

с 345e4 + с 344,1и

A-194

+

Аверичев С. А. и др.  
Б1-13-83-31



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1858/83

Б1-13-83-31

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1983

Объединённый институт ядерных исследований

Лаборатория высоких энергий

Лаборатория ядерных проблем

C 34504

A-194

С.А.Аверичев, М.Х.Аникина, Б.П.Банник, Г.Л.Варденга,  
А.И.Голохвастов, Л.Н.Комолов, А.Д.Кириллов, Ю.Р.Лукстиньш,  
Э.О.Оконов, Л.Н.Сомов, С.А.Хорозов, М.И.Яцута

51-13-83-31

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ УСТАНОВКИ СКМ-200

Рукопись поступила  
в центральную библиотеку  
..25.. 01. 1983 г.

г.Дубна, 1983 г.

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
БИБЛИОТЕКА

## А Н Н О Т А Ц И Я

Измерено магнитное поле в межполюсном зазоре и прилегающем пространстве магнита СП-4Г установки СКМ-200. Измерения трех взаимноперпендикулярных составляющих индукции поля проводились с помощью датчика Холла с автоматическим съемом информации, на линии связи с ЭВМ. Для восстановления значений поля в рассматриваемых объемах использован метод восстановления трехмерного магнитного поля по его значениям, измеренным на границе. Точность измерений вертикальной составляющей поля составила 0,3%.

В своем обычном варианте стримерная камера установки СКМ-200<sup>I</sup> работает, как трековый детектор, помещенный в магнитном поле. Магнит СП-4I установки рассчитан на получение постоянного магнитного поля величиной до 10 кГс. Номинальный ток возбуждения магнита равен 10 кА, при этом падение напряжения на обмотке составляет 500 В. Питание магнита осуществляется от мотор-генератора постоянного тока типа ПП-4400-375. Стабилизация тока не хуже 0,01%.

Рабочий объем стримерной камеры 200 x 100 x 60 см<sup>3</sup> практически был predetermined размерами межполюсного пространства магнита.

Для измерений импульсов заряженных частиц по кривизне треков в магнитном поле необходимо знать величину поля по всему объему камеры. Для расчета триггера и на случай использования дополнительных детекторов желательно иметь топографию поля вне объема, занимаемого камерой. В связи с этим определение величины поля было проведено не только в объеме, занимаемом камерой (объем  $V_I$ ), но и в примыкающем пространстве, на выходе из камеры пучка заряженных частиц (объем  $V_{II}$ ). Соответствующие измерения проводились в 1974 году. К этому времени два витка электромагнита вышли из строя, и обмотка работала на восьми витках.

Принимая во внимание величину ошибок измерений импульсов частиц в камере<sup>1/2</sup>, разумно было при определении магнитного поля задаться точностью измерений около 0,3%. Это обусловило необходимость измерения всех составляющих поля  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  в большом числе точек, поскольку поле было неоднородное и имело большие градиенты. Чтобы избежать трудностей, сопутствующих большому числу измерений и исключить случайные большие экспериментальные ошибки, решено было воспользоваться методом восстановления трехмерного магнитного поля по его значениям, измеренным на границе

рассматриваемого объема /3,4/. Объемы  $V_I$  и  $V_{II}$  разбивались каждый на два подобъема, и собственно измерения производились только в точках, расположенных на поверхностях, ограничивающих подобъемы. Объем работы, тем не менее оставался велик. Поэтому целесообразно было применить метод определения величины индукции магнитного поля по измерениям ЭДС датчика Холла.

### Датчик Холла.

Датчик Холла типа Х215 представлял собой пластину из германия с размерами 6 x 3 x 0,2 мм<sup>3</sup>. Датчик был термостатирован с точностью 0,1°C. Возможная в этих пределах температурная нестабильность приводила к ошибке 0,01% при измерении ЭДС Холла. Для измерения компонент магнитного поля датчик устанавливался внутри термостата в три взаимно перпендикулярных положения. Точность установки была равна 1'. Питание датчика током производилось от источника, имеющего стабилизацию не хуже 0,01%. Ток в датчике постоянно контролировался на протяжении всех измерений.

Результатом отдельного измерения в заданной точке была величина напряжения  $U$  на электродах датчика Холла, помещенного в данную точку. Это напряжение связано с индукцией поля соотношением

$$U = U_0 + R_H \frac{I B_{\perp}}{d}, \quad (I)$$

где  $B_{\perp}$  — величина вектора магнитной индукции, перпендикулярного плоскости датчика;  $U_0$  — напряжение на холловских электродах при  $B_{\perp} = 0$ ;  $I$  — ток возбуждения датчика;  $d$  — толщина датчика;  $R_H$  — постоянная Холла.

Для определения  $B_{\perp}$  по величине  $U$  обычно используют специально измеренные градуировочные кривые. В данной работе такие кривые были получены с помощью ядерного магнитометра.

### Координатно-измерительное устройство

Для перемещения датчика по измеряемому объему и фиксации его координат использовалось специальное устройство. Основные детали устройства схематически изображены на рис. I.

Несущая конструкция - металлическая рама длиной в несколько метров - на рисунке не показана. Она устанавливалась в ярме электромагнита таким образом, чтобы жестко связанные с ней три направляющие (Рис. I, поз. (5) были выставлены параллельно <sup>продольной</sup> оси стримерной камеры, по оси  $OY$ . По направляющим перемещалась каретка (6). На каретке жестко крепились вертикальные стойки (4), на которых укреплялась горизонтальная планка (3). На планке устанавливался термостатированный датчик Холла (2). Планку можно было перемещать в вертикальном направлении по оси  $OZ$  шагом 10 мм. По планке датчик передвигался по оси  $OX$  с шагом 20 мм. При перемещении каретки вдоль направляющих (по оси  $OY$ ) через каждые 25 мм автоматически производилось измерение индукции магнитного поля. Формирование управляющего сигнала для автоматической работы измерительной системы обеспечивалось фотодатчиком, закрепленным на неподвижной несущей раме, и перфорированной латунной лентой, жестко связанной с движущейся кареткой. Ширина просечки в ленте равна 1 мм, расстояние между просечками - 25 мм.

Управление движением каретки, а также блок-схема измерительного устройства были аналогичны схемам, применяющимся при измерении магнитного поля в магните 2-метровой пропановой пузырьковой камеры ОИЯИ<sup>5/</sup>. Отличие состояло в том, что показания цифрового вольтметра, регистрирующие напряжение с датчика Холла, передавались по линии связи на БЭСМ-4М, которая выдавала распечатку результатов измерений и производила их запись на магнитную ленту для последующей обработки.

Измерения большей частью производились сериями. При задан-

ных начальных координатах  $X, Z$  датчика (см. Рис. 2) по сигналу с пульта управления запускался двигатель, приводящий в движение каретку. Каретка перемещалась из начального положения (датчик находился в точке 1 на передней граничной плоскости  $\Pi_1$  измеряемого объема) в конечное (датчик достигал точки 2 на задней граничной плоскости  $\Pi_2$ ), возвращалась обратно и останавливалась. Автоматическое измерение поля производилось при движении каретки и в прямом, и в обратном направлениях. Результаты двух измерений в каждой точке усреднялись, чтобы скомпенсировать влияние люфтов движущейся системы. Совокупность усредненных значений составляла серию. На Рис. 2 показаны точки измерений одной серии. Число точек серии в объеме  $V_I$  было равно 80, в объеме  $V_{II}$  - 104.

Перемещая датчик по периметру прямоугольника, ограничивающего плоскость  $\Pi_1$ , а также вдоль линии АВ, и снимая серии, можно было измерить поле на пяти плоскостях, ограничивающих подобъемы измеряемого объема. Для измерения поля на граничных поверхностях  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  серии не снимались. Вместо этого снимались показания датчика при неподвижной каретке соответственно в начальном и конечном положениях. При этом датчик последовательно перемещался с некоторым шагом по поверхностям  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ .

#### Погрешности измерений

Привязка координат координатно-измерительного устройства производилась с помощью реперной плиты, установленной на нижнем полюсе магнита. Хорошо обработанная поверхность плиты с высокой точностью выставлена в горизонтальной плоскости. На плите обрисованы реперные кресты. Их центры можно рассматривать, как точки, задающие прямые линии, параллельные осям координат стримерной камеры.

Прямолинейность направляющих координатно-измерительного устройства была проверена нивелиром. Оказалось, что при движении

каретки отклонения датчика от прямой линии не превышали 1 мм.

Привязка координат по  $oZ$  осуществлялась измерением расстояния от датчика до поверхности реперной плиты. Для привязки по  $oX$  использовался подвешенный к датчику отвес. С его помощью на реперной плите измерялось расстояние от точки отвеса до определенной линии, параллельной оси  $oY$ . Аналогично делалась привязка координат  $Y$ . Для этого каретка последовательно устанавливалась в положения, соответствующие определенным точкам серии измерений, и на реперной плите измерялись расстояния от точки отвеса до соответствующих линий, параллельных оси  $oX$ . Чтобы учесть перекосы подвижной системы, привязка по  $oY$  проверялась при движущейся каретке. Для этого фиксировалась величина поля в определенной точке серии измерений (при движущейся каретке). Далее каретка вручную устанавливалась в положение, соответствующее зафиксированной величине поля и по отвесу делались необходимые измерения нужных расстояний.

Точность определения координат измеренных точек очевидно определялась отклонением направляющих от прямолинейности и точностью привязки координат. Для координат  $X$  и  $Z$  погрешность составляла около 1 мм. Для координат  $Y$  - около 1,5 мм. Относительное увеличение погрешности определения  $Y$  было связано с наибольшей величиной люфтов подвижной системы по направлению  $oY$ .

Неопределенность в координатах приводила к ошибке в величине поля в худшем случае (в области наибольших градиентов поля) равной около 0,2%.

Другим источником ошибок могли быть повороты термостата датчика за счет возможных перекосов подвижной системы. Поворот вокруг вертикальной оси связан с люфтом по направлению  $oY$ . Максимальный возможный угол поворота был равен  $\alpha_{oZ} \approx 10'$ . Поворот вокруг продольной горизонтальной оси связан с отклонением датчика



от прямолинейного движения. Наибольший возможный угол  $\alpha_{0\gamma} \approx 16'$ . Угол поворота вокруг поперечной горизонтальной оси был измерен с помощью простого приспособления, схематически изображенного на Рис. 3 в вертикальном разрезе, вид сбоку. В оптическую трубу (1) через отверстие в экране (2) наблюдалось отраженное от зеркала (3) изображение вертикальной шкалы с делениями, нанесенной на экране (2). По шкале отсчитывалось расстояние  $z$ . Расстояние  $l$  от экрана до зеркала определялось по положению подвижной каретки на координатном устройстве. Угол поворота датчика вычислялся по формуле  $\alpha_{0\chi} \approx \frac{z}{2l}$ . В результате измерений оказалось, что в среднем  $\alpha_{0\chi} \approx 23'$ , а отклонение от среднего не превышало величину  $\Delta\alpha_{0\chi} \approx 4'$ . Наблюдая смещение изображения шкалы в поперечном направлении, можно было оценить колебания угла  $\alpha_{0z}$ . В грубом приближении получилось  $\Delta\alpha_{0z} \approx 3'$ .

Неопределенность в углах положения датчика приводит к ошибке в измеряемой величине поля. На Рис. 4<sup>a)</sup> в двумерном изображении показан датчик при измерении  $V_z$  - составляющей поля в случае, когда составляющие  $V_y$  и  $V_x$  пренебрежимо малы ( $V_z = V$ ). Неточность установки датчика определяется поворотом вокруг оси  $OY$  на угол  $\alpha_{0\gamma}$ . При измерении в данном положении вместо значения  $V_z = V$  датчик покажет величину  $V_z \cos \alpha_{0\gamma}$ . На рис. 4<sup>b)</sup> изображен случай, когда поперечная составляющая  $V_x$  сравнима по величине с  $V_z$ , и датчик вместо значения  $V_z$  покажет величину  $V_z \cos \alpha_{0\gamma} + V_x \sin \alpha_{0\gamma}$ .

При проведении измерений в тех частях объема, где составляющие  $V_y$  и  $V_x$  были малы в сравнении с  $V_z$ , измеренная величина практически не отличалась от истинной из-за малости угла  $\alpha$ . Там, где составляющие  $V_y$  и  $V_x$  были сравнимы по величине с  $V_z$ , в относительно небольших областях с наибольшими градиентами поля, ошибка в величине  $V_z$  возрастала в худшем случае до 0,5%.

Например, при  $\alpha_{ох} \approx 0,5^\circ$ ,  $B_z = 6$  кГс и  $B_y = 3$  кГс ошибка в  $B_z$  была равна  $B_y \sin \alpha_{ох} \approx 30$  Гс.

Таким образом, при измерении составляющей  $B_z$  неопределенность в углах положения датчика не имела существенного значения, и ошибки измерений определялись в основном неточностью в координатах. При измерениях  $B_x$ ,  $B_y$  - составляющих, напротив, влияние неопределенностей в углах было определяющим и большим. Во всем объеме, где  $B_z$  равно  $(6 \div 8)$  кГс, при измерении горизонтальной составляющей поворот датчика на угол  $\alpha \approx 0,5^\circ$  приводил к ошибке, равной  $B_z \sin \alpha \approx (60 \div 80)$  Гс. Даже в благоприятном случае, например, при наибольших значениях  $B_y \approx 3$  кГс это составляло  $(2 \div 3)\%$  от измеряемой величины.

Хорошей иллюстрацией точности определения координат измеряемых точек служило сравнение результатов измерений при двух положениях координатного устройства. При измерении  $V_{II}$  несколько серий делалось с нестандартным числом точек (124 точки вместо 104) таким образом, что часть точек каждой серии (22 точки) находилась в объеме  $V_I$ . В результате в 22-х точках были получены значения поля  $B_z$ , измеренные при двух положениях координатного устройства:  $B_z^I$  - при измерении объема  $V_I$  (с последующей интерполяцией) и  $B_z^{II}$  - при измерении объема  $V_{II}$ . На Рис. 5<sup>а)</sup> показаны разности  $B_z^I - B_z^{II}$  для 22-х точек. На Рис. 5<sup>б)</sup> даны соответствующие сдвиги по  $oY$ , вычисленные по градиенту поля при естественном предположении, что сдвиги по  $oX$  и  $oY$  относительно малы. Как видно из Рис. 5, относительные сдвиги при определении координат малы.

### Контроль измерений

Постоянство магнитного поля во времени обеспечивалось высокой стабилизацией тока, питающего магнит. Наблюдая падение напряжения на шунте магнита, можно было на протяжении всех измерений осуществлять контроль за стабилизацией. Колебания напряжения

на шунте не превышали 0,01%.

Контроль по показаниям шунта дублировался либо с помощью ядерного магнитометра, датчик которого помещался в определенном месте на нижнем полюсе магнита, где поле было однородное, либо повторными измерениями поля в одной и той же точке при помощи датчика Холла.

Для контроля над работой всей измерительной аппаратуры в целом периодически повторялись измерения некоторых серий - "Контрольных" серий. Чтобы сделать контроль более чувствительным, координаты X, Z контрольных серий при измерении различных составляющих поля ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ) выбирались с таким расчетом, чтобы хотя бы часть точек серии находилась в области наибольших градиентов поля. Как оказалось, результаты повторных измерений серий практически совпадали. В объеме  $V_I$  разброс возле среднего значения в отдельных точках не превышал  $\sim 5$  Гс в области относительно однородного поля, примерно 10 Гс (для  $V_z$  - составляющей) и около 15 Гс (для  $V_x$  и  $V_y$ ) при наибольших градиентах поля. Аналогичная картина наблюдалась в объеме  $V_{II}$ , хотя в области наибольших градиентов, при спаде поля за пределами межполюсного промежутка, разброс был несколько выше и местами (при поле  $V_z = 7 \div 8$  кГс) достигал 40 Гс для  $V_z$  - и 20 Гс для  $V_x$  -,  $V_y$ -составляющей.

#### Градуировка датчика Холла

Градуировка датчика производилась при помощи ядерного магнитометра. Датчик был проградуирован в интервале  $0 \div 15$  кГс с шагом около 0,5 кГс при двух взаимнопротивоположных направлениях магнитного поля. Обе градуировочные кривые показали отклонение от линейной зависимости (I), причем в разной степени. Разность между абсолютными значениями напряжения на электродах датчика для двух градуировочных кривых с увеличением абсолютной

величины поля от 0 до 9,5 кГс уменьшалась от 0,52 мВ до 0. В связи с этим при переводе показаний датчика в гауссы использовались обе градуировочные кривые.

Для аналитического выражения кривых использовалось выражение

$$B_{\perp} = a_0 + a_1 U + a_2 U^2 + a_3 U^3 + a_4 U^4 + a_5 \ln(U + \sqrt{U^2 + 1}) \quad (2)$$

где  $B_{\perp}$  дано в гауссах,  $U$  - в милливольтгах, а коэффициенты  $a_0, a_1, \dots, a_n$  для каждой кривой были получены методом наименьших квадратов. Для одной кривой ( $B_{\perp} \geq 0$ ) получили  $a_0 = 30,8347$ ;  $a_1 = 133,304$ ;  $a_2 = -0,456271$ ;  $a_3 = 2,99053 \cdot 10^{-3}$ ;  $a_4 = -7,99538 \cdot 10^{-6}$ ;  $a_5 = -14,7772$ .

Для второй кривой (при обратном направлении поля  $B_{\perp} < 0$ )

$$a_0 = 32,9023; a_1 = 130,904; a_2 = 0,387573; a_3 = 2,48473 \cdot 10^{-3}; \\ a_4 = 8,80891 \cdot 10^{-6}; a_5 = -4,03415.$$

Разница между вычисленными по формуле (2) и измеренными магнитометром значениями  $B_{\perp}$  не превышала несколько гаусс. Этого было достаточно для обеспечения необходимой точности измерений.

Если измерения величины магнитного поля необходимо производить с более высокой точностью, калибровочные измерения, разумеется, должны быть обеспечены соответственно более тщательно. Например, при точной (не хуже 0,1%) полуавтоматической картографии поля в зазоре магнита  $ISR(CERN)^{6/}$  соотношение между напряжением  $U$  и магнитным полем при калибровке было определено с точностью 0,1 Гс. Результаты калибровки после фитирования полиномом 7-й степени были получены с точностью 0,5 Гс.

#### Системы координат и списки серий

При измерениях использовались системы координат, связанные с координатно-измерительным устройством. Все возможные положения датчика Холла были пронумерованы и по осям  $Ox_N, Oy_N$  и  $Oz_N$  располагались номера положений  $X_N, Y_N$  и  $Z_N$  соответственно.

Положения направляющих координатно-измерительного устройства определило выбор направлений осей координат:

$OY_N$  - параллельно продольной оси камеры, против направления пучка,

$OZ_N$  - перпендикулярно верхней плоскости реперной плиты, сверху вниз,

$OX_N$  - перпендикулярно  $OY_N$  и  $OZ_N$ , образуя левовинтовую систему координат.

Двум положениям координатно-измерительного устройства (одно - при измерениях объема  $V_I$ , другое - объема  $V_{II}$ ) соответствовали две системы координат:  $(X_{N1}, Y_{N1}, Z_{N1})$  и  $(X_{N2}, Y_{N2}, Z_{N2})$ .

На Рис. 6 показаны сечение магнита и камеры плоскостью, проходящей через центр симметрии камеры, перпендикулярно ее продольной оси, и границы измеряемых объемов, спроектированные на эту плоскость. Штриховой линией обрисованы границы объема  $V_I$ , штрихпунктирной - объема  $V_{II}$ . Черными кружками показаны проекции начал координат. На рис. 7 в горизонтальной плоскости показаны контуры реперной плиты, спроектированные на эту плоскость границы измеряемых объемов и точки  $O_1, O_2$  начал координат.

В выбранных системах координат границы измеряемых объемов определялись следующими координатами.

На оси $OX_{N1}$ - 32 и 82	На оси $OX_{N2}$ - 7 и 82
- " - $OY_{N1}$ - 1 и 80	- " - $OY_{N2}$ - 1 и 104
- " - $OZ_{N1}$ - 1 и 63	- " - $OZ_{N2}$ - 1 и 63

Плоскости, разделяющие измеряемые объемы на подобъемы, задавались координатами  $X_{N1} = 57$  (в объеме  $V_I$ ) и  $X_{N2} = 46$  (в объеме  $V_{II}$ ).

В результате проведенных измерений в объеме  $V_I$  было снято всего 197 серий и 804 отдельные точки (на торцовых поверхностях). В объеме  $V_{II}$  было снято 207 серий и 938 отдельных точек. Некоторые подробности, относящиеся к измерениям трех составляющих поля, а

также списки координат серий и отдельных точек приводятся в Приложении I.

Для удобства ориентации в межполюсном пространстве относительно реперной плиты использовались системы координат  $(X_1, Y_1, Z_1)$  и  $(X_2, Y_2, Z_2)$  для объемов  $V_I$  и  $V_{II}$  соответственно. Начало координат для объема  $V_I$  было расположено над центром симметрии нижнего полюса магнита, на расстоянии  $H = 686,5$  мм от верхней поверхности реперной плиты. Начало координат для объема  $V_{II}$  находилось над серединой отрезка, соединяющего крайние реперные кресты № I и № 2 (см. Рис.7), на расстоянии  $H = 685$  мм от поверхности плиты.

Системы координат связаны следующими соотношениями

$$\begin{aligned} X_I &= 20 (57 - X_{NI}) - I & X_2 &= 20 (82 - X_{N2}) \\ Y_I &= 25 (Y_{NI} - I) - 94I & Y_2 &= 25 (Y_{N2} - 104) - 47 \\ Z_I &= 10 (Z_{NI} + I) & Z_2 &= 10 (Z_{N2} + I) \end{aligned}$$

Новые координаты даны в миллиметрах.

Ни одна из вышеописанных систем координат не совпадает с системой координат  $(X_0, Y_0, Z_0)$  установки СКМ-200. Например, начало координат  $(X_1, Y_1, Z_1)$  в системе установки имеет координаты  $X_0 = 25,2$  мм,  $Y_0 = 50$  мм,  $Z_0 = 26,5$  мм и, кроме того, направления осей координат этих двух систем - противоположны. При переходе от системы  $(X_1, Y_1, Z_1)$  к  $(X_0, Y_0, Z_0)$  следует изменять знаки у всех трех составляющих поля  $B_z, B_x, B_y$ .

#### Запись на магнитную ленту БЭСМ-6

Данные измерений магнитного поля магнита СП-4I установки СКМ-200 были перенесены с магнитной ленты БЭСМ-4M на магнитную ленту БЭСМ-6 для последующего использования и интерполяции поля.

Запись произведена на магнитной ленте БЭСМ-6 № 858 VARDOL на участке # 0 операторами WRITE(n) и WRITE(n)A, а также WRITE(n) A, B, C, D, .... G в следующем порядке.

```

REWIND n
WRITE (n) NVØL
END FILE n
WRITE (n) G
END FILE n
WRITE (n) G
END FILE n
:
WRITE (n) G
END FILE n
WRITE (n) NVØL
END FILE n
WRITE (n) D
END FILE n
:
WRITE (n) D
END FILE n
WRITE (n) S1, A1ZP, S2, A1ZZ, S3, A1XP, S4, A1XZ, S5,
A1YP, S6, A1YZ, S7, A2ZP, S8, A2ZZ, S9, A2XP, S10, A2XZ,
S11, A2YP, S12, A2YZ
END FILE n

```

197 серий измерений в объеме  $V_I$

207 серий измерений в объеме  $V_{II}$

$NVØL$  - идентификатор номера измеряемого объема  $V_I$  или  $V_{II}$ . Для объема  $V_I$   $NVØL = IIIIIII$ , для  $V_{II}$   $NVØL = 22222222$ .

$G(85)$  - массив данных для одной серии в объеме  $V_I$ .

$G(I)$  - маркер составляющей поля,  $G(I) = 1, 2$  или  $3$ . для составляющих поля  $B_Z$ ,  $B_X$  или  $B_Y$  соответственно.

$G(2)$  и  $G(3)$  -  $Z_1$  и  $X_1$  координаты серии, в миллиметрах.

$G(4) = G(5) = 0..$

$G(6), G(7), \dots, G(85)$  - значения индукции поля в гауссах, в 80-ти точках серии.

$D(I09)$  - аналогично массиву  $G(85)$ , массив данных в объеме  $V_{II}$ , число точек в серии равно  $I04$ .

$D(4)$  и  $D(5)$  -  $Z_{N2}$  и  $X_{N2}$  координаты серии.

$A1ZP(I80)$ ,  $A1ZZ(I80)$ ,  $A1XP(I26)$ , .....,  $A2YZ(I28)$  - массивы, содержащие значения величины индукции поля, в гауссах, измеренной в отдельных точках на торцовых поверхностях измеряемых объемов.

Первый символ идентификаторов указывает на реальный тип массива, второй символ обозначает номер объема (I или 2), третий - вид составляющей поля ( $B_z$ ,  $B_x$  или  $E_y$ ), четвертый - расположение торцовой поверхности (P - передняя,  $Y_N = I$ ; Z - задняя,  $Z_N = 80$  или  $I04$ ). Размерность массива равна числу измеренных точек на данной поверхности. Значения индукции в этих точках записаны на магнитную ленту в последовательности возрастания координат точек  $X_N$ , а затем  $Z_N$ .

Массивы  $S I(3)$ ,  $S 2(3)$ , .....,  $S I2(3)$  содержат маркировку непосредственно за ними следующих массивов данных. У каждого маркирующего массива первый элемент равен номеру объема (I. или 2.), второй - маркеру составляющей поля (I., 2. или 3.) третий - координате  $Y_1$  или  $Y_2$ , задающей торцовую поверхность.

Запись на м.ленту БЭСМ-6 производилась с помощью программы  $S\phi M\phi V$  (массивы  $G$  и  $D$ ) и программы  $TABLE$  (массивы  $S I, A1ZP, S 2, A1ZZ, ....., S I2, A2YZ$ ).

### Планарный эффект датчика Холла

Выражение (I) для величины напряжения на электродах датчика Холла имеет место в случае, когда потенциальная составляющая поля  $B_{II} = 0$ . Если  $B_{II} \neq 0$ , в это выражение следует добавить еще один член, представляющий собственно планарный эффект

$$U_p = K I B_{II}^2 \sin 2\varphi,$$

где  $K$  - константа, зависящая от свойств германиевой пластинки датчика, а  $\varphi$  - угол между вектором, проходящим через точки под-



вода тока  $I$  возбуждения датчика и вектором  $\vec{B}_{||}$ . При заданном токе  $I$  максимальный эффект будет определяться выражением

$$(U_p)_{max} = const B_{||}^2.$$

Измерение планарного эффекта используемого в данной работе датчика, точнее - его максимальной величины, было проведено при значениях поля  $B_{\perp} = 0$ ,  $B_{||} = 14$  кГс. В результате оказалось

$$(U_p)_{max} = 252 \text{ Гс}.$$

Используя эту величину, из выражения для  $(U_p)_{max}$  можно получить  $(U_p)_{max}$  для других значений  $B_{||}$  и в результате оценить вклад планарного эффекта в измеряемую величину поля. Такого рода оценка показывает, что при измерениях в объеме  $V_I$  ошибка в величине  $B_{\perp}$  - составляющей поля за счет планарного эффекта датчика в худшем случае не превышала 0,1% и, таким образом, при достигнутой точности измерений могла не учитываться. При измерениях в объеме  $V_{II}$  эта ошибка была значительно больше и требует учета.

При измерениях  $B_x$  - и  $B_y$  - составляющих относительная ошибка за счет планарного эффекта, по понятной причине, резко возрастала и местами намного превышала измеряемую величину.

Восстановление магнитного поля по его значениям, измеренным на границе рассматриваемого объема

Методы, предложенные в работах<sup>/3,4/</sup>, позволяют свести измерения магнитного поля во всем объеме к измерениям на границе этого объема. Рассмотрим, следуя работе<sup>/4/</sup>, метод восстановления трехмерного магнитного поля по его значениям, измеренным на границе рассматриваемого объема.

Магнитное поле  $\vec{B}$  внутри пустого объема является потенциальным, т.е.

$$\begin{aligned} [\vec{\nabla} \times \vec{B}] &= 0 \\ (\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

отсюда

$$\begin{aligned}\vec{B} &= -\nabla\Phi \\ \Delta\Phi &= 0,\end{aligned}\tag{4}$$

где  $\Phi$  - скалярный потенциал.

При известном значении потенциала  $\Phi$  на границе объема задача нахождения его внутри объема сводится к задаче Дирихле, решение которой может быть осуществлено численно на ЭВМ. С этой целью была использована программа расчета трехмерных электростатических полей методом сеток с применением последовательной оптимальной верхней релаксации. Для нахождения потенциала на границе объема использовано свойство потенциальности магнитного поля:

$$\oint_S (\vec{B} \cdot d\vec{r}) = 0,$$

где  $S$  - любой замкнутый контур.

Нигде не следует, что экспериментальные значения магнитного поля описываются потенциальной функцией, т.к. всегда существуют измерительные ошибки, как систематические, так и случайные. Но следует отметить, что найденная из решения уравнения (4) функция  $\Phi_{\text{эксп.}}$  с использованием экспериментальных граничных значений является гармонической, хотя и отличается от истинного реального потенциала  $\Phi_{\text{ист.}}$  магнитного поля. Разность двух гармонических функций  $\Phi_{\text{эксп.}} - \Phi_{\text{ист.}}$  также является гармонической, следовательно ее значение достигает максимума на границе. Это дает основание утверждать, что найденная  $\Phi_{\text{эксп.}}$  внутри объема будет отличаться от  $\Phi_{\text{ист.}}$  не больше, чем на границе объема. При вычислении потенциала на границе по измеренному полю случайные выбросы потенциала в данной точке будут тем меньше, чем больше измеренных точек будет включено в интегрирование. Для этого путь интегрирования выбирается по границе объема таким образом, чтобы число включенных точек было постоянным для любой рассматриваемой

точки, где ищется потенциал.

Найденный потенциал, как на границе, так и внутри объема, является уже сглаженным (лишенным экспериментальных выбросов в отдельных точках), что позволяет легко его аппроксимировать и интерполировать. Использование потенциала позволяет сократить в три раза объем памяти ЭВМ, необходимый для хранения карты магнитного поля, что очень важно для программ геометрической реконструкции.

В работе<sup>/3/</sup> уравнение (4) решалось методом интерполяции с помощью ортогональных тригонометрических функций. Этот метод требует существенно меньше оперативной памяти вычислительной машины и поэтому, используя его, возможно восстановить магнитное поле в существенно больших объемах, чем используя метод рассмотренный в работе<sup>/4/</sup>. Именно этот алгоритм и использовался в данной работе для восстановления магнитного поля во всем объеме по измеренным значениям его на границе рассматриваемого объема.

При интерполяции использовалась трехмерная прямоугольная сетка координат  $(I, J, K)$ , где  $I, J, K$  - порядковые номера узловых точек. Направления осей  $O\bar{I}, O\bar{J}, O\bar{K}$  были выбраны параллельными направлениям осей  $Ox_{N1}, Oy_{N1}, Oz_{N1}$ , а следовательно и осей  $Ox_{N2}, Oy_{N2}, Oz_{N2}$ . Интерполирование  $B_z$ -составляющей производилось по подобъемам, а  $B_x$ - и  $B_y$ -составляющей - по всему объему ( $V_I$  или  $V_{II}$ ). Число шагов на сетке было равно 25 (вдоль оси  $O\bar{I}$ ), 79 или 103 (по оси  $O\bar{J}$  в объеме  $V_I$  или  $V_{II}$  соответственно) и 10 (по оси  $O\bar{K}$ ). Начало координат располагалось в верхнем правом углу (если смотреть против направления пучка) передней торцевой поверхности подобъема или объема. Например, при интерполяции  $B_z$ -составляющей в правом подобъеме объема  $V_I$  начало координат  $(I, J, K)$  в системе  $(x_{N1}, y_{N1}, z_{N1})$  имело координаты  $x_{N1} = 82, y_{N1} = 1, z_{N1} = 1$ . В левом подобъеме  $-x_{N1} = 57,$

$Y_{N1} = 1, Z_{N1} = 1$ . Следовательно, для правого подобъема преобразование соответствующих координат будет иметь вид

$$I = 83 - X_{N1}$$

$$J = Y_{N1}$$

$$K = \frac{10}{62} (Z_{N1} - 1) + 1$$

Для левого подобъема  $I = 58 - X_{N1}$ .

Для  $X$ - и  $Y$ - составляющей объема  $V_I$ :  $\frac{84 - X_{N1}}{2}$ .

Связь между системой  $(I, J, K)$  в объеме  $V_I$  и системой координат  $(X_0, Y_0, Z_0)$  установки СКМ-200 дается соотношениями

$$I = \frac{46,2 - X_0}{20} \quad (\text{для } V_z \text{ в левом подобъеме})$$

$$I = \frac{546,2 - X_0}{20} \quad (\text{для } V_z \text{ в правом подобъеме})$$

$$I = \frac{566,2 - X_0}{40} \quad (\text{для } V_x \text{ и } V_y)$$

$$J = \frac{1016 - Y_0}{25} \quad (\text{для } V_z, V_x, V_y); K = \frac{68,5 - Z_0}{62} \quad (\text{для } V_z,$$

$V_x$  и  $V_y$ ). Здесь  $X_0, Y_0$  и  $Z_0$  даны в миллиметрах. Очевидно, что знаки у всех составляющих поля при данных переходах изменяются на противоположные.

Данные интерполяции были записаны на магнитной ленте CDC № 1589 и скопированы на м.л. № 1744 в порядке, указанном в Таблице I.

Таблица I.

Файл	Составляющая поля	Объем	Подобъем	Размерность массива В (I, J, K)
1	$V_z$	$V_I$	Левый	(26, 80, II)
2	"	"	Правый	" "
3	$V_y$	"	-	" "
4	$V_x$	"	-	" "
5	$V_z$	$V_{II}$	Левый	(26, 104, II)
6	"	"	Правый	" "
7	$V_y$	"	-	" "
8	$V_x$	"	-	" "

Характерные черты магнитного поля магнита СП-4I установки СКМ-200 показаны на Рис. 8-II. Координаты на Рис. 8-II даны в системе координат установки. Штриховыми линиями отмечены координаты  $X^*$ ,  $Y^*$  центра симметрии нижнего полюса магнита.

На рисунках можно видеть, что магнитное поле сильно неоднородно, градиенты поля велики. Имеется значительная асимметрия поля. Например, для  $V_z$ - составляющей (Рис. 8) у нижнего полюса асимметрия вдоль  $OY$  достигает 1-1,5%, у верхнего полюса - местами возрастает до 6-7% и, для крайних значений  $Y$ , повидимому, больше.

Качество интерполяции можно было оценить, сравнивая экспериментальное и интерполированное значения поля в каждой точке измерений. Оказалось, что разность этих значений, как правило, не превышала 0,1-0,2%, в редких случаях местами достигала 0,3% и только в нескольких отдельных точках доходила до 1%.

#### Рабочие карты магнитного поля

Поскольку программа геометрической реконструкции ГЕОМСК<sup>17/</sup> занимает значительную часть памяти БЭСМ-6, на которой ведется обсчет событий с СКМ-200, таблицу значений магнитного поля следовало сократить.

Прореживание для чувствительного объема камеры ( $V_I$ ) было осуществлено с учетом характера распределения поля и линейности интерполяции: наибольшая густота заданных значений поля была реализована для частей объема с наибольшим абсолютным значением второй производной зависимости поля от соответствующей координаты, то есть для тех частей объема, где зависимость величины поля от координаты в наибольшей мере отличается от линейной. Для решения этой задачи при постоянном уровне точности линейной интерполяции  $\sim 1\%$  и объеме карты поля не более 3500 слов чувствительный объем был разбит на 7 подобъемов для  $V_z$ , 3 - для  $V_y$  и

2 - для  $V_x$ , причем каждый подобъем имел свой список координат. Организованная таким образом карта поля включала в себя около 10000 его значений, упакованных по 3 в одно слово - всего 3184 слова. Эта информация, а также прореженная и упакованная аналогичным образом карта для объема  $V_{II}$ , записаны оператором WRITE на м.л. БЭСМ-6 № 916 (имя ленты VARD07) в порядке указанном в Таблице 2.

Таблица № 2.

№ участка	Объем
0,1	$V_I$
2,3	$V_I + V_{II}$
4,5	$V_{II}$

Записи продублированы для надежности.

Карты каждого из объемов содержат по три файла - по числу составляющих поля, а каждый из файлов - по нескольку массивов для подобъемов с предшествующим им названием массива и списком координат в указанном в таблице 3 порядке.

Таблица № 3.

№ объема	№ файла	Название массива	Его размерность $N_x \times N_y \times N_z$	№ последнего слова после упаковки
$V_I$	I	ZF 01	6 x 19 x 3	262
"	"	ZF 02	11 x 32 x 3	641
"	"	ZF 03	6 x 19 x 3	776
"	"	ZF 04	23 x 15 x 1	915
"	"	ZF 05	11 x 15 x 3	1101
"	"	ZF 06	8 x 17 x 2	1212
"	"	ZF 07	14 x 32 x 2	1538
"	II	XF 01	21 x 18 x 3	1941
"	"	XF 02	10 x 12 x 8	2282
"	III	YF 01	15 x 20 x 3	2606
"	"	YF 02	10 x 20 x 5	2962
"	"	YF 03	10 x 20 x 3	3184

Продолжение таблицы № 3

№ объема	№ файла	Название массива	Его размерность $N_x \times N_y \times N_z$	№ последнего слова после упаковки
V	I	ZF 08	17 x 20 x 11	4458
"	"	ZF 09	8 x 9 x 6	4621
"	II	XF 03	21 x 5 x 9	4959
"	"	XF 04	9 x 4 x 4	5024
"	III	YF 04	13 x 12 x 10	5567
"	"	YF 05	6 x 8 x 5	5665

Для поиска подобъема, в котором находится требуемая точка, а затем - 8 узловых точек ячейки (вершин параллелепипеда), в которую она попадает, и последующей распаковки и извлечения соответственно 8 используемых для интерполяции значений поля были составлены необходимые подпрограммы, включенные в ГЭФМСК.

Введение в память карты поля для объема  $V_I$  потребовало сегментации ГЭФМСК и это вместе с описанной выше процедурой сделало обсчет весьма громоздким, увеличив его время в 2-3 раза по сравнению с аналогичными программами реконструкции. Поэтому для  $V_I$  было осуществлено дополнительное прореживание карты поля до 3510 значений. В этом варианте поле задается на перфокартах тремя массивами с едиными списками координат: для  $V_z$  - 1350 чисел (10 x 15 x 9), для  $V_y$  и  $V_x$  - по 1080 чисел (8 x 15 x 9). Точность линейной интерполяции  $\sim 1,5\%$ . В этом варианте по существу и производился весь обсчет событий, полученных на СКМ-200.

Качество задания магнитного поля может быть проиллюстрировано полученным на СКМ-200 распределением экспериментальных значений  $M$  - массы  $\Delta^0$ -частицы (Рис. 12)<sup>/8/</sup>. Для сравнения на Рис.12 приведено также соответствующее распределение, полученное на стримерном спектрометре в Беркли<sup>/9/</sup>.

Авторы благодарят В.С.Балашову за помощь при установке координатно-измерительного устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Vardenga et al. 1973 International Conference on Instrumentation for High Energy Physics. Proceedings, p.157, Frascati, 1973
2. Б.П.Банник и др. Сообщения ОИЯИ, Б2-1-7113; Дубна, 1973.
3. Н. Wind. Nucl. Instr. Meth., 84, 117 (1970).
4. С.Б.Ворожцов и др. Препринт ОИЯИ, Р13-7610, Дубна, 1973.
5. А.У. Абдурахимов и др. Сообщения ОИЯИ, 13-6448, Дубна, 1972.
6. J. Billau, J.P. Grillet et, al., CERN.
7. А.У. Абдурахимов и др., ПТЭ, № 5, стр. 53, 1978.
8. М.Аникина и др. ОИЯИ, Р1-82-333, 1982
- Э.Оконов в сборнике ОИЯИ-Д-2-82-568, 1982.
9. J.Harris et. al. Phys . Rev.Lett., 47, 229 (1981).

Башкин  
Глебов  
Давыдов  
Иванов  
Сидоров  
Смирнов  
Алексеев  
Кузнецов  
Петров



ПОДПИСИ к РИСУНКАМ

- Рис. 1. Координатно-измерительное устройство. (1) - верхний полюс магнита; (2) - датчик Холла; (3) - горизонтальная планка; (4) - вертикальная стойка; (5) - направляющие; (6) - каретка; (7) - нижний полюс магнита.
- Рис. 2. Измеряемый объект.  $\Pi_1, \Pi_2$  - передняя и задняя граничные поверхности; 1, 2 - начальное и конечное положения датчика в одной из серий.
- Рис. 3. Схема измерения угла поворота датчика. (1) - оптическая труба; (2) - экран; (3) - зеркало; (4) - термостат датчика; (5) - горизонтальная планка; (6) - вертикальная стойка.
- Рис. 4. Искажение измерений  $B_z$  при отклонении датчика Холла от горизонтального положения.
- Рис. 5. Сравнение измерений при двух положениях координатного устройства; (а) - различие в величине поля  $B_z$ ; (б) - относительные сдвиги.
- Рис. 6. Поперечное сечение измеряемых объемов. (1) - объем  $V_I$ ; (2) - объем  $V_{II}$ ; (3) - камера; (4) - реперная плита; (5) - нижний полюс магнита; (6) - обмотка магнита; (7) - верхний полюс.
- Рис. 7. Продольное сечение измеряемых объемов.
- Рис. 8.  $B_z = B_z(Y)$  в объеме  $V_I$ .
- Рис. 9.  $B_z = B_z(X)$  в объеме  $V_I$ .
- Рис. 10.  $B_x = B_x(X)$ ,  $B_y = B_y(Y)$  в объеме  $V_I$ .
- Рис. 11.  $B_z = B_z(Y)$  в объеме  $V_{II}$ .
- Рис. 12. Распределение экспериментальных значений  $M$  массы  $\Lambda^0$  - частицы.

Приложение I.

В результате проведенных измерений в объеме  $V_I$  было снято всего 197 серий и 804 отдельные точки (на торцовых поверхностях), в том числе

для  $V_Z$ -составляющей: 80 серий и 360 точек,

для  $V_X$ -составляющей: 63 серии и 252 точки,

для  $V_Y$ -составляющей: 54 серии и 192 точки.

В объеме  $V_{II}$  было снято 207 серий и 938 отдельных точек, в том числе

для  $V_Z$ -составляющей: 72 серии и 360 точек,

для  $V_X$ -составляющей: 73 серии и 322 точки,

для  $V_Y$ -составляющей: 62 серии и 256 точек.

Ниже приводятся списки координат на плоскости  $(X_{N1}, Z_{N1})$ , при которых были сняты серии в объеме  $V_I$ .

Для  $V_Z$ -составляющей поля:

при  $Z_{N1} = I$  и  $Z_{N2} = 63$   $X_{N1} = 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 42, 45, 48, 51, 54, 57, 60, 63, 66, 69, 72, 75, 77, 78, 79, 80, 81, 82;$

при  $X_{N1} = 32, X_{N1} = 57$  и  $X_{N1} = 82$   $Z_{N1} = 5, 9, 15, 21, 27, 33, 39, 45, 51, 57.$

Для  $V_X$ -составляющей:

при  $Z_{N1} = I$  и  $Z_{N1} = 63$   $X_{N1} = 32, 34, 36, 38, 40, 42, 45, 48, 51, 54, 57, 60, 63, 66, 69, 72, 74, 76, 78, 80, 82;$

при  $X_{N1} = 32, 57, 82$   $Z_{N1} = 7, 15, 23, 31, 39, 47, 55.$

Для  $V_Y$ -составляющей:

при  $Z_{N1} = I$  и  $Z_{N1} = 63$   $X_{N1} = 32, 35, 38, 41, 45, 50, 54, 57, 60, 64, 69, 73, 76, 79, 82;$

при  $X_{N1} = 32, 57, 82$   $Z_{N1} = 7, 13, 19, 25, 31, 39, 47, 55.$

На торцовых поверхностях объема  $V_I$  были сняты отдельные точки.

Для  $V_Z$ -составляющей:

при  $Z_{N1} = 5, 9, 15, 21, 27, 33, 39, 45, 51, 57.$

$X_{N1} = 34, 36, 37, 39, 42, 45, 48, 51, 54, 60, 63, 66, 69,$

72, 75, 77, 78, 80.

Для  $V_x$  -составляющей:

при  $Z_{N1} = 7, 15, 23, 31, 39, 47, 55.$

$X_{N1} = 34, 36, 38, 40, 42, 45, 48, 51, 54, 60, 63, 66, 69, 72, 74, 76, 78, 80.$

Для  $V_y$  -составляющей:

при  $Z_{N1} = 7, 13, 19, 25, 31, 39, 47, 55$

$X_{N1} = 35, 38, 41, 45, 50, 54, 60, 64, 69, 73, 76, 79.$

Аналогично выглядят списки координат серий на плоскости

$(X_{N2}, Z_{N2})$  для объема  $V_{II}$ .

Для  $V_z$  -составляющей:

при  $Z_{N2} = 1$  и  $Z_{N2} = 63$   $X_{N2} = 7, 14, 20, 26, 31, 35, 39, 43, 46, 48, 50, 53, 55, 57, 59, 61, 64, 67, 72, 77, 82;$

при  $X_{N2} = 7, 46, 82$   $Z_{N2} = 7, 13, 19, 25, 31, 37, 43, 47, 51, 57.$

Для  $V_x$  -составляющей:

при  $Z_{N2} = 1$  и  $Z_{N2} = 63$   $X_{N2} = 7, 12, 17, 22, 26, 29, 32, 35, 37, 39, 41, 43, 46, 50, 53, 56, 59, 61, 63, 65, 67, 70, 73, 76, 79, 82;$

при  $X_{N2} = 7, 46, 82$   $Z_{N2} = 7, 15, 23, 31, 39, 47, 55.$

Для  $V_y$  -составляющей:

при  $Z_{N2} = 1$  и  $Z_{N2} = 63$   $X_{N2} = 7, 14, 21, 27, 32, 37, 42, 46, 49, 51, 54, 57, 60, 63, 66, 69, 72, 77, 82;$

при  $X_{N2} = 7, 46, 82$   $Z_{N2} = 7, 13, 19, 25, 31, 39, 47, 55.$

На торцовых поверхностях объема  $V_{II}$  были сняты отдельные точки.

Для  $V_z$  -составляющей:

при  $Z_{N2} = 7, 13, 19, 25, 31, 37, 43, 47, 51, 57.$

$X_{N2} = 14, 20, 26, 31, 35, 39, 43, 48, 50, 53; 55, 57, 59, 61, 64, 67, 72, 77.$

Для  $V_x$  -составляющей:

При  $Z_{N2} = 7, 15, 23, 31, 39, 47, 55$

$X_{N_2} = 12, 17, 22, 26, 29, 32, 35, 37, 39, 41, 43, 50, 53,$   
 $56, 59, 61, 63, 65, 67, 70, 73, 76, 79.$

Для ВУ -составляющей:

при  $Z_{N_2} = 7, 13, 19, 25, 31, 39, 47, 55$

$X_{N_2} = 14, 21, 27, 32, 37, 42, 49, 51, 54, 57, 60, 63, 66,$   
 $69, 72, 77.$

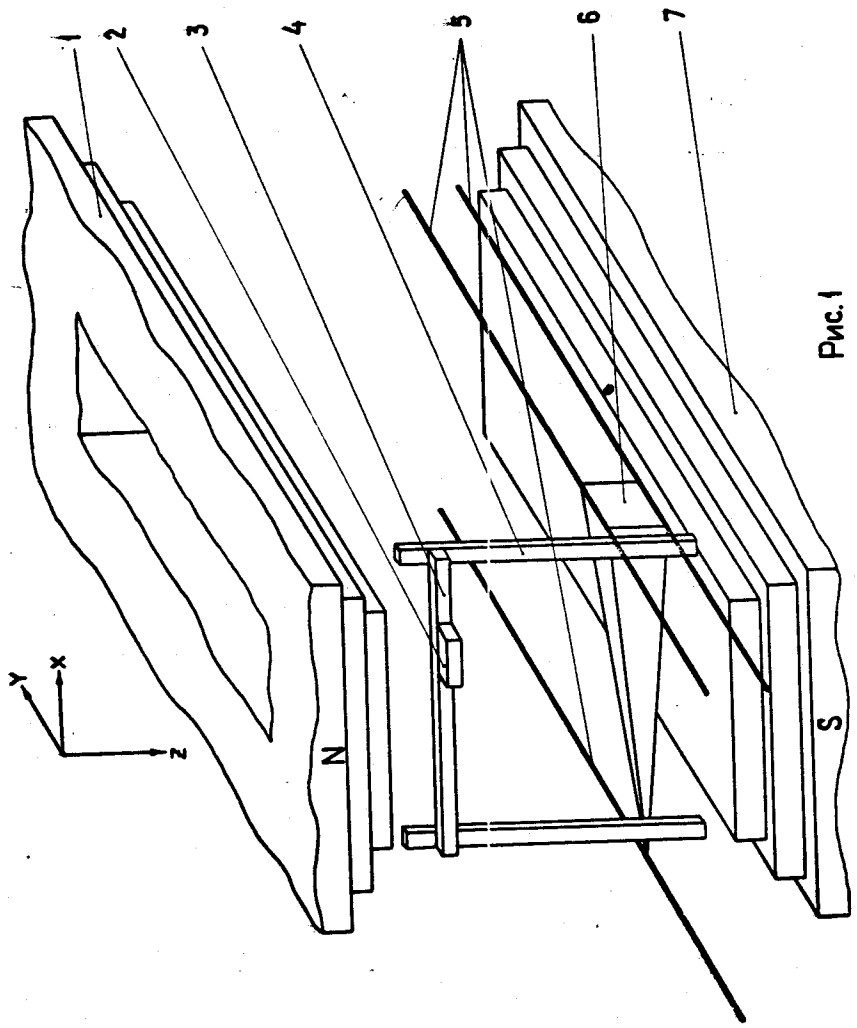


Рис. 1

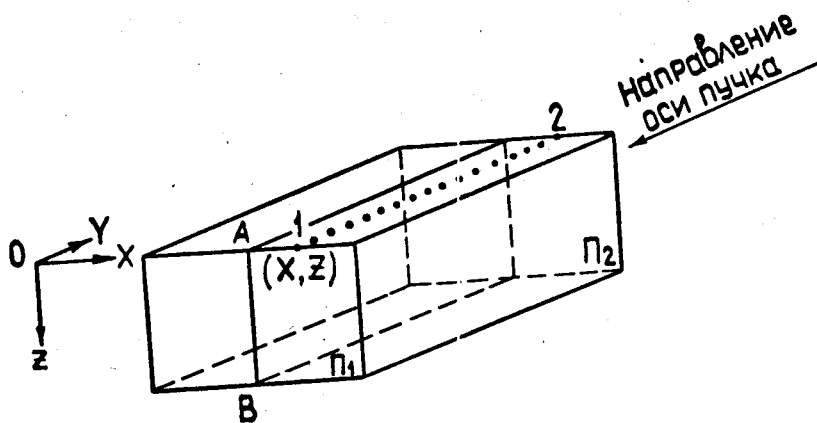


Рис.2

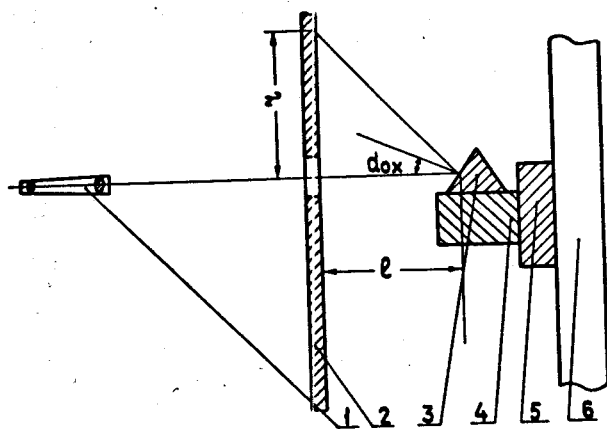


Рис.3

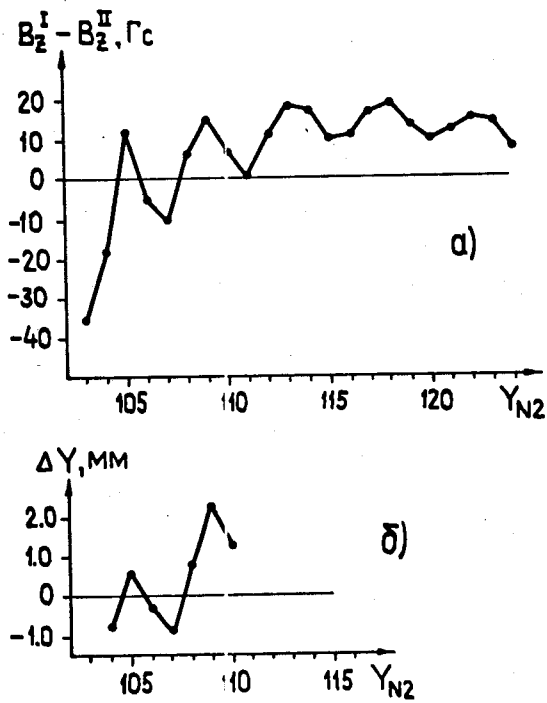
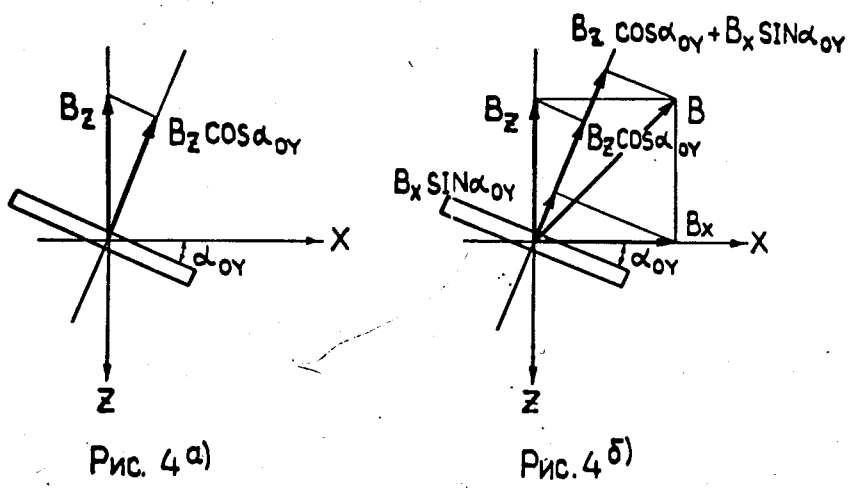
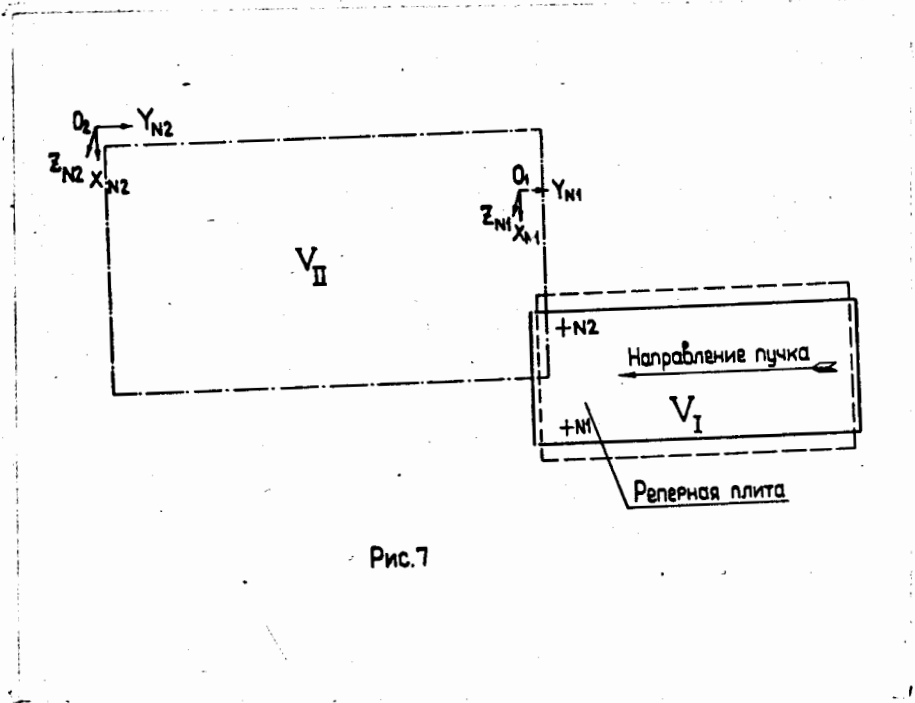
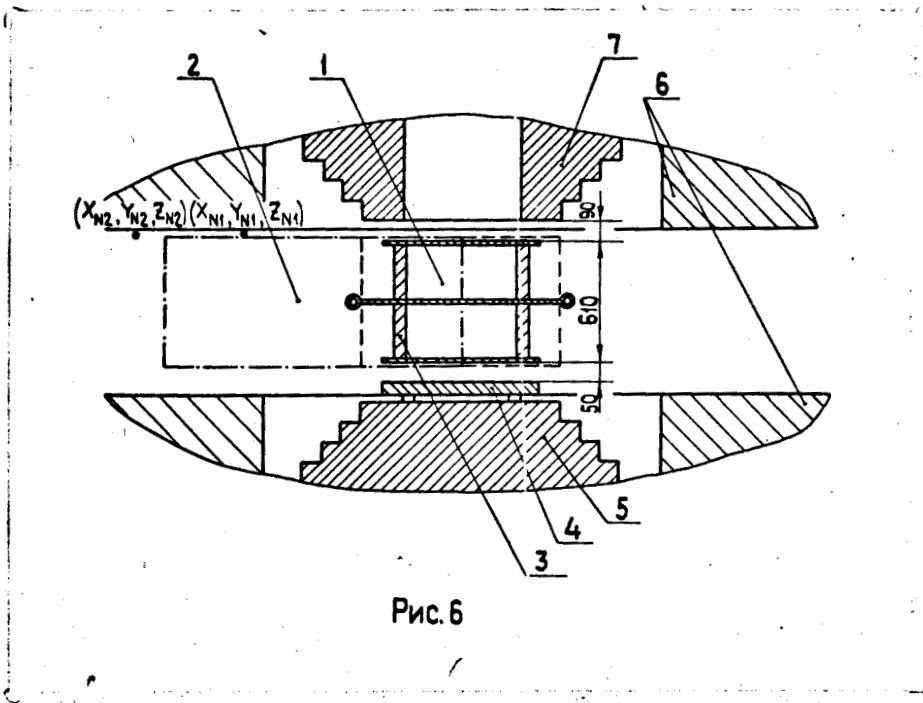


Рис. 5





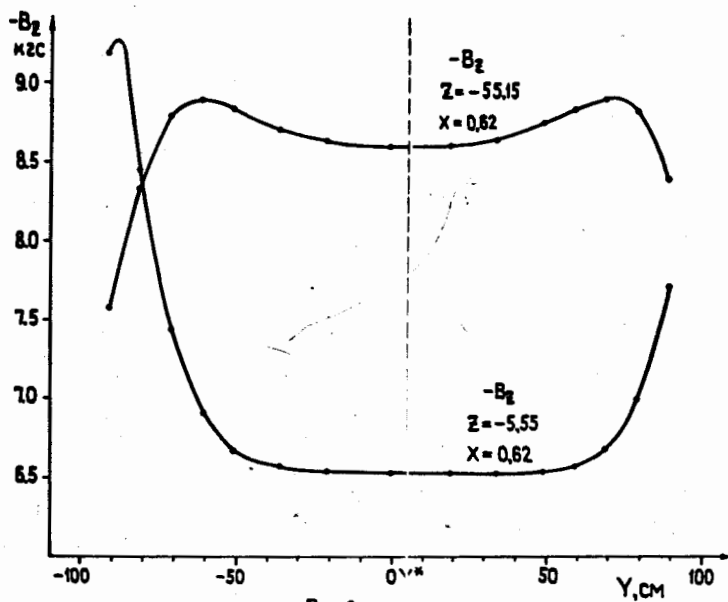


Рис. 8

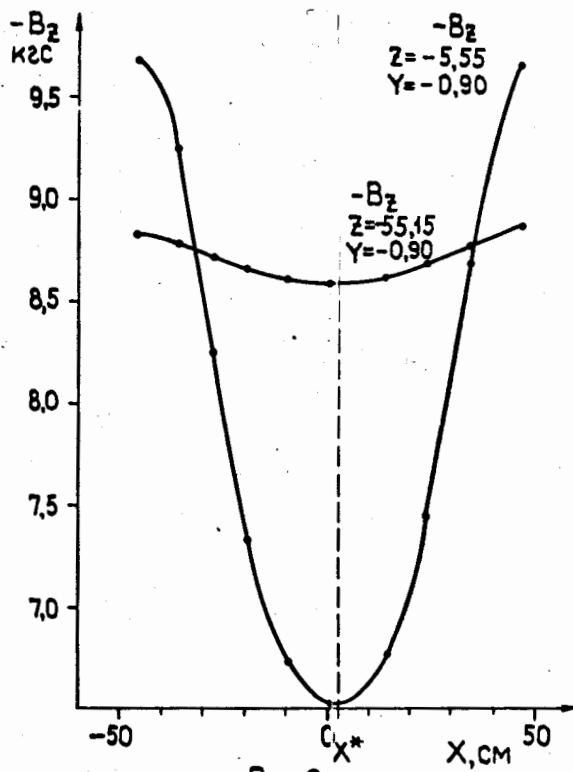


Рис. 9

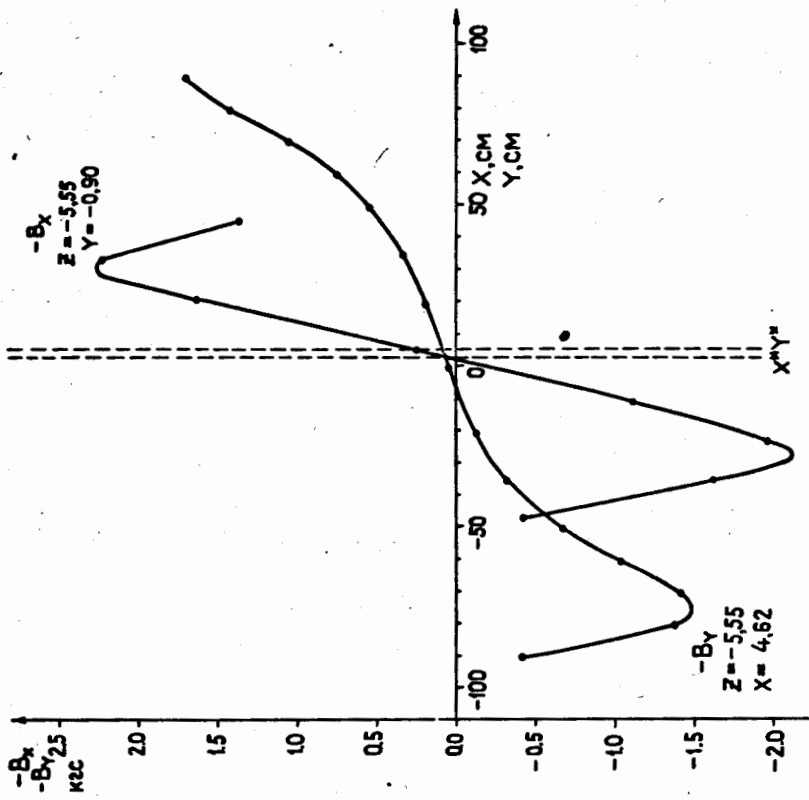


Рис. 10

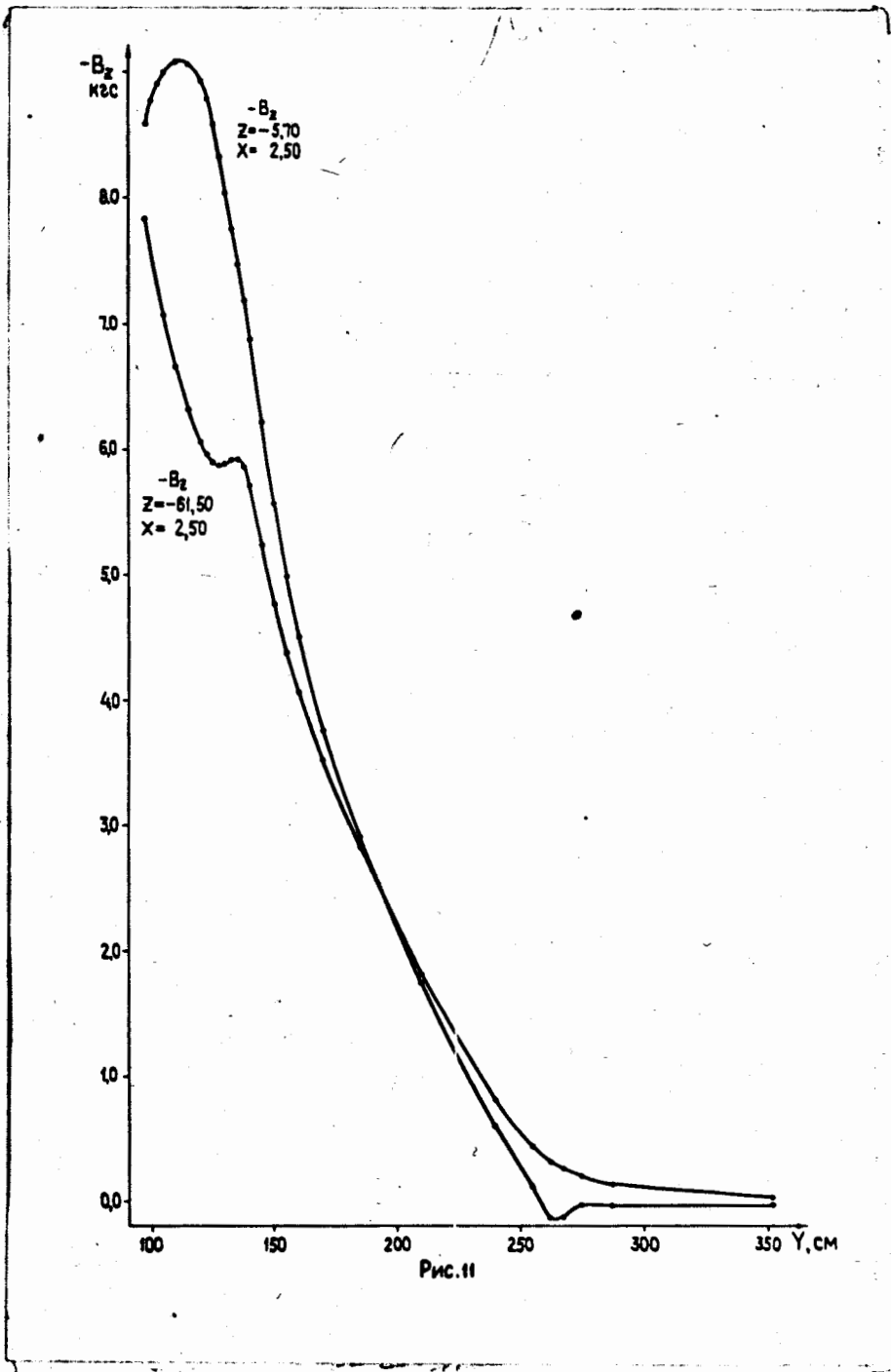


Рис. 11

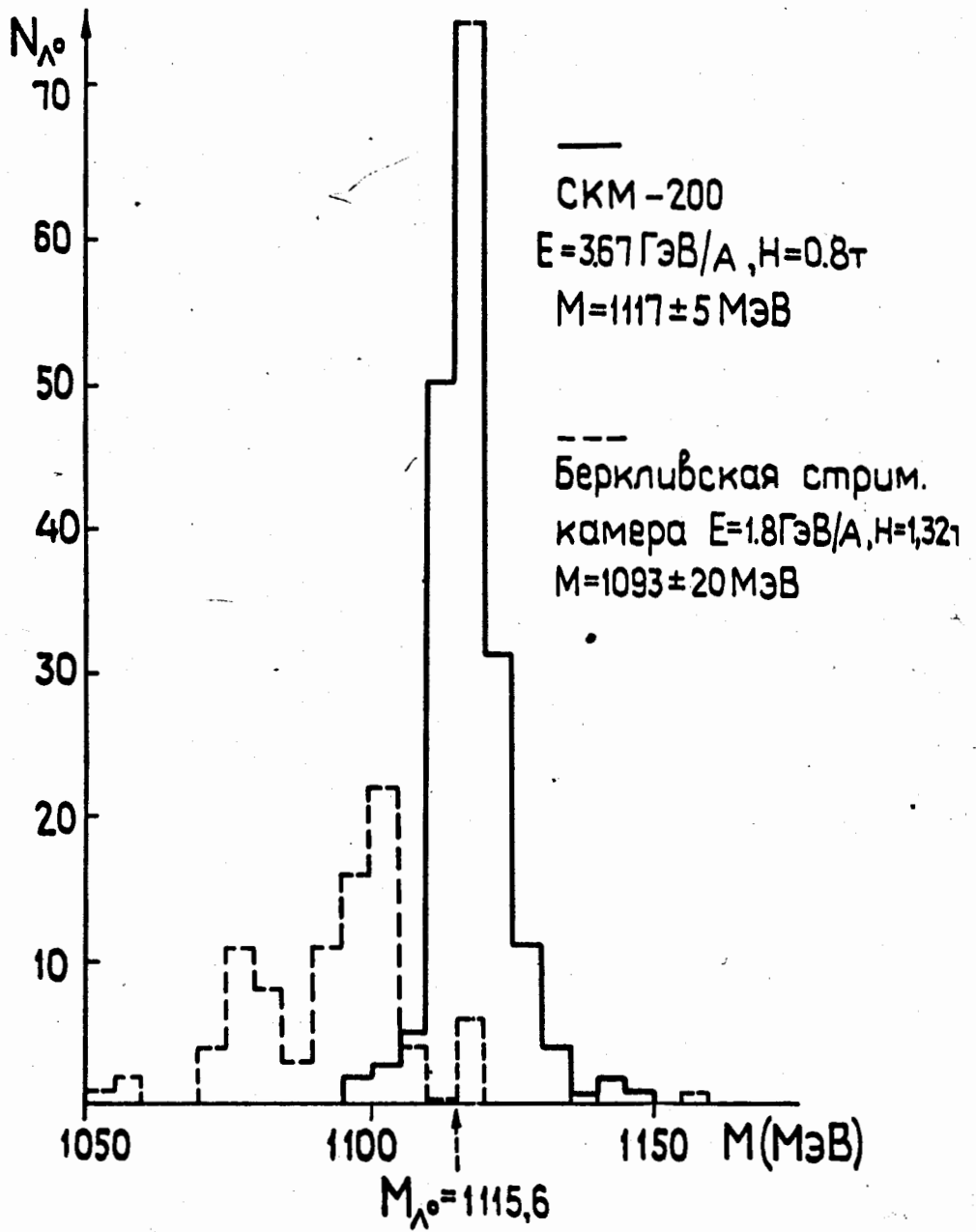


Рис. 12