5
11	»	1,32	40	30	3,6	15,9
12	Медь	2,34	30	30	1,9	7,8
13	»	2,65	25	30	1,8	8,0

Погрешность измерения скорости определяется точностью обработки СФР-грамм и осциллограмм и составляет 5—10%.

Результаты экспериментов. Эксперименты проводились при средних диаметрах индуктора и тела от 25 до 40 мм. Ширина тела определялась шириной медной шины, из которой изготавливался индуктор, и равнялась 4 мм. Энергия накопителя изменялась от 24 до 54 кДж. При этом были получены скорости до 3,7 км/с при КПД до 16%. Результаты некоторых экспериментов приведены в табл. 1.

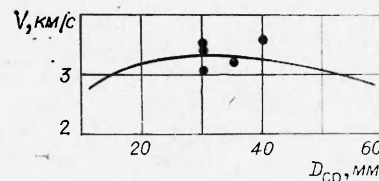


Фиг. 5

Фотографии в режиме фоторегистратора показали, что активное ускорение проводника происходит лишь на коротком отрезке пути ($0,3 D_{\text{ср}}$ — среднего диаметра), в дальнейшем скорость остается практически постоянной.

Основные факторы, влияющие на скорость, — начальное напряжение накопителя, изоляционный зазор между телом и индуктором, масса тела, несинхронность срабатывания разрядников, точность установки тела на индуктор и т. д., вследствие чего при одних и тех же параметрах в величине скорости имеется разброс.

При совпадении геометрических размеров (наружного и внутреннего диаметра) индуктора и тела в процессе ускорения тело не меняет кольцевой формы. Однако тонкие (1 мм) алюминиевые шайбы при метании со скоростью более 2 км/с претерпевают разрыв в зоне ослабления поля над щелью индуктора. Об этом можно судить по кратерам на преградах. Следует отметить, что даже при незначительном увеличении диаметра тела по сравнению с диаметром индуктора наличие радиальной составляющей силы приводит к разрыву тела на отдельные куски, которые разлетаются в радиально-осевом направлении и в зависимости от расстояния до преграды поражают большую или меньшую ее площадь (фиг. 5, *з*). При этом кратеры от соударения частей тела с преградой располагаются по окружности. Уменьшение среднего диаметра тела по сравнению с диаметром индуктора приводит к сжатию кольца и на преграде остается кратер от концентрированного удара. При этом диаметр кратера меньше, чем внешний диаметр ускоряемого тела. Типичный вид кратеров от соударения кольцевого проводника с преградой представлен на фиг. 5 (*а*, *б* — масса тела 0,77 г, скорость 3,7 км/с; *в* — масса тела 0,8 г, скорость 3,0 км/с; *г* — масса тела 1 г, внешний диаметр 37 мм, скорость 2 км/с, преграда из алюминия толщиной 1 мм).



Фиг. 6

Сравнение результатов экспериментов с расчетом процесса ускорения на ЭЦВМ по методике 10 (фиг. 6) показало их хорошее совпадение, что свидетельствует о возможности дальнейшего увеличения скорости с ростом параметров ЕНЭ и совершенствованием индукторной системы.

Поступила 4 XI 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Леконт К. Высокоскоростное метание.— В кн.: Физика быстропротекающих процессов. Т. II. М., «Мир», 1971.
2. Эйчельбергер Р., Кайнике Дж. Высокоскоростной удар.— В кн.: Физика быстропротекающих процессов. Т. II. М., «Мир», 1971.
3. Кейбл А. Ускорители для метания со сверхвысокими скоростями.— В кн.: Высокоскоростные ударные явления. Пер. с англ. яз. М., «Мир», 1973.
4. Бондалетов В. Н., Гончаренко Г. М. Ускорение проводников в импульсном магнитном поле.— ЖТФ, 1970, т. XL, вып. 10.
5. Агарков В. Ф., Бондалетов В. Н., Калихман С. А., Пичугин Ю. П. Ускорение проводников до гиперзвуковых скоростей в импульсном магнитном поле.— ПМТФ, 1974, № 3, с. 44—53.
6. Бондалетов В. Н. Индукционное ускорение проводников.— ЖТФ, 1967, т. XXXVII, вып. 2.
7. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. Под ред. Комелькова В. С. М., Атомиздат, 1970.
8. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М., «Мир», 1972.
9. Forster D. W., Martin J. C. 2,5 megagauss from a capacitor discharge.— NMF, 1965.
10. Андреев А. Н., Бондалетов В. Н. Индукционное ускорение проводников и высокоскоростной привод.— «Электричество», 1973, № 10.