

ПОЛУЧЕНИЕ СИЛЬНЫХ ТОРОИДАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ СЖАТИЕМ
МАГНИТНОГО ПОТОКА

С. Г. Алиханов, В. Г. Белан

(Новосибирск)

Описываются эксперименты по получению мегагаусных тороидальных магнитных полей сжатием потока. Экспериментально показана возможность усиления поля более чем в 20 раз. Результаты, полученные в экспериментах, сравниваются с расчетами.

Ранее было экспериментально показано, что при сжатии продольного магнитного поля лайнером, ускоряемым также магнитным давлением, можно получить устойчивое движение и хорошую симметрию схлопывания [1-3]. Эти условия являются необходимыми для эффективного усиления поля.

Однако с точки зрения возможности удержания и нагрева плазмы магнитным полем необходима конфигурация с замкнутыми силовыми линиями. С этой целью была рассмотрена возможность усиления тороидального поля сжатием магнитного потока.

Принцип работы такой системы нетрудно понять из схемы, приведенной на фиг. 1. Металлическое кольцо *b* движется со скоростью *v* между двумя коаксиальными цилиндрами таким образом, чтобы в процессе движения между кольцом и цилиндром в месте скольжения осуществлялся надежный электрический контакт. При этом магнитное поле H_{φ} будет находиться в замкнутом сжимающемся объеме. Если предположить, что в процессе сжатия выполняется условие $LI = \text{const}$ (для сжимающегося контура), то напряженность магнитного поля будет возрастать в процессе сжатия

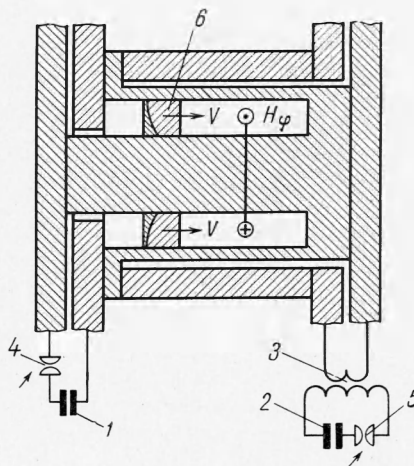
$$H = L_0 H_0 / L$$

Отсюда видно, что в случае движения кольца между цилиндрами для получения достаточно большого коэффициента сжатия при конечной длине порядка нескольких миллиметров необходимо, чтобы длина участка сжатия l_0 была $\sim 5-10$ см.

Ускорение кольца производилось азимутальным магнитным полем. Благодаря большому времени диффузии по сравнению с временем сжатия проникновением ускоряющего магнитного поля в объем сжатия можно пренебречь. Ввиду того что ускоряющее и тормозящее магнитное давление зависит от радиуса

$$P_H \sim r^{-2}$$

то для получения однородности движения необходимо обеспечить такое же распределение массы кольца.



Фиг. 1

Однако в пристеночной области из-за наличия трения условие одинаковости ускорения практически соблюсти невозможно. Поэтому возможно возникновение неуравновешенных сил, приводящих к опрокидыванию кольца. Такое явление действительно наблюдалось в экспериментах при малой толщине кольца (~ 1.5 мм) и большом пути движения. Поэтому для стабилизации движения толщина кольца была выбрана достаточно большой. При этом движение стабилизируется благодаря механическим усилиям, возникающим в материале кольца.

В экспериментах применялись биметаллические (медь и алюминий, сваренные методом диффузионной сварки) кольца. Типичные размеры кольца: наружный диаметр 77 мм, внутренний диаметр 63 мм, толщина 7 мм, масса 40 г.

Ускоряющее магнитное поле создается разрядом конденсаторной батареи 1 емкостью $42 \cdot 10^{-3}$ ф при напряжении 5—5.5 кВ через систему разрядников 4. Конструкция батареи и системы коммутации аналогичны описанным в работе [2]. Начальная индуктивность разрядного контура $L_0 = 1.4 \cdot 10^{-8}$ гн, активное сопротивление $R = 2 \cdot 10^{-4}$ ом.

Экспериментально было выяснено, что движение между цилиндрическими поверхностями не обеспечивало хорошего электрического контакта с кольцом, поэтому в дальнейших экспериментах цилиндры были заменены конусами с углом наклона образующей к оси $\sim 1^\circ$. В экспериментах применялись конуса длиной 5 см, в некоторых опытах использовались конуса длиной 10 см, но из-за вдвое больших потерь энергии на трение максимальная величина полученных полей в этом случае несколько ниже. Для уменьшения коэффициента трения поверхности конусов покрывались тонким слоем олова ($\delta \sim 10^{-2}$ мм). Начальное магнитное поле создавалось током разряда дополнительной конденсаторной батареи 2 емкостью $5 \cdot 10^{-3}$ ф. В замкнутый объем сжатия поле проникало благодаря значительно меньшему времени диффузии ($\tau \sim 300$ мсек) по сравнению с периодом разряда. Согласование низкоомной нагрузки с разрядной цепью осуществлялось с помощью трансформатора тока 3.

Конструктивно трансформатор выполнялся в виде катушки (длина 35 см, диаметр 26 см, индуктивность $5 \cdot 10^{-4}$ гн), навитой из 50 витков медной шины сечением 4×10 мм². Для увеличения механической прочности обмотка запекалась в эпоксидной смоле. Поверх катушки накладывалась вторичная обмотка, свернутая из листа меди толщиной 8 мм. Индуктивность рассеивания трансформатора составляла 10^{-4} гн и вместе с индуктивностью подводов обеспечивала период разряда батареи $T = 5$ мсек.

При напряжении на питающей конденсаторной батарее 10 кВ трансформатор обеспечивал ток до $1.2 \cdot 10^6$ а на активную нагрузку $R \sim 5 \cdot 10^{-5}$ ом. Начальное магнитное поле, измеряемое в объеме сжатия в разных экспериментах, варьировалось от 20—50 кГс.

Измерение поля в процессе сжатия производилось индукционными зондами. Зонд выполнялся из двух витков провода ПЭВ-1 0.15 мм, намотанного на каркас диаметром 1.0—1.5 мм. Четыре зонда, расположенные через 90° , укреплялись в конце объема сжатия так, чтобы разрушение зондов наступало тогда, когда движущееся кольцо проходило весь путь. Такое расположение зондов позволяло судить о равномерности движения всего кольца в процессе сжатия поля. Выводы от зондов пропускались через отверстия в наружном конусе. Один из зондов использовался также для измерения начального поля непосредственно перед началом процесса сжатия.

Результаты экспериментов сравниваются с численными расчетами, проведенными на ЭВМ «Минск-22». Расчеты проводились для случая движения кольца между цилиндрическими поверхностями. Рассматривалась

система, состоящая из емкости C , индуктивности $L = L_0 + L(x)$ и активного сопротивления R . В момент времени $t = 0$ емкость заряжена до напряжения U_0 , $L = L_0$. Уравнения, описывающие электрические процессы в контуре, после простых преобразований запишутся в виде

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U_0 - q/C - RI - 2 \cdot 10^{-7} Ix \ln(r_2/r_1)}{L_0 + 2 \cdot 10^{-7} x \ln(r_2/r_1)}, \quad \frac{dq}{dt} = I \quad (1)$$

Здесь I — ток в контуре; x — путь, пройденный кольцом; r_1, r_2 — радиусы внутреннего и наружного цилиндров; q — заряд.

К этим уравнениям добавим уравнения движения кольца под действием магнитного давления

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{m} \left[I^2 - \frac{I_0^2 l_0^2}{(l_0 - x)^2} \right] - \frac{F}{m} \quad (2)$$

Здесь I_0 — начальный ток, l_0 — длина камеры сжатия, m — масса кольца, F — сила трения.

Сила трения оценивалась по формуле

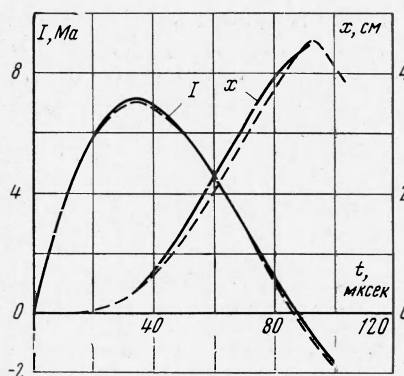
$$F = k\sigma_b S$$

Здесь k — коэффициент трения, σ_b — предел прочности, S — площадь поверхности трения; все величины полагались постоянными во времени. В расчете коэффициент трения $k = 0.2$, $\sigma_b = 15 \text{ кг/мм}^2$ (для алюминия).

На фиг. 2 приводятся графики зависимости ускоряющего тока I и пути x , пройденного кольцом. Зависимость пути от времени получена после обработки сигналов магнитных зондов в предположении $\Phi = \text{const}$. Там же для сравнения нанесены расчетные кривые (пунктир). Примерно одинаковый ход расчетной и экспериментальной кривых до $t = 80 \text{ мсек}$ ($H = 250 \text{ кгс}$) позволяет предположить, что до таких полей условие

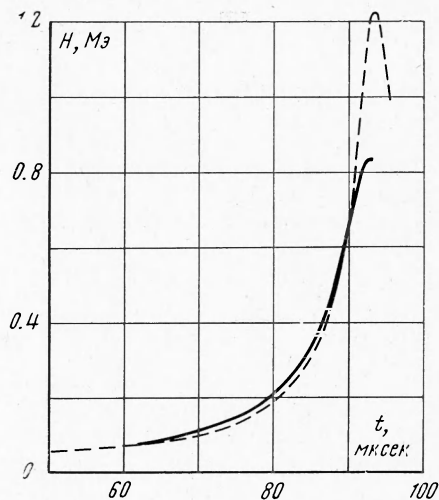
$\Phi = \text{const}$ в данном эксперименте довольно хорошо выполняется. Некоторое несоответствие кривых на этой стадии видимо объясняется неточностью определения параметров, влияющих на скорость движения, а также ошибкой измерения величины магнитного поля, которая составляет $\sim 5\%$. Сравнительно сильное различие в ходе кривых на последней стадии движения можно объяснить увеличением потерь, вследствие сильного нагревания током, контактных поверхностей и стенок камеры сжатия.

Сопоставление сигналов с четырех зондов показывает, что кольцо сохраняет плоскую форму во все моменты движения с точностью $\sim 1 \text{ мм}$. В некоторых экспериментах при больших начальных полях происходила остановка кольца магнитными силами. При этом благодаря не очень высокой величине поля ($H \approx 250 \text{ кгс}$) и наличию значительного трения обратного движения не наблюдалось. Поэтому, по-видимому, кольцо сохранило ту форму, которую оно имело в момент остановки. Об остановке кольца свидетельствует наличие максимума поля и частично сохранившиеся от



Фиг. 2

разрушения магнитные зонды. При рассмотрении кольца видно, что та часть, которая двигалась против отверстия для выводов от зондов, несколько выступает вперед, так как из-за неоднородности поля в этом месте тормозящая сила меньше, чем на остальных участках.



Фиг. 3

На фиг. 3 приведена экспериментальная зависимость напряженности магнитного поля от времени, здесь же для сравнения нанесена расчетная кривая. Максимальная величина поля, зарегистрированная в эксперименте, $H = 840$ кгс. В объеме ~ 4 см³ скорость движения кольца достигает величины $\sim 10^5$ см/сек.

В результате проведенных исследований показана возможность получения сильного магнитного поля в такой системе. В экспериментах удалось получить усиление поля более чем в 20 раз.

Показано также, что можно получить устойчивое движение с хорошей однородностью.

В заключение авторы благодарят Г. И. Будкера, за поддержку и постоянный интерес к работе, П. З. Чеботаева за помощь в проведении расчетов на ЭВМ, В. Н. Карасюка за конструирование установки, а также А. В. Кутовенко и П. Г. Зубова за участие в проведении экспериментов.

Поступила 8 VII 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Спаге Е. С. Magnetic flux compression by magnetically imploded metallic foils. J. Appl. Phys., 1966, vol. 37, No. 10.
2. Алиханов С. Г., Белан В. Г., Будкер Г. И., Иванченко А. И., Кичигин Г. Н. Получение мегагаусных полей методом магнитогидродинамической кумуляции. Атомная энергия, 1967, т. 23, вып. 6.
3. Alikhanov S. G., Belan V. G., Ivanchenko A. I., Karasjuk V. N., Kichigin G. N. The production of pulsed megagauss fields by compression of the metallic cylinder in Z-pinch configuration. J. Sci. Instrum., 1968, vol. 41, Ser. 2, p. 543.