

8/IV-74

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



СЗ45Л1  
ЖС-122

P9 - 7679

1407/2-74

В.М.Жабицкий, И.Н.Иванов, В.М.Лачинов,  
В.К.Маковеев

РАСШИРЕНИЕ  
ВОЗМОЖНОСТЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ  
АДГЕЗАТОРА ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО  
УСКОРЕНИЯ ИОНОВ

**1974**

**ОТДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ**

P9 - 7679

В.М.Жабицкий, И.Н.Иванов, В.М.Лачинов,  
В.К.Маковеев

РАСШИРЕНИЕ  
ВОЗМОЖНОСТЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ  
АДГЕЗАТОРА ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО  
УСКОРЕНИЯ ИОНОВ

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

В ускорителях, основанных на коллективном принципе, вывод электронно-ионного кольца из адгезатора осуществляется в спадающем аксиально-симметричном магнитном поле<sup>1/</sup>. При этом энергия вращательного движения электронов переходит в поступательное движение, и кольцо приобретает ускорение, пропорциональное величине градиента среднего магнитного поля  $\bar{B}_z$ . Для предотвращения отрыва ионов от электронного кольца необходимо, чтобы приобретаемое ускорение не превышало предельно допустимого, которое при заданных параметрах кольца пропорционально  $Z/A \sqrt{Z}$  - зарядиона с атомным весом  $A \sqrt{Z}$ . В то же время для эффективности ускорения градиент среднего магнитного поля должен быть близок к предельному. Например, при ускорении  $\alpha$ -частиц электронным кольцом градиент среднего магнитного поля выдерживался  $\sim 10$  Э/см при величине аксиальной составляющей индукции магнитного поля  $B_z \approx 8$  кЭ<sup>3/</sup>. Формирование таких градиентов связано с техническими трудностями. Кроме того, при ускорении различных ионов возникает необходимость изменения градиента среднего магнитного поля, что связано с переделками магнитной системы адгезатора.

Поскольку в аксиально-симметричном магнитном поле

$$\frac{\partial \bar{B}_z}{\partial z} = - \frac{2}{r} B_r, \text{ где } B_r - \text{радиальная составляющая век-}$$

тора индукции магнитного поля, то изменение градиентов среднего магнитного поля на заданном радиусе осуществляется изменением  $B_r$ . Кроме того, в адгезаторе магнитное поле меняется во времени. Поэтому можно уменьшить величину  $B_r$  без заметного изменения  $B_z$  введе-

нием в адгезатор металлической трубы, ось которой совпадает с магнитной осью адгезатора, а радиус - меньше радиуса кольца. На поверхности проводящей металлической трубы нормальная компонента вектора индукции переменного магнитного поля отсутствует, так что если радиус кольца незначительно отличается от радиуса трубы, то происходит заметное изменение  $B_r$ . Изменяя соотношение между радиусом трубы и радиусом кольца /что легко сделать, изменяя, например,  $B_z$  /, можно изменять величину  $B_r$  на радиусе кольца. Незначительное увеличение  $B_z$  вследствие уменьшения индуктивности катушек, создающих переменное магнитное поле, легко компенсируется уменьшением тока.

Для проверки эффективности изменения  $B_r$  с помощью металлической трубы была собрана следующая установка.

Внешнее переменное магнитное поле с определенным градиентом создавалось соленоидом, намотанным на усеченном конусе высотой  $h$ , и малым радиусом  $a$  с углом при вершине  $2\alpha$ . При плотной намотке соленоида проводом малого сечения векторный потенциал магнитного поля имеет только азимутальную компоненту  $A_\theta^c$  и равен сумме соответствующих компонент от каждого витка с током

$$A_\theta^c = \frac{4J}{c} \sum_{m=1}^N \frac{1}{k_m} \sqrt{\frac{r_m}{r}} \left[ \left(1 - \frac{k_m^2}{2}\right) K - E \right], \quad /1/$$

где  $N$  - число витков соленоида,  $K$  и  $E$  - полные эллиптические интегралы первого и второго рода аргумента

$$k_m^2 = \frac{4r r_m}{(r+r_m)^2 + (z-z_m)^2}, \quad /2/$$

$$r_m = a + z_m \operatorname{tg} \alpha, \quad z_m = \frac{m-1}{N-1} h.$$

Поместим внутрь соленоида металлическую трубу радиусом  $b$  с толщиной стенок, много большей "глубины

проникновения" внешнего переменного магнитного поля, создаваемого соленоидом. Если в качестве трубы используется металл с большой проводимостью, то можно пренебречь эффектами, связанными с конечной проводимостью стенок трубы, и считать, что на ее поверхности выполняются граничные условия для идеального проводника. В этом случае поле изображения линейного кругового тока радиуса  $r_m$ , помещенного в плоскости  $z_m$ , есть:

$$A_{\theta m}^H = - \frac{4J}{c} \left(\frac{r_m}{a}\right) \int_0^\infty \cos\left(\frac{z-z_m}{a}u\right) \frac{K_1\left(\frac{r_m}{a}u\right)}{K_1\left(\frac{b}{a}u\right)} I_1\left(\frac{b}{a}u\right) K_1\left(\frac{r}{a}u\right) du, \quad /3/$$

где  $I_n$  и  $K_n$  - модифицированные функции Бесселя первого и третьего рода. Полное поле изображения получается суммированием полей, определяемых формулой /3/, от всех  $N$  витков соленоида. Для компонент индукции суммарного поля имеем:

$$B_r = \frac{J}{c} \sum_{m=1}^N \left[ \frac{2(z-z_m)}{r\sqrt{(r+r_m)^2 + (z-z_m)^2}} \left(-K + \frac{r^2 + r_m^2 + (z-z_m)^2}{(r-r_m)^2 + (z-z_m)^2} E\right) - \frac{4r r_m}{a^2} \int_0^\infty \sin\left(\frac{z-z_m}{a}u\right) \frac{K_1\left(\frac{r_m}{a}u\right)}{K_1\left(\frac{b}{a}u\right)} I_1\left(\frac{b}{a}u\right) K_1\left(\frac{r}{a}u\right) du \right]; \quad /4/$$

$$B_z = \frac{J}{c} \sum_{m=1}^N \left[ \frac{2}{\sqrt{(r+r_m)^2 + (z-z_m)^2}} \left(K + \frac{r_m^2 - r^2 - (z-z_m)^2}{(r-r_m)^2 + (z-z_m)^2} E\right) + \frac{4r_m}{a^2} \int_0^\infty \cos\left(\frac{z-z_m}{a}u\right) \frac{K_1\left(\frac{r_m}{a}u\right)}{K_1\left(\frac{b}{a}u\right)} I_1\left(\frac{b}{a}u\right) K_0\left(\frac{r}{a}u\right) u du \right]; \quad r > b.$$

Выполненные расчеты для соленоида с параметрами  $a = 18$  см,  $h = 60$  см,  $N = 60$  витков,  $\operatorname{tg} \alpha = 0,1$ ; показывают, что в максимуме  $B_z$  на заданном радиусе  $B_r = 0$ , причем

величина  $V_r(z)$  с трубой связана с  $V_r^c(z)$  без трубы вблизи максимума  $V_z$  следующим соотношением

$$V_r(z) \approx \left(1 - \left(\frac{b}{r}\right)^2\right) V_r^c(z). \quad /5/$$

При соотношении  $b/r \approx 0,9$  величина радиальной составляющей вектора индукции магнитного поля изменяется, приблизительно, в пять раз с введением металлической трубы.

Измерение импульсного магнитного поля проводилось с помощью холловского импульсного магнитометра МИХ-1, разработанного в ОНМУ ОИЯИ /4/. Блок-схема магнитометра представлена на рис. 1.

Магнитометр включает две основные части. Входная измерительная часть состоит из блоков усилителей, блока модулятора, стабилизатора тока питания датчика Холла /ДХ/ и источников питания для этих блоков. Эта часть МИХ-1 соединяется кабелем с измерительной штангой прямоугольного сечения, в конце которой расположен датчик Холла, плоскость которого устанавливается перпендикулярно оси штанги или вдоль нее.

Регистрационно-управляющая часть прибора соединена с входной измерительной частью 50-метровым кабелем и при необходимости выносится в другое место. В эту часть МИХ-1 входит блок формирования и хронирования импульсов, блок временной задержки, блок аналого-цифрового преобразователя /АЦП/, блок питания.

В качестве магниточувствительного элемента использовался ДХ типа Х-511, имеющий размеры чувствительной области  $1 \times 1 \times 0,2$  мм, ТКН  $\approx 0,03\%$ / $^{\circ}$ С, номинальный ток питания  $\approx 100$  мА и чувствительность  $\approx 10$  мкВ/Гс.

Для снижения импульсных наводок и повышения точности измерений применен метод импульсного питания датчика Холла стабильным током, величина которого приблизительно в 10 раз превышает номинальный.

Измерения производятся при подаче внешнего синхронимпульса или нажатии кнопки разового пуска на блоке управления. Момент измерения относительно синхронимпульса задается с помощью блока задержки; собственно измерение происходит за время менее чем 1 мксек.

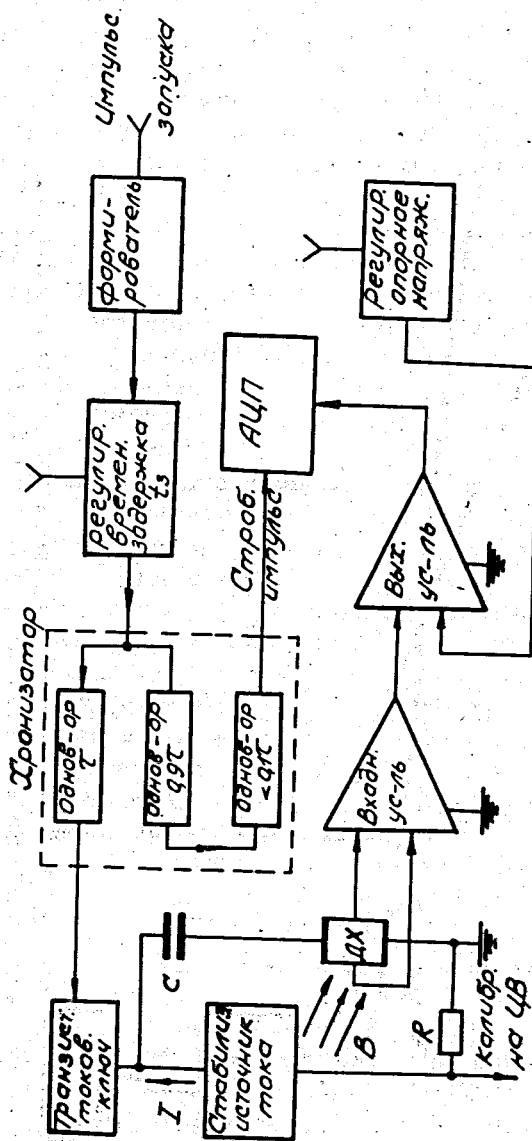


Рис. 1. Блок-схема измерительного канала МИХ-1.

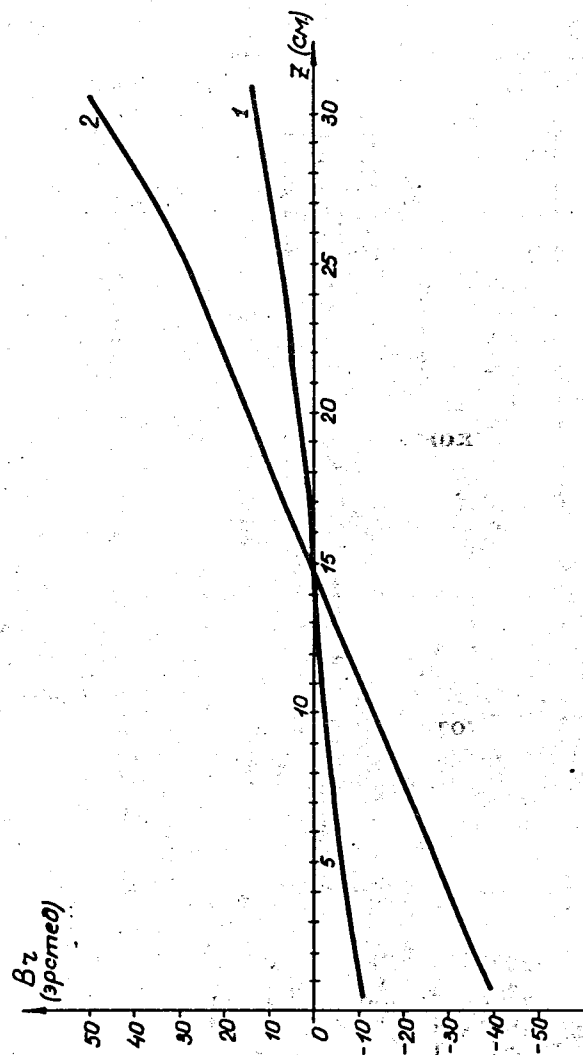


Рис. 2. Распределение радиальной составляющей вектора индукции при наличии / кривая 1 / и отсутствии / кривая 2 / проводящей трубы.

Регистрация измеряемого магнитного поля производится по аналого-цифровому преобразователю типа LRS, модель 243, имеющего 256 каналов и индикацию в двоичном коде. Точность измерения в основном определяется числом каналов АЦП и введением соответствующих пьедесталов при разных уровнях измеряемых магнитных полей. Величина общей относительной погрешности измерения магнитных полей при комнатной температуре  $22 \pm 3^\circ \text{C}$  после часового прогрева не превышает  $\pm 0,1\%$ ,  $\pm 0,5 \text{ Гс}$ ,  $\pm 1$  канал.

Измерения магнитных полей проводились при соотношении  $b/r = 0,9$ . Снимались зависимость  $B_z(z)$  на выбранном радиусе и находился максимум  $B_z$ . В этой точке по минимуму показаний устанавливался датчик для измерения  $B_r$ , а затем снималась зависимость  $B_r(z)$ . Экспериментальные кривые для  $B_r(z)$  приведены на рис. 2. Измеренное значение  $B_r(z)$  несколько отличается от расчетного вследствие малых уровней  $B_r$  / приблизительно несколько десятков Э/ на уровне большого значения  $B_z$  / приблизительно 1200 Э/ и связанных с этим трудностей установки датчика для измерений  $B_r$ . Поэтому измеренное значение  $B_r$  есть сумма теоретического  $B_r$  и малой добавки  $aB_z$  ( $a \ll 1$ ), связанной с неточностью установления датчика. Поскольку вблизи максимума  $B_z$  величина  $\Delta B_z / \Delta z$  не превышала  $0,02 \text{ Э/см}$ , то  $(\Delta B_r / \Delta z)_{\text{измерен.}} \approx (\Delta B_r / \Delta z)_{\text{теор.}}$ . Характер изменения  $B_r(z)$  близок к линейному; поэтому по углу наклона находился градиент  $B_r$ , который составлял  $2,6 \text{ Э/см}$  для поля без трубы и  $0,5 \text{ Э/см}$  для поля с трубой, что соответствует ожидаемому эффекту.

#### Литература

1. В.И. Векслер и др. Препринт ОИЯИ, Р9-3440-2, Дубна, 1968.
2. И.Н. Иванов и др. Препринт ОИЯИ, Р9-5535, Дубна, 1970.
3. В.П. Саранцев и др. ЖЭТФ, 60, 1980 /1971/.

4. В.С.Александров и др. Сообщение ОИЯИ, Р9- 7778  
Дубна, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 января 1974 года.