

93-149



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P13-93-149

С.Б.Ворожцов, В.В.Калиниченко, О.В.Ломакина

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ
МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

1993

Коллаборация SDC (the Solenoidal Detector Collaboration) сформировалась первоначально в 1989 году для исследования физических процессов на коллайдере SSC (США) при больших передаваемых поперечных импульсах частиц [1]. Свое название «соленоидальный детектор» экспериментальная установка получила потому, что центральная ее часть представляет из себя большой цилиндрический объем, окруженный соленоидальной обмоткой и заполненный регистрирующими треки частиц детекторами. Мюонная система детектора включает в себя намагниченные железные тороиды, проволочные камеры и сцинтилляционные счетчики. Мюонная система предназначена для идентификации мюонов с высоким разрешением при измерении моментов частиц.

Наибольший по размерам железный намагниченный тороид мюонной системы называется Муоп Bagel Toroid (МВТ). Магнит имеет тороидальный сердечник в виде восьмиугольника с двумя обмотками на каждой из сторон. Вдоль оси тороида магнитопровод набран из отдельных железных блоков. Основным требованием к магниту МВТ является создание тороидального магнитного поля величиной $\sim 1,8$ Тл в рабочей зоне установки, которой является сердечник магнита.

Чтобы обеспечить нормальную работу магнита МВТ, очень важна оценка магнитных характеристик различных материалов для изготовления сердечника магнита с точки зрения сформулированных требований к распределению в рабочей зоне установки и минимального уровня необходимых ампервитков в обмотках. Возникающие здесь проблемы связаны с влиянием искажений поля на разрешение частиц по моментам и с воздействием этих искажений на срабатывание триггерной системы [2]. Последний фактор, возможно, является наиболее определяющим при выработке спецификации на разброс магнитных характеристик в отдельных пластинах сердечника.

Учитывая вышесказанное, понятно, почему столь большое внимание уделяется измерениям магнитной проницаемости стали, из которой предполагается изготавливать сердечник магнита МВТ.

Измерение магнитных характеристик материалов в постоянных магнитных полях очень часто на практике осуществляется на образцах разомкнутой формы (цилиндры, полосы и т.д.). Испытание таких образцов производится, в частности, с помощью пермеаметров различных типов [3,4], в которых испытываемые образцы включаются в искусственно создава-

емые замкнутые магнитные цепи. Погрешность измерения с помощью пермеаметров относительной магнитной проницаемости составляет, как правило, $\pm 3\%$.

Определение относительной магнитной проницаемости с помощью пермеаметров предполагает измерения продольных составляющих индукции (B) и напряженности поля (H) в образце. По измеренным таким образом значениям B и H относительная магнитная проницаемость μ_r материала образца определяется из соотношения

$$\mu_r = B/\mu_0 H,$$

где μ_0 — магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Не рассматривая здесь проблему измерения магнитной индукции в образце, обсудим ряд вопросов, связанных с измерением напряженности поля в образце. Измерение напряженности магнитного поля в образце основано на неизменности тангенциальной составляющей напряженности поля на границе двух сред. Таким образом, напряженность магнитного поля в образце может быть определена посредством измерения напряженности поля на его поверхности.

Измерение напряженности поля в пермеаметрах производится на практике с помощью катушек поля или датчиков Холла. Указанные средства измерения, ввиду их конечных размеров, позволяют измерить напряженность поля вблизи поверхности образца, а не на самой его поверхности, как это требуется в соответствии с изложенным выше. Это обстоятельство приводит к появлению дополнительной погрешности в определении H (и, соответственно, μ_r).

Для уменьшения указанной дополнительной погрешности в определении H необходимо для различных конфигураций намагничивающего устройства произвести расчеты распределения поля в образце и вблизи его поверхности, а затем выполнить следующее:

— выбрать такую конфигурацию намагничивающего устройства, при которой обеспечивается по возможности меньшая неоднородность поля вблизи поверхности образца,

— определить для выбранной конфигурации намагничивающего устройства поправочные коэффициенты, устанавливающие связь между величинами напряженности поля на поверхности образца и вблизи его поверхности.

Чем меньше неоднородность поля вблизи поверхности образца, тем точнее может быть определена величина напряженности поля на поверхности образца путем измерения ее величины вблизи его поверхности и введением поправочных коэффициентов.

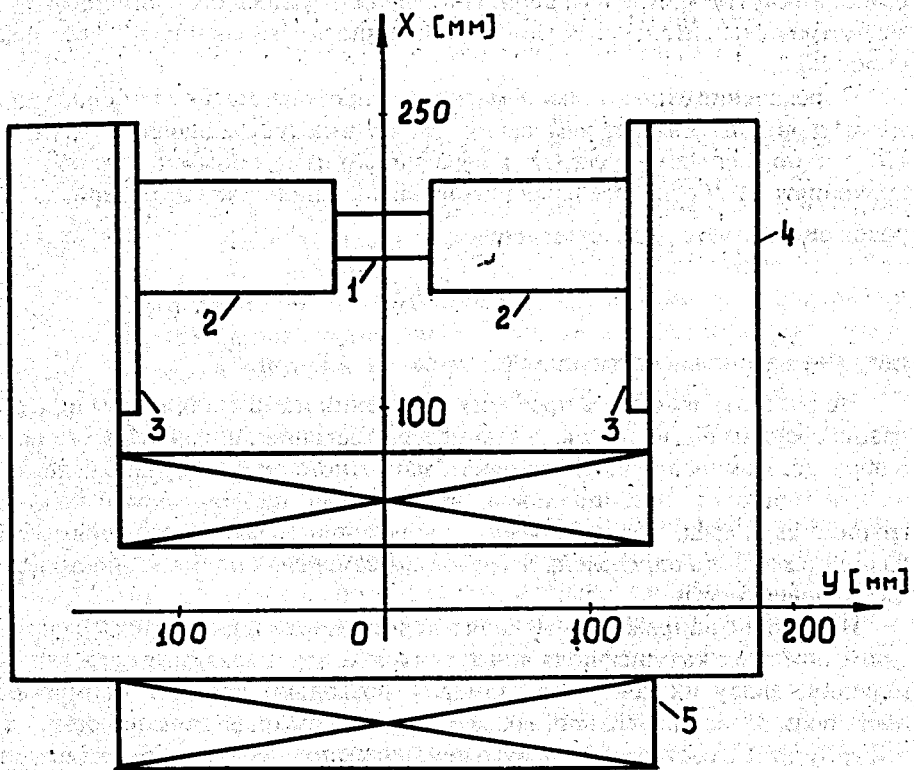


Рис.1. Конструктивная схема намагничивающего устройства

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ имеются два электромагнита, подходящие по своим параметрам для использования в качестве намагничивающих устройств для пермеметров. Расчеты распределения магнитного поля этих электромагнитов показали, что в одном из них обеспечивается существенно меньшая неоднородность поля вблизи поверхности образца. Этот электромагнит был выбран для практического использования в качестве намагничивающего устройства пермеметра. Конструктивная схема намагничивающего устройства показана на рис.1. Здесь 1 — образец, 2 — полюса, 3 — подкладки, 4 — ярмо, 5 — обмотка возбуждения, X и Y — соответственно поперечная и продольная оси магнитной системы.

Численный расчет распределения поля в элементах магнитной системы намагничивающего устройства и в образце, а также вблизи образца стали проводился при помощи программы POISCR [5], в основе которой лежит метод конечных элементов.

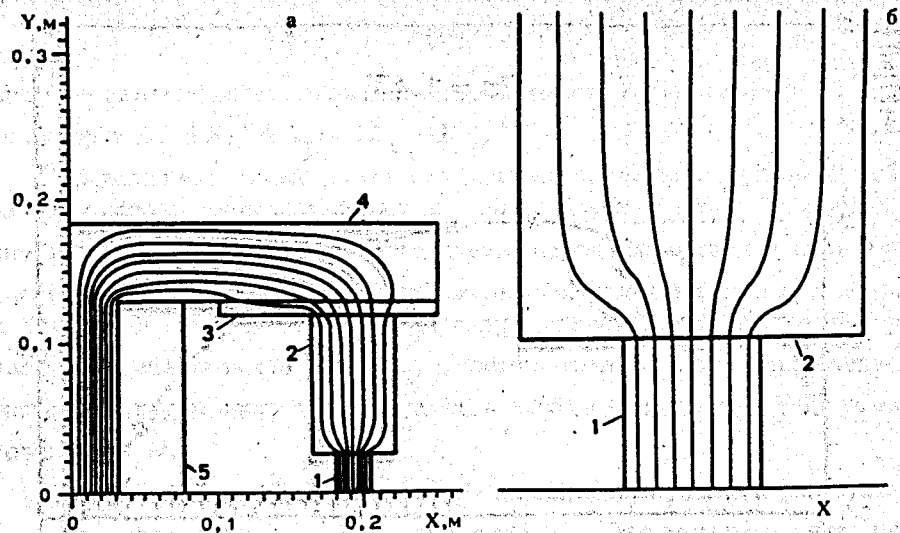


Рис.2. Распределение магнитного поля в элементах магнитной системы и в образце

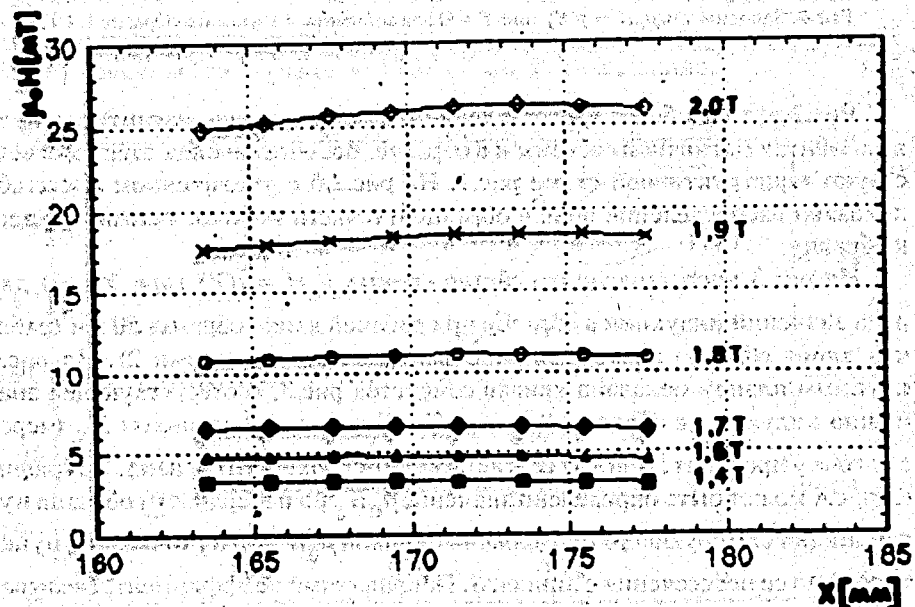


Рис.3. Семейство кривых $\mu_0 H = f(X)$ при $Y = 0$ для значений индукции в образце 1,4; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9 и 2,0 Тл

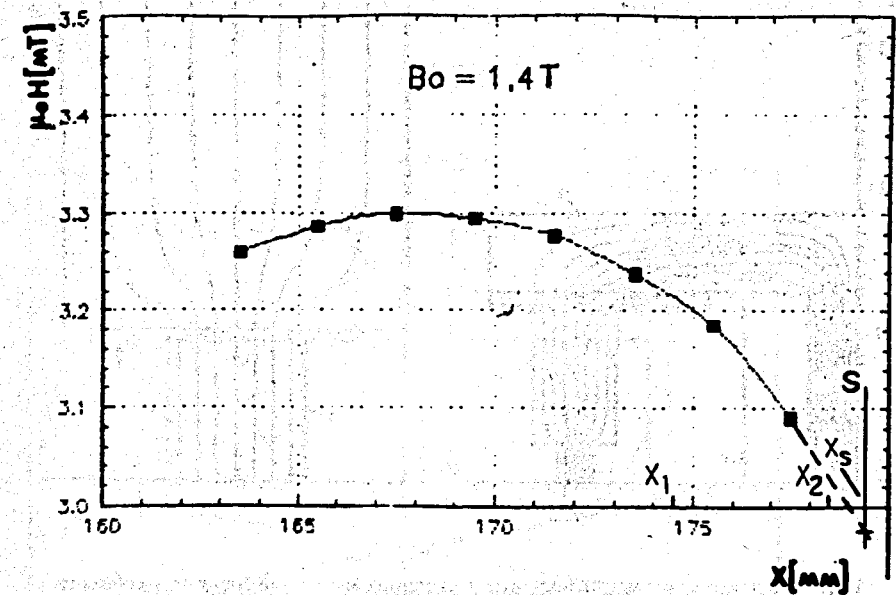


Рис.4. Зависимость $\mu_0 H = f(X)$ при $Y = 0$ для значения индукции в образце 1,4 Тл

Рис.2,а дает общее представление о распределении магнитного поля в элементах магнитной системы и в образце. Все обозначения здесь соответствуют конструктивной схеме рис.1. На рис.2,б в увеличенном масштабе показано распределение поля в образце и в части полюса, примыкающего к образцу.

На рис.3 представлено семейство кривых $\mu_0 H = f(X)$ (при $Y = 0$) для ряда значений индукции в образце при рабочей длине образца 50 мм (рабочая длина образца равна величине зазора между полюсами 2). На рис.4 крупным планом показана кривая семейства рис.3, соответствующая значению индукции в образце $B_0 = 1,4$ Тл. Значение координаты X_S (через эту точку проходит линия S) соответствует поверхности образца. Из графика рис.4 может быть определено значение $\mu_0 H_S$ на поверхности образца путем аппроксимирующего продолжения кривой $\mu_0 H = f(X)$ (показано пунктиром) до ее пересечения с линией S . Поправочный коэффициент, связывающий величину напряженности поля на поверхности образца с величиной напряженности поля вблизи поверхности на удалении от нее ΔX_1 , определим следующим образом:

$$K_1 = \mu_0 H_S / \mu_0 H_1,$$

где H_1 — напряженность поля (продольная, то есть Y -составляющая) в точке с координатой X_1 , $\Delta X_1 = |X_1 - X_S|$.

Определив численные значения K для ряда значений индукции B в образце, можно построить зависимость $K_1(B)$, с помощью которой в дальнейшем при измерениях μ_r находятся значения напряженности поля на поверхности образца по значениям напряженности, измеренным на удалении ΔX_1 от его поверхности. Если датчик напряженности поля удален от поверхности образца на расстояние ΔX_2 , аналогично изложенному выше следует расчетным путем построить зависимость $K_2(B)$ и пользоваться ею для нахождения $\mu_0 H_S$.

На рис.5 представлены кривые $K_1(B)$ и $K_2(B)$, полученные расчетным путем для сталей, близких к стали марки СТ-08. При этом расчеты велись для реальной конфигурации намагничивающего устройства, представленной на рис.1, значение координаты $X_S = 179,5$ мм, рабочая длина образца — 50 мм, его диаметр — 23 мм, $\Delta X_1 = 5$ мм и $\Delta X_2 = 2$ мм. В реальной конструкции пермеаметра датчик Холла и измерительная катушка поля удалены от поверхности образца на 5 мм и 2 мм соответственно.

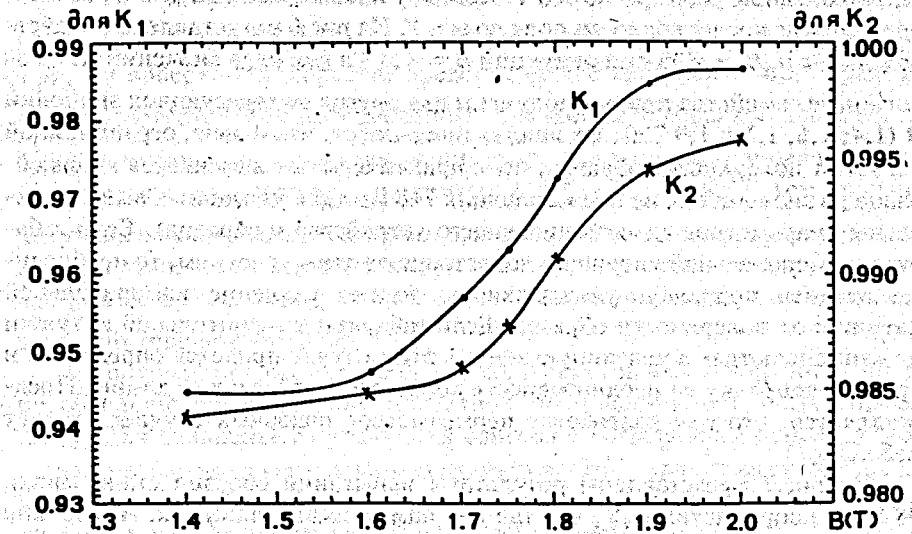


Рис.5. Поправочные коэффициенты $K_1(B)$ и $K_2(B)$

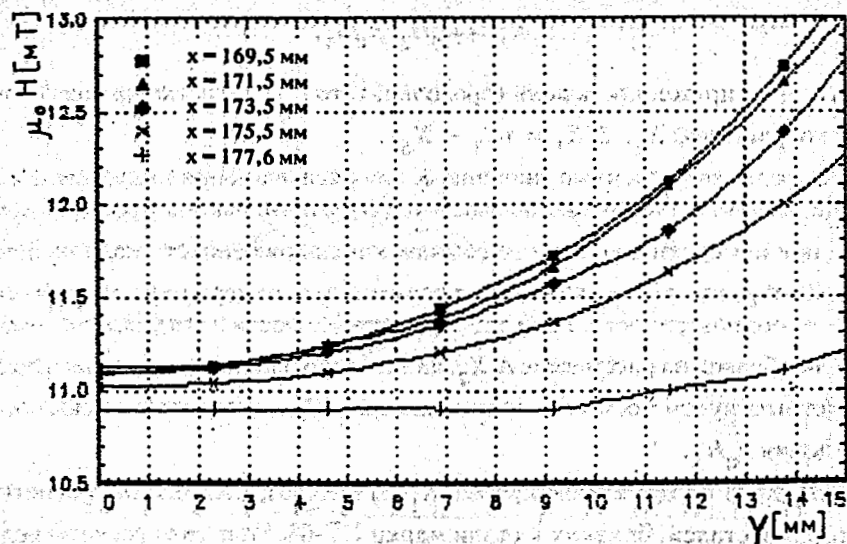


Рис.6. Семейство кривых $\mu_0 H = f(Y)$ при $B = 1,8$ Тл для различных значений X

В отличие от датчиков Холла измерительные катушки имеют относительно большие размеры по оси Y . Поэтому необходимо оценить и возможное влияние неоднородности поля по оси Y . На рис.6 представлено семейство кривых $\mu_0 H = f(Y)$ при индукции $B = 1,8$ Тл для ряда значений X . Аналогичные семейства кривых получены для других интересующих значений B (1,4; 1,6; 1,7 и 1,9 Тл). Их анализ показывает, что в зоне, ограниченной ~ 2 мм от поверхности образца, поле практически не изменяется вдоль образца до значений Y , не превышающих 7+8 мм (для указанных выше конкретных параметров намагничивающего устройства и образца). Если габариты измерительной катушки удовлетворяют этим условиям, то необходимо вводить поправку, учитывающую только удаление измерительной катушки от поверхности образца. Если габариты измерительной катушки не «вписываются» в указанную зону, в этом случае придется определять и вводить поправку на неоднородность поля по Y в пределах ее длины. Представляется, что при разработке пермеметров подобных случаев следует избегать.

На рис.7 представлены результаты испытаний образца стали марки 08 ПС в координатах $\mu_0 H_S$ и I , где I — намагничивающий ток. Измерения напряженности поля производились вблизи поверхности образца с помощью датчика Холла и измерительной катушки (указанные средства от по-

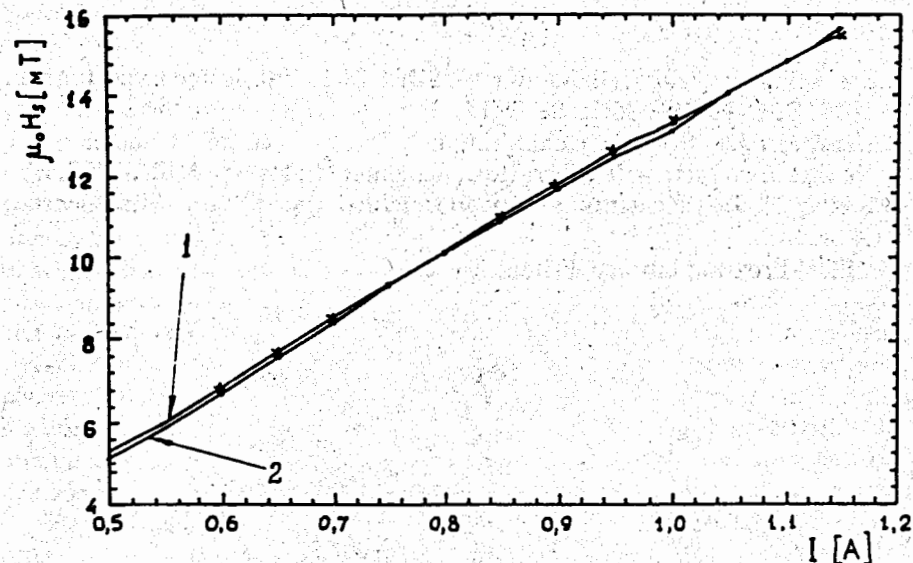


Рис.7. Зависимости $\mu_0 H_S = f(I)$, полученные для одного и того же образца с помощью датчика Холла (кривая 1) и измерительной катушки (кривая 2)

верхности образца удалены на 5 мм и 2 мм соответственно). Значения $\mu_0 H_S$ на поверхности образца, представленные кривыми 1 и 2, определялись по соответствующим измеренным значениям $\mu_0 H$ вблизи поверхности образца путем умножения последних соответственно на поправочные коэффициенты, определенные из кривых $K_1(B)$ и $K_2(B)$. При этом кривая 1 получена с помощью датчика Холла, а кривая 2 — с помощью измерительной катушки поля. Сравнение кривых 1 и 2 показывает, что значения $\mu_0 H_S$ на поверхности образца, определенные с помощью двух измерителей, довольно хорошо совпадают.

По оптимистической оценке, выбранный метод измерения потенциально обеспечивает измерение магнитной проницаемости с погрешностью $\pm 1\%$. Для дальнейшего уточнения вопроса о погрешности используемого стенда необходимо исследовать метрологические характеристики всех его узлов в комплексе. Необходимо также выполнить расчеты и эксперименты по последующей оптимизации электромагнита стенда.

Авторы выражают свою благодарность Ю.А.Будагову, В.И.Сняткову и Ю.Ф.Ломакину за постановку задачи и полезные обсуждения по теме работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Solenoidal Detector Collaboration — SDC. Technical Design Report. April, 1992, SDC-92-201. SSCL-SR-1215.
2. Bensinger J. — Private communication.
3. Чечерников В.И. — Магнитные измерения. М.: Изд-во МГУ, 1963.
4. Кифер И.И. — Испытания ферромагнитных материалов. М.: Энергия, 1969.
5. CERN Program Library Writeup T602.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 апреля 1993 года.