



Магнитная кумуляция

(использованы материалы статьи член-корреспондента АН СССР А. И. Павловского)

РОЖДЕНИЕ ИДЕИ

В 1950 г. И.Е. Тамм и А.Д. Сахаров высказали идею о магнитной термоизоляции высокотемпературной плазмы, положившую начало исследованиям по управляемому термоядерному синтезу. Идея магнитной кумуляции была выдвинута Сахаровым как один из возможных путей осуществления импульсной управляемой термоядерной реакции. «В 1952 г. по моей инициативе начаты экспериментальные работы по созданию взрывомагнитных генераторов (устройств, в которых энергия взрыва химической или ядерной реакции переходит в энергию магнитного поля)» (А.Д. Сахаров. Автобиография).

Сахаров предложил два типа таких устройств. В первом из них аксиальный магнитный поток сжимается проводящей цилиндрической оболочкой, сходящейся к центру под действием взрыва. Такие устройства получили название магнитокумулятивных генераторов сверхсильных магнитных полей – МК-1. «Представьте себе полый металлический цилиндр, помещенный в катушку с током. Цилиндр как бы охватывает пучок магнитных силовых линий созданного катушкой «начального» поля. Снаружи цилиндра располагается заряд взрывчатого вещества. В некоторый момент времени его подрывают по всей внешней поверхности. Полый цилиндр сжимается давлением продуктов взрыва и в свою очередь, как гигантский «кулак» сжимает пучок магнитных силовых линий, увеличивая напряженность и энергию магнитного поля». Преобразование кинетической энергии цилиндра в энергию магнитного поля происходит при торможении оболочки магнитным давлением. В результате магнитной кумуляции энергия взрывчатого вещества (химического или ядерного), первоначально распределенная по значительному объему, сосредоточивается в небольшой области пространства в виде энергии магнитного поля. Магнитная кумуляция энергии такого мощного источника, как взрыв, позволила получать самые сильные магнитные поля в земных масштабах.

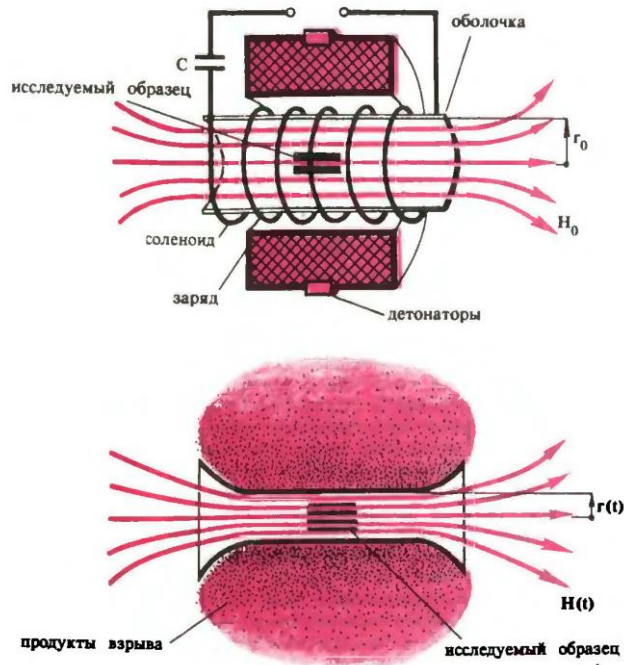


Рис. 1. Принципиальная схема генератора сверхсильных магнитных полей МК-1. При разряде конденсаторной батареи С на соленоид за счет диффузии поля сквозь оболочку радиусом r_0 внутри нее возникает магнитный поток Φ . Подрыв заряда взрывчатого вещества синхронизуан так, что под действием продуктов взрыва оболочка приходит в движение, когда начальное магнитное поле H_0 достигает максимума. Оболочка при сжатии к центру сжимает магнитный поток, и поскольку он сохраняется приблизительно постоянным, напряженность $H(t)$ и энергия $W(t)$ магнитного поля увеличиваются: $H(t) = H_0 r_0^2 / r^2(t)$; $W(t) = W_0 r_0^2 / r^2(t)$.

ПРИНЦИП МАГНИТНОЙ КУМУЛЯЦИИ

Магнитная кумуляция основана на законе электромагнитной индукции и принципиально не отличается от обычного способа получения электрической энергии с помощью динамомашин. При изменении площади токового контура в нем индуцируется ток, поддерживающий магнитный поток внутри контура постоянным. Рассмотрим идеальную магнитную кумуляцию – сжатие аксиального магнитного потока цилиндрической оболочкой из сверхпроводящего несжимаемого вещества, плотность которого остается постоянной. В этом случае магнитный поток $\Phi = \int_s \vec{H} d\vec{S}$ сохраняется при любой скорости сжатия. С уменьшением поперечного сечения оболочки S напряженность H, давление $P \sim H^2$ и энергия магнитного поля $W \sim SH^2$ возрастают как $H(t) \sim S^{-1}(t)$, $P(t) \sim S^{-2}(t)$ и $W(t) \sim S^{-1}(t)$. При сжатии оболочки к центру растет и скорость ее внутренней границы $u(t) \sim r^{-1}(t)$, т.е. кинетическая энергия оболочки W_K концентрируется на ее внутренней границе. Напряженность, энергия и давление магнитного поля достигают максимальных значений в момент, когда давление магнитного поля останавливает оболочку и ее кинетическая энергия полностью преобразуется в энергию магнитного поля.

В случае токового контура из реального проводника, сопротивление которого не равно нулю, а плотность при сжатии может увеличиваться, сохранение магнитного потока зависит от скорости деформации контура. Магнитный поток теряется вследствие

диффузии поля в стенки проводника. При полях выше $4 \cdot 10^5$ Э начинается интенсивный нагрев проводника и рост его сопротивления, а при $H > 3 \cdot 10^6$ Э происходит испарение поверхностного слоя на границе «вещество – поле»

зона потери проводимости быстро распространяется в глубину материала.

Сжимая магнитный поток, проводник и сам подвергается сжатию. При возрастании магнитного давления на границе «вещество – поле» возникает волна сжатия, переходящая затем в ударную волну, которая увеличивает плотность вещества оболочки и его внутреннюю энергию (упругую, тепловую, ионизации, электромагнитного излучения).

Магнитную кумуляцию может серьезно ограничить неустойчивость схождения цилиндрической оболочки (нарушение симметрии) из-за неограниченного роста малых начальных возмущений. Поэтому очень важно обеспечить хорошую начальную цилиндрическую симметрию сжатия, т.е. высокое качество формирования детонационной волны, точное изготовление и сборку заряда и оболочки.

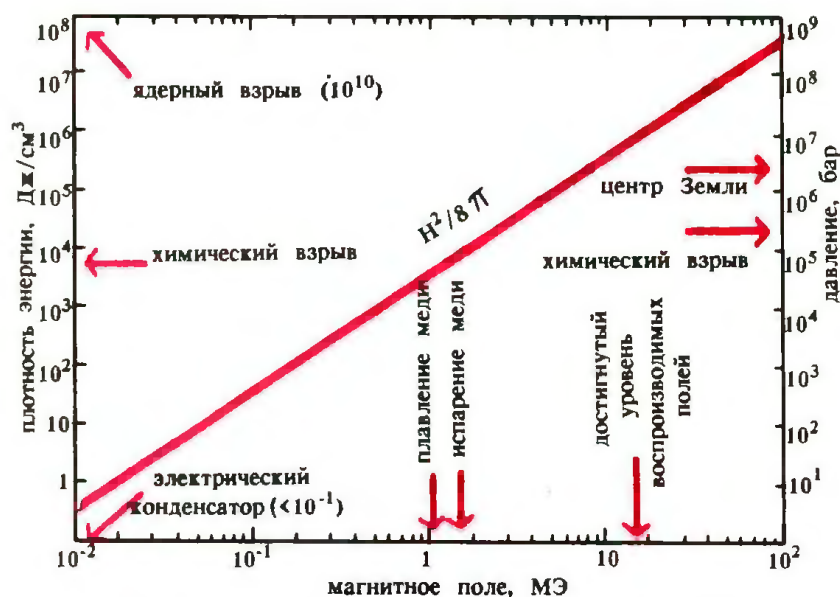


Рис. 2. Эффекты, вызываемые сильными магнитными полями. При $H > 8 \cdot 10^5$ Э начинается плавление поверхностного слоя проводника; при $H > 1,5 \cdot 10^6$ Э – испарение вещества, плотность энергии достигает плотности химической энергии взрыва. Напряженность $H = 1,6 \cdot 10^7$ Э соответствует достигнутому уровню воспроизводимых магнитных полей, при этом плотность энергии (10^6 Дж/см³) превышает энергию связи большинства твердых тел, а давление поля более чем вдвое превосходит давление в центре Земли.

Итоги начального периода работ подвела первая международная конференция, состоявшаяся в 1965 г. во Фраскати (Италия). Отмечалось, что хотя американским и советским исследователям в единичных опытах удалось получить рекордные поля, результаты большинства работ указывали, что уровень воспроизводимых полей не превышает $5 \cdot 10^5$ Э. Стало ясно, что задача стабильного получения сверхсильных

магнитных полей намного труднее, чем представлялось вначале, а уровни воспроизводимых полей ниже ожидавшихся.

Стабилизация сжатия магнитного потока при высоких плотностях энергии сделала целесообразным продолжение работ по магнитной кумуляции энергии. Устройства, в которых магнитный поток сжимается системой коаксиальных оболочек, получили название каскадных генераторов сверхсильных магнитных полей.

Многолетний цикл работ по изучению магнитной кумуляции и созданию магнитокумулятивных генераторов выполнен коллективом исследователей в институте, научным руководителем которого являлся академик Ю.Б. Харитон.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ СО СВЕРХСИЛЬНЫМИ ПОЛЯМИ

Стабильное получение магнитных полей десятимегаэрстедного диапазона открыло перед физиками широкие возможности. Выполнены экспериментальные исследования оптических и магнитооптических свойств многих веществ в магнитных полях до $1,1 \cdot 10^7$ Э, в том числе при низких температурах. Анализируя данные экспериментов, в которых измерялись показатель поглощения и эффект Фарадея, можно делать выводы о влиянии внешнего поля на энергетический спектр, зонную структуру и другие квантовые характеристики твердого тела. В сильных магнитных полях отмечено смещение частот парамагнитного и циклотронного резонансов в оптический диапазон.

В полях около $3 \cdot 10^6$ Э при $T=4$ К проводились эксперименты с объемными и пленочными сверхпроводящими керамиками типа Y–Ba–Cu–O по прямому измерению H_{K2} – магнитного поля, при котором сверхпроводимость полностью исчезает.

А.Д. Сахаров указывал и множество других возможных применений магнитной кумуляции. «Изучение электрических, магнитных, оптических, упругих свойств различных веществ в таких полях, которые раньше были недоступны исследователям, представляет большой научный интерес. Эти исследования могут оказаться важными для физики полупроводников, металлов, полимеров». Ему представлялось перспективным применение компактных мощных импульсных источников энергии для связи в радио- и оптическом диапазоне на дальних расстояниях, исследований по физике плазмы, моделирования астрофизических явлений, достижения сверхвысоких давлений. Одним из фундаментальных научных применений Сахаров считал использование магнитокумулятивных генераторов в качестве источника энергии для сверхмощных ускорителей заряженных частиц.