

## МАГНИТНАЯ КУМУЛЯЦИЯ

*А.Д. Сахаров, Р.З. Людаев, Е.Н. Смирнов,  
Ю.И. Плющев, А.И. Павловский, В.К. Чернышев,  
Е.А. Феоктистова, Е.И. Жаринов, Ю.А. Зысин*

(ДАН СССР. 1965. Т. 165, № 1. С. 65 — 68)

Известно, что взрыв является мощным источником механической и тепловой энергии. В 1951 г. одним из авторов (А.Д. Сахаровым) была высказана идея о возможности превращения этой энергии в энергию магнитного поля и им же были предложены принципиальные конструкции источников сверхсильных магнитных полей и токов, основанные на быстрой деформации взрывом токнесущих контуров. Взрывомагнитные источники такого типа получили название генераторов МК (магнитная кумуляция). В настоящей статье дается краткое описание двух наиболее характерных взрывных генераторов: МК-1 (сжатие аксиального магнитного поля) и МК-2 (вытеснение магнитного поля из соленоида и последующее его сжатие стенками коаксиала).

Возможности взрывного сжатия аксиального магнитного поля посвящена краткая заметка Я.П. Терлецкого [2]. Как стало известно позже из обстоятельной статьи Фаулера, Гарна и Кайрда [1], приблизительно в это же время производились аналогичные эксперименты в Лос-Аламосской лаборатории (США). Публикации по описанию устройств, аналогичных генератору МК-2, отсутствуют.

I. Генератор МК-1 представляет собою металлическую трубу, окруженную зарядом взрывчатого вещества. Внутри трубы создается аксиальное магнитное поле. С помощью заряда в.в. труба подвергается быстрому симметричному сжатию. При этом ее поперечное сечение уменьшается, и в стенках трубы индуцируются токи, стремящиеся сохранить магнитный поток постоянным. Для идеально проводящих стенок трубы магнитный поток

$$\Phi = \pi R^2 H = \pi R_0^2 H_0 = \text{const},$$

а напряженность и энергия магнитного поля увеличиваются обратно пропорционально квадрату внутреннего радиуса трубы, т.е.

$$H = H_0 R_0^2 / R^2, \quad W = W_0 R_0^2 / R^2.$$

Здесь  $R_0$ ,  $W_0$ ,  $H_0$  — соответственно начальные значения внутреннего радиуса трубы, энергии и напряженности магнитного поля.

При обжатии трубы с конечной проводимостью величина магнитного потока уменьшается со временем. Изменение магнитного потока определяется безразмерным параметром  $\eta = \sqrt{4\pi\sigma R v / c^2}$ , где  $\sigma$  — проводимость,  $v = -dR/dt$ . При  $\eta \gg 1$  поток сохраняется. Заметим, что при движении стенок трубы по специальному закону  $v \sim 1/R$   $\eta = \text{const}$ , и задача имеет точное автомодельное решение. Поток изменяется по степенному закону  $\Phi \sim R^\alpha$ , где  $\alpha$  при больших  $\eta$  определяется формулой  $\alpha = 2,26/\eta$ .

Уже в первых опытах с алюминиевыми трубами небольшого диаметра ( $\sim 100$  мм) были получены магнитные поля напряженностью в  $1 \cdot 10^6$  Э. В дальнейшем в одном из опытов с трубой из нержавеющей стали при конечном диаметре цилиндрической полости  $\sim 4$  мм зарегистрировано значение  $H$ , равное  $25 \cdot 10^6$  Э. (Давление магнитного поля  $25 \cdot 10^6$  атм.) Осциллограмма напряженности магнитного поля, полученная в этом опыте, приведена на рис. 1. Участок осциллограммы поля с  $H > 25 \cdot 10^6$  Э вышел за пределы кадра.

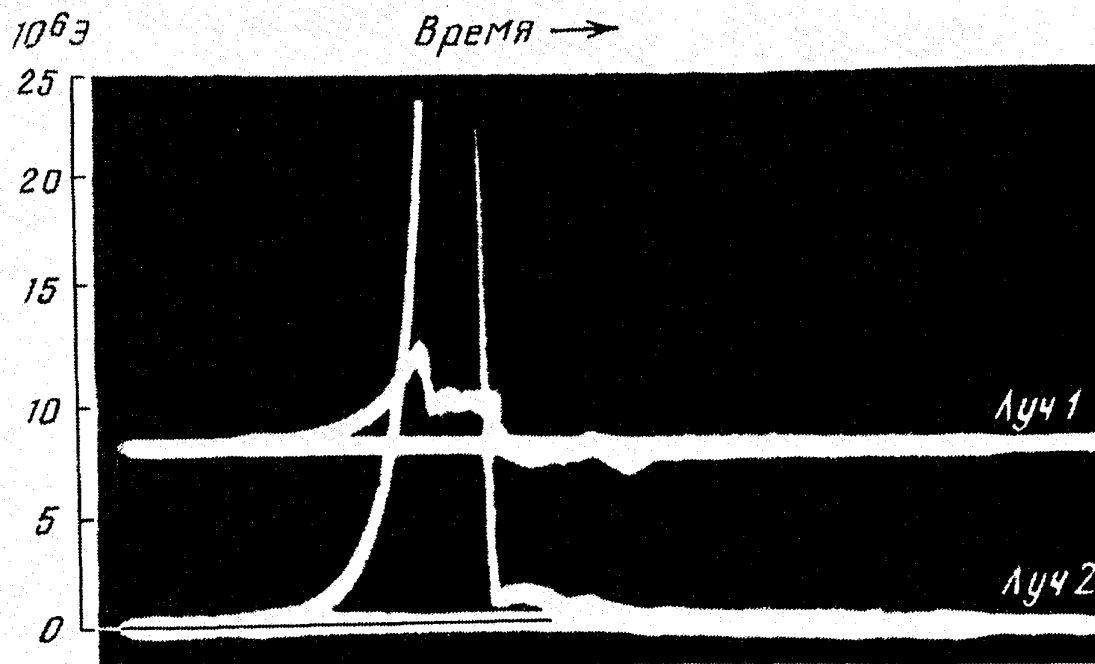


Рис. 1. Осциллограмма напряженности магнитного поля. Луч 1 — фон (сигнал с закороченных проводов), луч 2 — сигнал с измерительного витка диаметром 1,5 мм (интегрирование на ВС-цепочке)

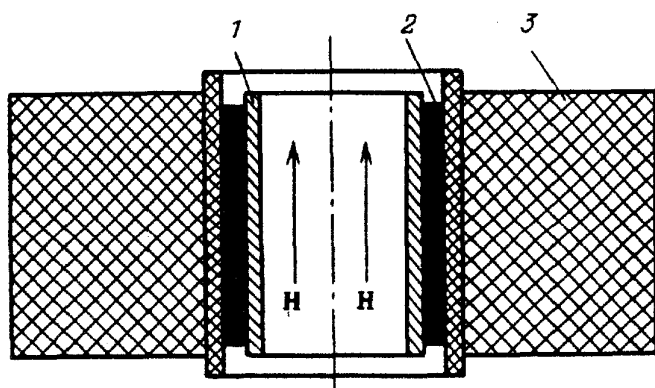


Рис. 2. Генератор МК-1. 1 — труба из нержавеющей стали, 2 — обмотка из алюминиевой фольги, 3 — заряд в.в.

поле проникало внутрь трубы (хотя она и не была разрезана вдоль образующей) благодаря достаточно низкой проводимости нержавеющей стали. Внутренняя поверхность трубы была покрыта тонким (20 мкм) слоем меди (для более полного захвата магнитного потока стенками трубы при их сжатии).

Конструкция генератора МК-1 показана на рис. 2. В этом опыте использовался заряд в.в., который обеспечивал весьма быстрое и достаточно симметричное обжатие трубы. Начальное магнитное поле создавалось с помощью катушки, намотанной алюминиевой фольгой на трубу из нержавеющей стали. Для возбуждения тока в катушке использовалась батарея конденсаторов. Начальное магнитное

В случае использования в качестве источника начального магнитного поля генераторов МК-2, которые будут описаны ниже, получены сильные магнитные поля в весьма больших объемах (в опыте с медной трубой диаметром 300 мм зарегистрировано магнитное поле  $5 \cdot 10^6 \text{ Э}$  в объеме  $100 \text{ см}^3$ ).

Достигнутые значения напряженности магнитного поля, по-видимому, нельзя считать предельными. Обеспечивая хорошую симметрию схождения стенок трубы к центру и увеличивая их скорость, можно в принципе получить сколь угодно большие значения  $H$  при условии, конечно, что не произойдет потери проводимости стенок трубы при нагревании их чрезвычайно сильными индукционными токами.

II. Генератор МК-2 состоит из центральной проводящей трубы и коаксиально расположенной внешней цилиндрической спирали (соленоида), переходящей в сплошной цилиндр (стакан), основание которого соединено с трубой (рис. 3). Во внутреннюю трубу помещается

длинный цилиндрический заряд в.в., инициируемый в одной точке с торца со стороны спирали. (Заряд в.в. может быть расположен снаружи спирали и стакана).

На электрический контур генератора МК-2, образованный трубой, стаканом и спиралью, разряжается батарея конденсаторов. Под действием продуктов взрыва центральная труба растягивается в виде конуса, и в момент времени, когда величина разрядного тока переходит через максимум, ее стенки подлетают к началу спирали. При дальнейшем распространении детонации вдоль трубы наблюдается картина, аналогичная вдвиганию металлического конуса со скоростью детонации внутрь спирали: точка соприкосновения конуса со спиралью движется по винтовой линии, число витков спирали, оставшихся незамкнутыми, уменьшается и соответственно уменьшается индуктивность генератора. После подлета стенок трубы к началу стакана генератор превращается в коаксиал, длина которого, а следовательно, и индуктивность уменьшаются по мере распространения детонации вдоль трубы. Уменьшение индуктивности сопровождается увеличением тока  $I$  и магнитной энергии  $W$ . При достаточно быстрой непрерывной деформации контура, магнитный поток сохраняется, т.е.  $\Phi = LI \approx L_0 I_0$  и

$$I = \frac{\Phi}{L} \approx \frac{L_0}{L} I_0, \quad W = \frac{\Phi^2}{2L} \approx \frac{L_0}{L} W_0,$$

где  $L_0$ ,  $I_0$ ,  $W_0$  — начальные значения индуктивности, тока и магнитной энергии. Увеличение магнитной энергии происходит за счет работы, совершаемой против пондеромоторных сил магнитного поля стенками центральной трубы.

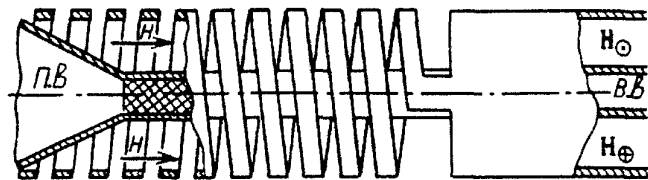


Рис. 3. Генератор МК-2

С помощью генератора МК-2 получены токи в  $5 \cdot 10^7$ , а при конечной индуктивности 0,01 мкГн. В некоторых опытах ток усиливался в тысячи раз и достигал  $1 \cdot 10^8$  а и более. С помощью генераторов МК-2 получены магнитные поля в  $1 - 1,5 \cdot 10^6$  Э в весьма большом объеме, равном нескольким литрам. В магнитном поле удавалось запасти энергию в  $1 - 2 \cdot 10^7$  Дж. Эта энергия составляла 10 — 20% от энергии, освобождаемой при взрыве в.в., расположенного в трубе внутри стакана (при деформации стакана (коаксиала) магнитный поток сохраняется).

**III.** Потребитель электромагнитной энергии может быть подключен к генератору МК-2 как непосредственно (в этом случае индуктивность потребителя является конечной индуктивностью генератора МК-2 и должна быть малой), так и с помощью трансформатора (потребитель связан с контуром генератора МК индукционным взаимодействием).

Эксперименты показали, что с помощью трансформатора к потребителю может быть отведена значительная часть магнитной энергии, полученной при взрывной деформации контура. (Например, от генератора МК небольшого диаметра удавалось отвести 50% магнитной энергии.) Это позволяет сосредоточивать с помощью взрыва значительную энергию в потребителе со сравнительно большой индуктивностью, удалять сам потребитель (и тем самым защищать его от взаимодействия взрыва) на некоторое расстояние от генератора МК, а также открывает возможность создания многоступенчатой системы МК. В такой системе магнитная энергия, полученная в первом генераторе, источником начальной энергии для которого служит постоянный магнит, с помощью трансформатора передается во второй, в процессе работы которого эта энергия усиливается и передается в третий, и т.д.

Осуществлен и иной способ передачи электромагнитной энергии из генератора во внешнюю нагрузку — путем разрыва электрического контура с током действием дополнительного заряда в.в. и переброски магнитного потока из конечной части МК-2 в нагрузку (использование экстрактов размыкания). Таким способом оказалось возможным передавать во внешнюю нагрузку (индуктивную и активную) более 50% энергии, генерируемой системой МК-2. В ряде опытов время передачи энергии в нагрузку составляло  $0,5 \cdot 10^{-6}$  с.

**IV.** Областью применения генераторов МК является решение таких проблем физики и техники, как, например, создание сравнительно малогабаритных ускорителей заряженных частиц однократного действия на высокие энергии (100 — 1000 БэВ), получение и изучение плотной высокотемпературной плазмы, ускорение плотных образований до скоростей в сотни и тысячи километров в секунду, что необходимо для решения некоторых задач астрофизики (достижения в лабораторных условиях звездных температур и давлений), физики ударных волн, исследования уравнений состояний и свойств веществ при сверхвысоких температурах и давлениях, изучения действия на обшивку космических кораблей метеоритов и т.д.

В настоящее время разработан генератор МК для безжелезных бетатронов типа [3] и проведены первые эксперименты по дистанционному питанию

электромагнита таких ускорителей. Проведены также эксперименты с электродинамическими ускорителями коаксиального типа. Для алюминиевой фольги с начальной массой  $\sim 2$  г зарегистрирована скорость (паров алюминия) в 100 км/с.

Весьма интересным представляется проведение некоторых физических исследований в сверхсильных магнитных полях, достигаемых с помощью генераторов МК, например, изучение влияния сильных магнитных полей на электросопротивление металлов и полупроводников, магнитно-оптических эффектов и др.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fowler C.M., Garn W.B., Caird R.S.*// J Appl. Phys. 1960. V. 31. P. 588.
2. *Терлецкий Я.П.*//ЖЭТФ. 1957. Т. 32. С. 387.
3. *Павловский А.И., Кулешов Г.Д., Склищов Г.В., Зысин Ю.А., Герасимов А.И.*// ДАН СССР. 1965. Т. 160, № 1. С. 68.

Статья поступила 23.08.65 г.

538.12

### ВЗРЫВОМАГНИТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

*А.Д. Сахаров*

*(УФН. 1966. Т. 88, вып. 4. С. 725 — 734)*

В последние годы опубликован ряд экспериментальных и теоретических работ, посвященных использованию взрывов для получения сверхсильных магнитных полей (работы [1 — 91]). Этой же теме была посвящена состоявшаяся недавно международная конференция (Рим, сентябрь 1965 г.). В США и в СССР в отдельных опытах удалось получить поля в 15 — 25 млн гаусс. Несколько меньшие поля (2 — 5 млн гаусс) достигаются сравнительно просто. Открываются перспективы исследований электрических, оптических и упругих свойств различных веществ в таких магнитных полях, которые раньше были практически недостижимы. Кроме того, возможно использование взрывомагнитных генераторов для питания импульсных ускорителей заряженных частиц и для некоторых других целей (исследований по физике плазмы, метания тел и т.п.).

В этой статье мы опишем физические и конструктивные принципы взрывомагнитных генераторов, их характеристики и коснемся вопросов их применения.

Мы используем термин «магнитнокумулятивные генераторы» (или, сокращенно, МК-генераторы), принятый в отечественной практике и отражающий основное в рассматриваемых системах явление сжатия (кумуляции) магнитного потока.