

электромагнита таких ускорителей. Проведены также эксперименты с электродинамическими ускорителями коаксиального типа. Для алюминиевой фольги с начальной массой ~ 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., Склицков 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.

1. Принцип МК. Весной 1952 г. Р.З. Людаев, Е.А. Феоктистова, Г.А. Цырков, А.А. Чвилева осуществили первый в СССР взрывной опыт по получению сверхсильных магнитных полей. Схема опыта изображена на рис. 1

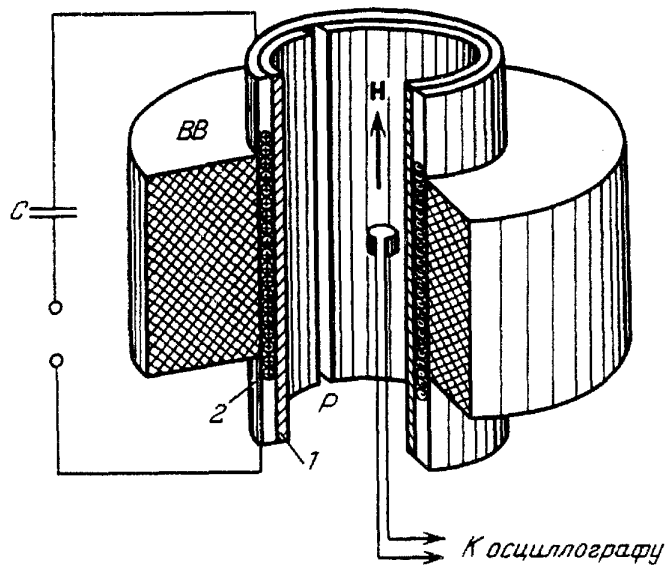


Рис. 1. Схема генератора МК-1

(генераторы этого типа получили название МК-1). Внутри полого металлического цилиндра 1 при разряде конденсаторной батареи С через соленоидальную обмотку 2 создается продольное магнитное поле (для обеспечения быстрого проникновения поля внутрь цилиндра в нем был сделан узкий косой разрез Р, впоследствии захлопывающийся). Снаружи цилиндра помещен заряд ВВ. В этом заряде возбуждается сходящаяся цилиндрическая ударная волна (для ее возбуждения применяется либо электрическая система многоточечного инициирования, либо специальные детонационные «линзы»).

Момент инициирования выбирается так, чтобы сжатие цилиндра началось в момент максимального тока в соленоидальной обмотке.

При движении цилиндра под действием детонационной волны со скоростью свыше 1 км/с весь процесс сжатия происходит настолько быстро, что можно в первом приближении пренебречь омическими потерями в цилиндре и считать его идеальным проводником (уточнения см. ниже). Электрическое поле в идеальном проводнике равно нулю, т.е. магнитный поток $\Phi = \pi R^2 H$, заключенный в сжимающейся цилиндрической полости, не меняется в процессе сжатия. Величина магнитного поля возрастает в этом идеальном случае пропорционально $1/R^2$, и в этой же пропорции возрастает энергия магнитного поля, равная $W = (H^2/8\pi) \cdot \pi R^2 \cdot l$, где l — длина цилиндра:

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

$$H = \frac{H_0 R_0^2}{R^2}, \quad W = \frac{W_0 R_0^2}{R^2}, \quad (1)$$

$$H \rightarrow \infty \text{ и } W \rightarrow \infty \text{ при } R \rightarrow 0.$$

Конечно, в реальном случае имеет место уменьшение магнитного потока и бесконечные значения H и W не могут быть достигнуты. В опытах такого типа, как в 1952 г., обычно имеет место снижение потока в 2 — 3 раза. Кроме того, при некотором значении R происходит остановка движения цилиндра из-за противодействия магнитного поля. Тем не менее уже в первых опытах

было достигнуто поле в 1 млн гаусс (при начальном поле 30 кГс). Измерение полей проводилось индукционным датчиком. Более детальное обсуждение систем типа МК-1 мы проведем позднее, сейчас же рассмотрим работу магнитокумулятивных генераторов с электротехнической точки зрения.

Мы можем сказать, что в основе генераторов МК лежит в сущности тот же принцип, что и в основе любых других устройств с превращением механической энергии в электрическую. Рассмотрим контур с индуктивностью L , которая может меняться при воздействии внешних сил. Для начала пренебрежем сопротивлением контура. Имеем (\sim знак пропорциональности)

$$\Phi = LI = \text{const}, \quad I \sim \frac{1}{L}, \quad (2)$$

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L} \approx \frac{L_0 W_0}{L},$$

т.е. энергия магнитного поля W возрастает при уменьшении индуктивности. При наличии сопротивления деформируемого контура $R(t)$ вместо (2) получим

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\int (R/L) dt}, \quad W = \frac{W_0 L_0}{L} e^{-2\int (R/L) dt}. \quad (3)$$

В СССР и в других странах наряду с системами МК-1 был предложен ряд разнообразных систем, в которых происходит увеличение энергии и напряженности магнитного поля при сжатии контуров с током продуктами взрыва. Типичным вариантом является генератор МК-2, к описанию которого мы и переходим.

2. МК-2. На рис. 2 и 3 приведены фотография и схема одного из типов МК-генераторов (МК-2), который представляет особый интерес для получения сильных токов — до 10^8 а, очень больших энергий магнитного поля (с превращением в энергию магнитного поля до 20% энергии ВВ при относительно высоких значениях напряженности

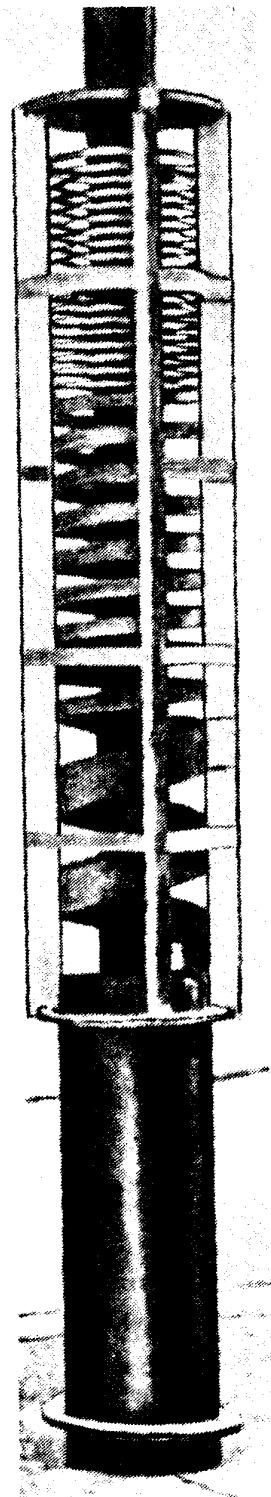


Рис. 2. Фотография генератора МК-2

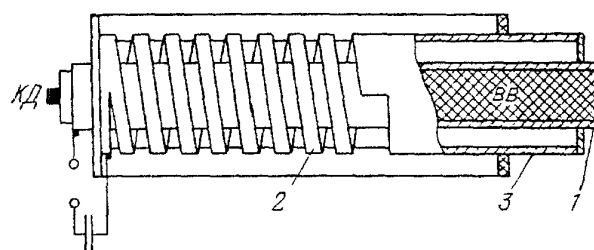


Рис. 3. Схема генератора МК-2

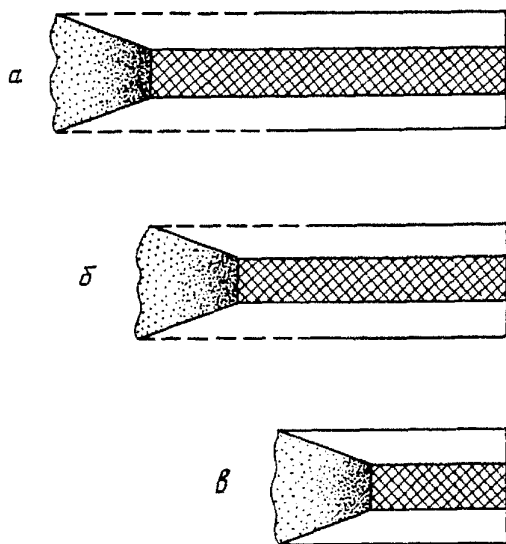


Рис. 4. Стадии работы генератора МК-2

воя его энергию. На последней стадии работы МК-генератора (рис. 4, в) спираль вовсе выключается и сжатие магнитного поля, совпадающего в этом случае с полем прямого тока, осуществляется в уменьшающемся объеме между внешней и внутренней стенками коаксиала.

Практическое осуществление систем МК-2 с высокими характеристиками потребовало длительных исследований большого коллектива, которые в основном были закончены к 1956 г. (первая конструкция генератора МК-2 создана в 1952 г., в 1953 г. получены токи в 100 млн ампер). В ходе этих исследований были решены следующие задачи:

1) Обеспечение отсутствия трещин в расширяющейся трубе и высокой симметрии ее разлета, выбор материала (в системах не самых больших размеров это медь), выбор размеров и допусков, обеспечение однородности ВВ и др. Контроль на этой стадии осуществлялся при помощи импульсной рентгено съемки и другими методами.

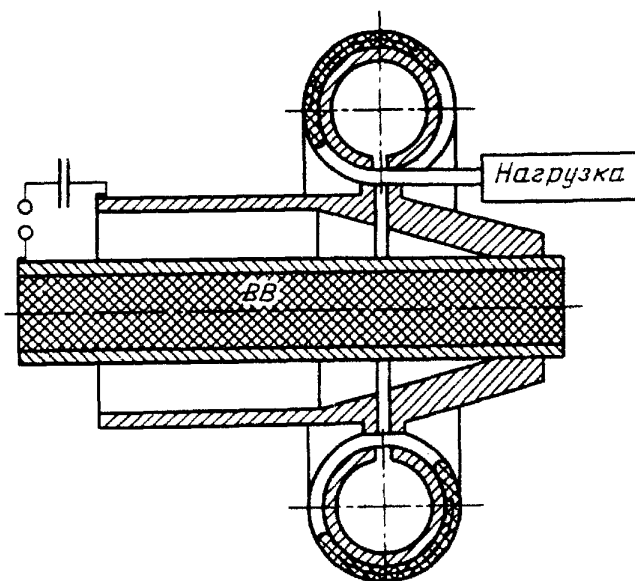


Рис. 5. Трансформаторная система МК

поля до $2 \cdot 10^6$ Э). Принцип действия МК-2 сводится к следующему (рис. 4, а — в). При подрыве капсулы КД детонационная волна распространяется по взрывчатому веществу, расположенному внутри металлической трубы 1. Труба растягивается, образуя в каждый данный момент конус (рис. 4,а), замыкающий спираль 2, а затем сплошную оболочку 3 таким образом, что по мере распространения детонационной волны вправо индуктивность контура, образуемого спиралью 2, трубой 1 и коаксиальным участком 3, непрерывно уменьшается; при этом расширяющаяся труба сжимает магнитное поле, увеличивая его энергию.

2) Обеспечение минимальных потерь магнитного потока в спиральном участке — применение спирали с переменным шагом и с плавным переходом к коаксиальному участку, применение скошенных под углом разлета трубы кромок витков спирали и т.д.

3) Расчет и экспериментальная отработка коаксиального участка (условное название "стакан"), в котором происходит основное нарастание энергии магнитного поля.

4) Разработка систем трансформаторного вывода электроэнергии из коаксиального участка (рис. 5). Это дает возможность применять генератор МК-2 на нагрузки с существенно большими индуктивностями.

5) Разработка систем создания начального магнитного потока с помощью постоянных магнитов.

6) Разработка каскадных систем, соединенных при помощи трансформаторных выводов.

Разработанные в СССР генераторы МК-2 имеют самые разнообразные размеры и мощности. При весе генератора 150 кгс (вес ВВ в "стакане" 15 кг) в энергию магнитного поля переходит более 10^7 Дж. Конденсаторная батарея с такой же энергией разряда представляет собой очень громоздкое и дорогостоящее сооружение.

3. Теория МК-1 и получение сверхсильных полей. Наипростейшей с теоретической точки зрения является система МК-1. Вместе с тем именно в этой системе удалось достичь наивысших магнитных полей (до 25 млн Э). Рассмотрим на примере МК-1 некоторые принципиальные особенности действия МК-генераторов, в первую очередь учтем конечную проводимость цилиндра, обжимающего магнитный поток. Фактически проводимость металла зависит от его плотности и температуры, которые меняются в процессе сжатия. Если эту зависимость, равно и как уравнение состояния материала цилиндра, считать известными, то совместное решение системы уравнений в частных производных, описывающих одномерное радиальное движение сжатия и протекание индукционных кольцевых токов в движущемся веществе, можно решить численными методами (численное решение уравнений в частных производных означает сведение их к разностным и практически может быть выполнено только на быстродействующих вычислительных машинах). Аналитическое решение в общем случае, конечно, не может быть найдено. Однако качественно роль конечной проводимости материала цилиндра может быть выяснена с помощью известного из электротехники приближенного метода скин-слоя. В этом методе точное распределение токов в цилиндре аппроксимируется "экспоненциальным профилем" (4). Плотность тока

$$j(r) = j_0(t)e^{-(x/\delta(t))}. \quad (4)$$

Здесь $\delta(t)$ — глубина скин-слоя, $x = r - R(t)$, где $R(t)$ — радиус цилиндрической полости, эту функцию при решении электродинамической задачи считаем известной. Зависимость (4) имеет место точно, если H на границе нарастает по экспоненциальному закону: $H \sim e^{\lambda t}$, $\lambda = \text{const}$. В этом случае δ постоянно и равно

$$\delta = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-9} \sigma \lambda}; \quad (5)$$

σ — проводимость в $\text{Ом}^{-1} \text{см}^{-1}$, δ — в см, λ — в с^{-1} . В методе скин-слоя формулы (4), (5) используются при произвольном законе нарастания $H(t)$, причем величина λ в (5) принимается равной

$$\frac{1}{H} \frac{dH}{dt}.$$

Считая изменение потока поправкой, имеем

$$\lambda = -2 \frac{1}{R} \frac{dR}{dt}.$$

Кроме того, очевидно, $H = 0,4\pi j_0 \delta$, а электрическое поле E в системе, движущейся с металлом, равно

$$E = \frac{10^{-8}}{2\pi R} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{j_0}{\sigma}.$$

Собирая все эти формулы вместе, находим

$$\frac{1}{\Phi} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\alpha}{R} \frac{dR}{dt}, \quad (6)$$

где "коэффициент потерь" α равен (с обозначением $v = |dR/dt|$)

$$\alpha = \frac{10^4}{(0,2\pi)^{1/2} \sigma^{1/2} R^{1/2} v^{1/2}}. \quad (7)$$

Оценка для меди ($\sigma = 6 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$) при $v = 10^5 \text{ см/с}$, $R = 1 \text{ см}$ приводит к значению $\alpha = 0,05$, т.е. к хорошему сохранению потока. Эта простая оценка показывает законность сделанного нами выше предположения о приближенном сохранении магнитного потока в системах МК. Заметим, между прочим, что в частном случае $\sigma = \text{const}$ и $v \sim 1/R$ найдено аналитическое (автомодельное) решение уравнения в частных производных, соответствующее постоянному коэффициенту α , причем $\Phi \sim R^\alpha \sim t^{\alpha/2}$ (М.П. Шумаев и автор, 1952 г.).

В реальных условиях проводимость сильно падает из-за нагрева металла джоулевым теплом (все металлы имеют отрицательный температурный коэффициент проводимости). Особенно существенную роль играет "поверхностный взрыв" слоя металла, в котором выделилось тепло, превышающее энергию сублимации. В расширившемся металле исчезает металлическая проводимость. Если в результате этих процессов возникает зона пониженной проводимости, сравнимая по величине с радиусом полости и имеющая такую проводимость, что толщина скин-слоя в ней тоже сравнима с радиусом, то возникают существенные потери магнитного потока. Однако если давление магнитного поля $H^2/8\pi$ и сравнимая с ним величина плотности выделенного джоулева тепла меньше ρv^2 , где ρ — плотность оболочки, скорость теплового расширения испаренного слоя меньше $v = |dR/dt|$. При этом роль процессов поверхностного взрыва не будет катастрофической даже при неблагоприятной проводимости плазменного слоя. Критерий

$$\rho v^2 > \frac{H^2}{8\pi} \quad (8)$$

возникает также при рассмотрении вопросов остановки оболочки магнитным противодействием с учетом сжимаемости оболочки. При достаточно больших

скоростях движения оболочек возможно достижение сколь угодно высоких значений магнитного поля. В опытах советских исследователей скорость цилиндрических оболочек составляла 10 — 20 км/с.

Практически важным вопросом является обеспечение очень хорошей цилиндрической симметрии обжатия металлического цилиндра, т.е. высокого качества цилиндрического заряда, детонационных линз и высокой одновременно инициирования электродетонаторов. Небольшие остаточные нарушения симметрии возрастают при сжатии из-за динамической неустойчивости фокусировки цилиндрических оболочек. Поэтому практически возможно иметь изменение радиуса не более чем в 10 раз. Достижение рекордных полей требует поэтому очень высоких начальных полей. В советских опытах для создания начальных полей использовалась система МК-2 (рис. 6). На рис. 7 воспроизведена осциллограмма, полученная от прокалиброванного индукционного датчика в опыте, при котором было зарегистрировано поле в 25 млн гаусс.

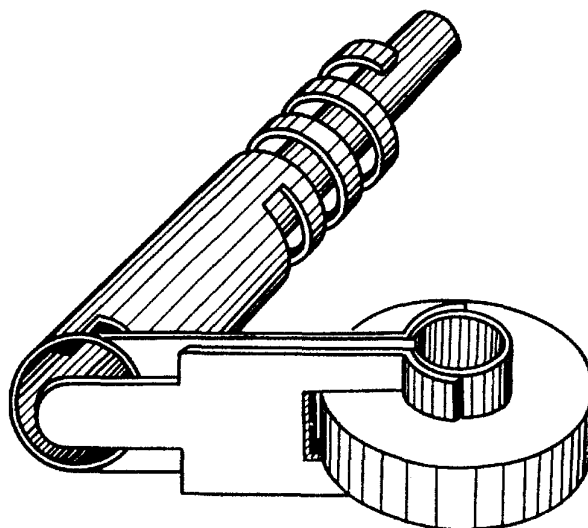


Рис. 6. Использование генератора МК-2 для питания катушки генератора МК-1

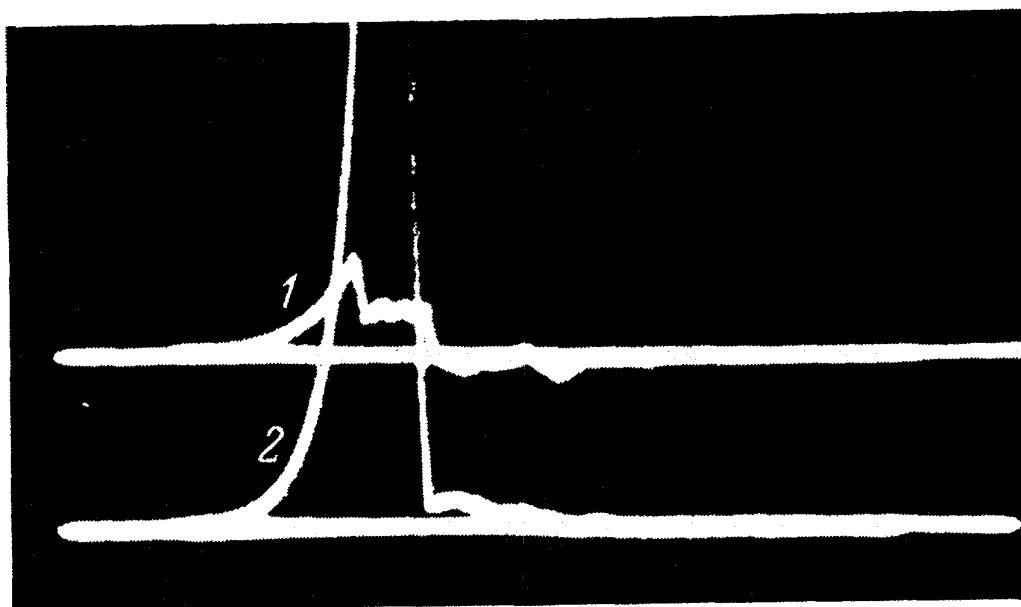


Рис. 7. Осциллограмма напряженности магнитного поля

4. Применения МК. Измерения свойств веществ в сверхсильных магнитных полях, полученных с помощью МК, затрудняются кратковременностью процесса, наличием в ряде случаев воздушной ударной волны и кумулятивных струй и частиц, механическими, тепловыми и электрическими помехами, вызванными самим переменным магнитным полем. Необходима специальная

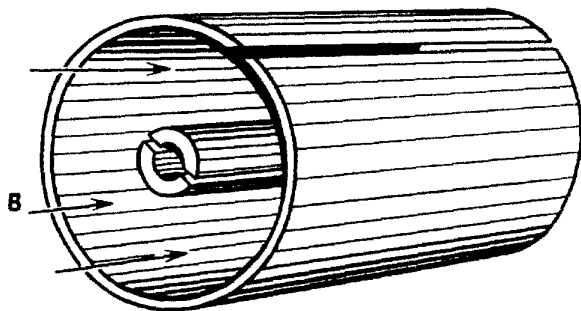


Рис. 8. Концентратор магнитного поля

защита измерительных устройств, применение импульсной техники измерения. В ряде случаев целесообразно выводить сверхсильный ток из зоны помех (на рис. 8 воспроизведено из статьи [3] одно из устройств такого типа). Поэтому в настоящее время реально полученных результатов еще не так много. На рис. 9 приведена одна из схем опы-

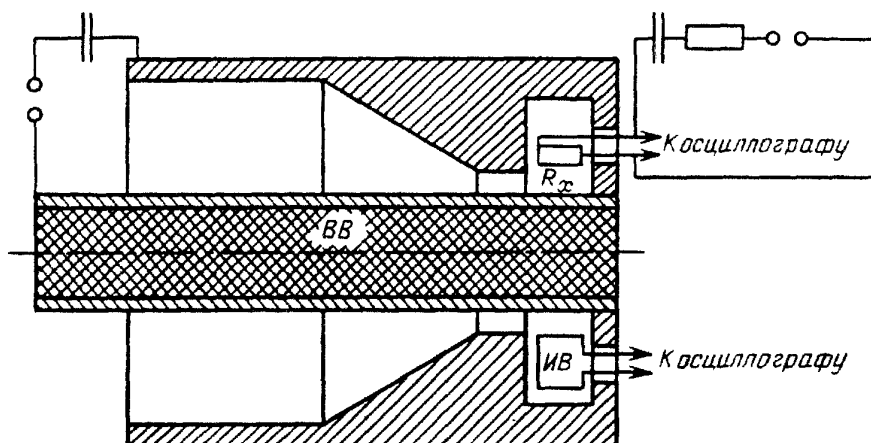


Рис. 9. Схема опыта по измерению сопротивления графита. R_x — образец, ИВ — виток для измерения H ; $RC \gg$ времени нарастания H

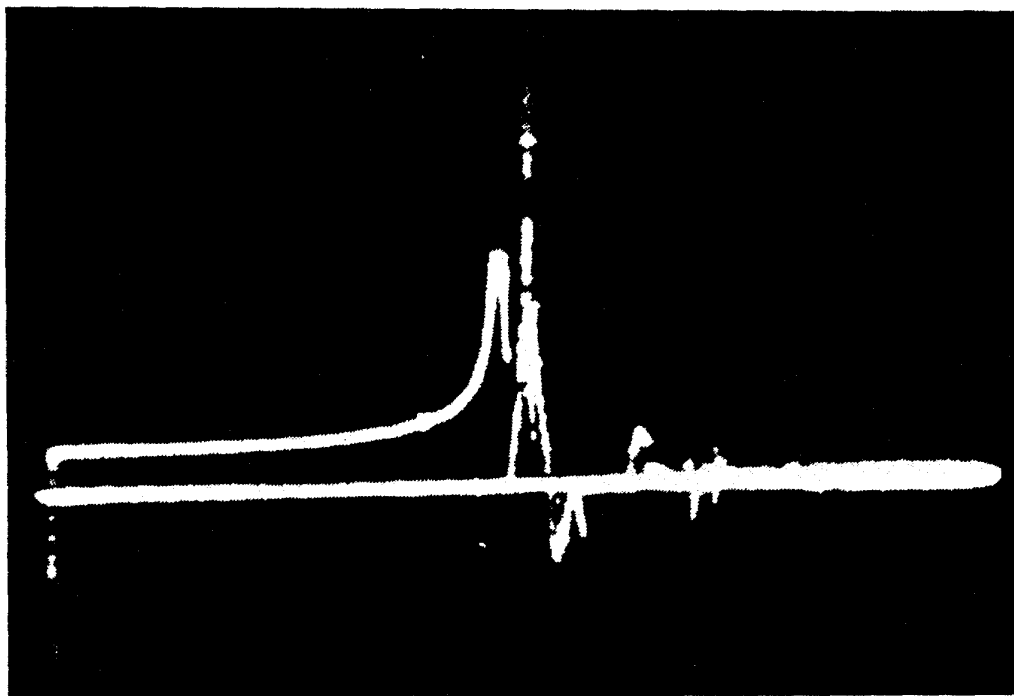


Рис. 10. Осциллограмма напряжения на графитовом образце

та по измерению сопротивления графита в магнитных полях до $1,5 \cdot 10^6$ Э, получаемых в коаксиальной системе МК, а на рис. 10 — характерная осциллограмма напряжения на образце (возрастание напряжения обусловлено увеличением сопротивления образца с возрастанием напряженности магнитного

поля). Выполнены опыты по наблюдению эффекта вращения плоскости поляризации света в магнитном поле (эффект Фарадея) [2, 3]. Наблюдаемое в опытах многократное изменение интенсивности света свидетельствует о повороте плоскости поляризации на многие тысячи градусов. Американские и итальянские исследователи подтвердили линейный характер эффекта Фарадея в стекле в мегагауссных магнитных полях. Американскими исследователями получены фотографии спектров эффекта Зеемана в полях до 2 млн гаусс. Зарегистрировано явление смещения центра зеемановского мультиплета, представляющее собой следствие сжатия атомов давлением магнитного поля (внутри атома магнитное поле несколько меньше из-за атомного диамагнетизма).

Советские и американские исследователи уделяли много внимания использованию системы МК для метания металлических тел с космическими скоростями. Это представляет интерес как для моделирования микрометеоров, так и для опытов по физическим процессам при сверхвысоких давлениях, получающихся при ударах таких тел о преграду. На рис. 11 приведена схема установки для метания

кольца из алюминия (вес ~ 2 г), которое ускоряется в кольцевом зазоре давлением магнитного поля до скоростей, превышающих 100 км/с (при этом, правда, кольцо превращалось в пар).

Наиболее фундаментальным научным применением МК-генераторов, по нашему

мнению, может явиться питание сверхмощных ускорителей элементарных частиц и измерительно-регистрационной аппаратуры. Предположим, что ускоритель построен по принципу безжелезного циклического индукционного ускорителя (хотя это, быть может, и не оптимальный вариант). Импульс ускоренного протона $p \sim HR$. Энергия магнитного поля

$$W \sim R^3 H^2 \sim \frac{p^3}{H}.$$

Коэффициент пропорциональности может быть определен на примере уже осуществленных безжелезных импульсных бетатронов (см., например: А.И. Павловский и др. [10]⁽¹⁾ ●). Находим (энергия магнитного поля выражена в тоннах тротилового эквивалента, $1 \text{ т} = 4 \cdot 10^9 \text{ Дж}$)

$$W(\text{т}) = \left(\frac{10^7 (\text{Гс})}{H} \right) \left(\frac{p}{10^{10} (\text{эВ/с})} \right)^3. \quad (9)$$

Мы видим, что для достижения энергии $1000 \text{ ГэВ} = 10^{12} \text{ эВ}$, являющейся меч-

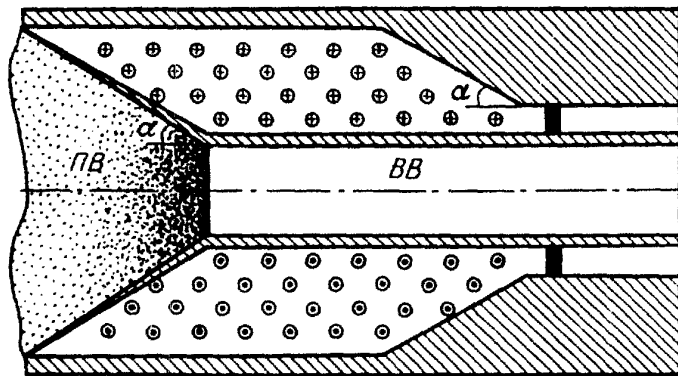


Рис. 11. Схема устройства для метания кольца

той современной физики высоких энергий, и при $H = 10^7$ Гс в центре бетатрона, что наверно не является пределом, необходимая магнитная энергия составит около 1 млн т тротилового эквивалента. Очевидно, полная энергия должна быть в несколько раз больше, т.е. речь идет о подземном взрыве термоядерного заряда "средней" мощности. Такой взрыв может быть произведен без выброса радиоактивных продуктов на глубине несколько более 1 км. Основным расходом явится создание на этой глубине камеры объемом более 10000 м^3 и монтаж в этой камере нескольких тысяч тонн металлоконструкций. Однако можно рассчитывать на получение 10^{18} протонов за время порядка 10^{-5} с (коэффициент использования энергии взрыва около $10^{-3}\%$). При таких интенсивностях возможно получение большой научной информации за 1 опыт. При этом повторение опыта 50 — 100 раз будет сравнимо по стоимости с созданием постоянно действующего ускорителя на 1000 ГэВ (несколько миллиардов рублей). Конечно, потребуется разработка специальной регистрирующей аппаратуры, например, системы фотоумножителей, регистрирующих магнитнотормозное излучение продуктов столкновений ускоренных протонов с мишенью, возникающее в специальных "измерительных" магнитных полях в большом объеме. Радиус отклонения в магнитном поле даст возможность определить при этом импульс вторичных частиц, а спектр и интенсивность магнитнотормозного излучения позволят определить их массу.

Следует указать и на еще одну, почти фантастическую возможность. Использование больших импульсных магнитных линз (с энергией магнитного поля в сотни км) дает возможность сфокусировать пучок с интенсивностью $10^{18}/10^{-5} = 10^{23}$ протонов/с на площади порядка 1 мм^2 . При этом возможна надежная регистрация процессов во встречных пучках от двух ускорителей с сечением порядка 10^{-30} см^2 . Проведение таких опытов потребует, конечно, автоматических (работающих на обратной связи) систем компенсации объемного заряда и корректировки магнитного поля. Вне зависимости от только что описанных сверхграндиозных проектов представляется, что генераторы МК могут оказаться полезными во многих областях научного исследования.

ПРИМЕЧАНИЕ

¹ При энергии $5 \cdot 10^5$ Дж и максимальном поле $1,2 \cdot 10^5$ Э достигнута энергия электронов 100 МэВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fowler C.M., Garn W.B., Caird R.S.// J. Appl. Phys. 1960. V. 31. P. 588.
2. Caird R.S., Garn W.B., Thomson D.B., Fowler C.M.// Ibidem. 1964. V. 35. P. 781.
3. Herlach F., Knoepfel H.//Rev. Sci. Instr. 1965. V. 36. P. 1088.
4. Сахаров А.Д., Людаев Р.З., Смирнов Е.Н., Плющев Ю.Н., Павловский А.И., Чернышев В.К., Феоктистова Е.А., Жаринов Е.И., Зысин Ю.А.// ДАН СССР. 1965. Т. 176. С. 65.
5. Терлецкий Я.Л.//ЖЭТФ. 1957. Т. 32. С. 387.
6. Биченков Е.И.// ПМПФ. 1964. Т. 6. С. 3.
7. Lewin J.D., Smith P.F.//Rev. Sci. Instr. 1964. V. 35. P. 541.
8. Lehner G., Linhart J.G., Somon J.P.// Nucl. Fusion. 1964. No 4. P. 362.
9. Bitter F.// Sci. Am. 1965. V. 213, No 1. P. 65; перевод//УФН. 1966. Т. 88. С. 735.