

6769

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



1 - 6769

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

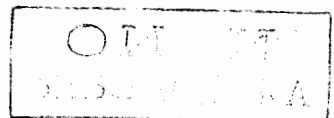
Ю.Бетко, И.В.Богуславский, Н.М.Вирясов,
И.Гласник, Ю.Д.Зернин, М.Морвиц, М.Полак,
В.П.Руковичкин, В.Т.Толмачев,
М.Д.Шафранов, Ф.Штофанек

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ
2-МЕТРОВОЙ ЖИДКОВОДОРОДНОЙ
ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЫ "ЛЮДМИЛА"

1972

Ю.Бетко, И.В.Богуславский, Н.М.Вирясов,
И.Гласник, Ю.Д.Зернин, М.Морвиц, М.Полак,
В.П.Руковичкин, В.Т.Толмачев,
М.Д.Шафранов, Ф.Штофанек

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ
2-МЕТРОВОЙ ЖИДКОВОДОРОДНОЙ
ПУЗЫРЬКОВОЙ КАМЕРЫ "ЛЮДМИЛА"



Для создания в рабочем объеме 2-метровой водородной камеры магнитных полей с индукцией $B=25-30$ кгс был разработан электромагнит МС-7. Номинальный ток возбуждения магнита 11,4 ка, при этом падение напряжения на обмотке магнита составило 600 в. Потребляемая мощность при номинальном токе - 7 мегаватт. Кривая намагничивания магнита показана на рис. 1.

Измерения трех компонент вектора магнитной индукции проведены с помощью датчиков Холла, с концентрацией примесей донорного типа порядка $10^{17}-10^{18}$ см⁻³, изготовленных в ЭТИ САН/Братислава/. Достоинство этих датчиков - малая зависимость постоянной Холла от температуры и малый планарный эффект ^{/1/}. В сильных магнитных полях планарный эффект датчиков Холла может привести к ошибкам в измерении \vec{B} .

У всех датчиков Холла подобного типа температурный коэффициент в области 25 ± 10 °С меньше 0,01% °С, что позволило проводить измерения без температурной стабилизации датчиков. Датчики Холла собраны на керамической подложке площадью 6x10 мм и толщиной 400 мкм. Максимальная разница в толщине пластинки по краям ± 10 мкм, что позволяет точно выставить плоскость датчика. На подложку приклеивалась эпоксидной смолой пластина полупроводника размером 4x4 мм, толщиной 40-60 мкм. При помощи фотолитографической техники из этой пластины были изготовлены датчики крестообразной формы /рис. 2/. Датчики такой конструкции имеют малую эффективную площадь /примерно 1 мм² / и хорошую линейность по сравнению с датчиками обычной прямоугольной формы.

Измерительная головка, на которой крепятся три датчика Холла, изготовлена из латуни и имеет форму кубика с размерами 3x3x3 см. Перпендикулярность и параллельность отдельных плоскостей кубика выдержаны с точностью 90". Все три датчика помещены вблизи одной вершины. Расстояние между центрами датчиков 5 мм /рис. 3/.

Измерение топографии магнитного поля проводилось в системе координат, где ось X была направлена по пучку, ось Y - поперек пучка, а ось Z - снизу вверх. Медианной плоскости соответствует $Z=0$. Координаты $X=0$, $Y=0$ совпадают с центром камеры. В выбранной системе координат максимальная составляющая вектора магнитной индукции направлена по оси Z , составляющие вектора по осям X и Y не превышают 12% от $B_z/2$.

В Дубне изучены достижимые точности измерения вектора \vec{B} с помощью трех датчиков Холла, закрепленных на измерительной головке, проведена их градуировка и выработана методика обработки результатов измерений.

Исследования показали, что для измерения величины \vec{B} с точностью до 0,1%:

- а/ при измерении составляющей B_z , превышающей по величине остальные компоненты, достаточно пользоваться градуировочными данными;
- б/ при измерении величин B_x и B_y необходим учет и других явлений. Напряжение на холловских электродах равно:

$$U_{3,4} = U_0 + R_H \frac{IB_{\perp}}{d},$$

- где U_0 - напряжение на холловских электродах в поле $B=0$;
 B_{\perp} - величина вектора магнитной индукции перпендикулярного к плоскости датчика ;
 R_H - постоянная Холла ;
 I - ток возбуждения датчика ;
 d - толщина датчика.

Причины появления U_0 :

- 1/ несимметрия холловских электродов ;
- 2/ клиновидная форма полупроводниковой пластинки ;
- 3/ неоднородность удельного сопротивления полупроводниковой пластинки ;
- 4/ неравномерный нагрев датчика Холла и др.

Основной вклад в U_0 вносит несимметрия холловских электродов /з/. U_0 является функцией магнитного поля.

Измерение составляющих B_x и B_y происходит на фоне большой составляющей B_z , параллельной плоскости датчиков, измеряющих X и Y -компоненты вектора магнитной индукции. В этих условиях даже при равенстве $B_{\perp} = 0$ на полупроводниковый элемент датчика действуют большие магнитные поля, которые изменяют удельное сопротивление полупроводника, возможно, деформируют его и так далее. При этом меняется и U_0 - напряжение на холловских электродах в поле $B_{\perp} = 0$. Для определения U_0 датчик Холла помещался в однородное магнитное поле параллельно вектору магнитной индукции. Величина U_0 вычислялась из измерений $U_{3,4}$ при двух направлениях магнитного поля $+\vec{B}$ и $-\vec{B}$. Напряжение на холловских электродах /контактах/ равно:

$$\text{в поле } +B \quad U_{3,4} = U_0 + \frac{R_H J B_{\perp}}{d},$$

$$\text{в поле } -B \quad U_{3,4} = U_0 - \frac{R_H J B_{\perp}}{d}.$$

$$\text{Отсюда} \quad U_0 = \frac{U_{3,4} (+B) + U_{3,4} (-B)}{2}.$$

При измерении величин B_x и B_y необходимо также учитывать отклонение плоскости датчиков от оси Z /углы α_{xz} и α_{yz} /. Отклонение плоскости датчиков Холла, измеряющих B_x , B_y от оси Z , определено из измерения $U_{3,4}$ в поле \vec{B} , параллельном с осью Z при обеих полярностях магнитного поля в двух положениях измерительной головки /поворот на 180° вокруг оси Z /. Таким образом, получились четыре величины напряжений $U (+B, \phi)$;

$$U_{3,4} (-B, \phi); \quad U_{3,4} (+B, \phi + 180^\circ); \quad U_{3,4} (-B, \phi + 180^\circ),$$

из которых отклонение плоскости датчика Холла, измеряющего B_x или B_y , от оси Z определяется по формуле:

$$a_{xz} = \frac{U_{3,4}(+B, \phi) - U_{3,4}(-B, \phi) + U_{3,4}(+B, \phi + 180^\circ) - U_{3,4}(-B, \phi + 180^\circ)}{4KB}$$

При этом предполагалось, что $a_{xz} < 5^\circ$, тогда $\sin a_{xz} \approx a_{xz}$, K - чувствительность датчика Холла /мВ/кГс/.

Измеренные величины U_0 в поле 25 кгс, параллельном плоскостям датчиков, и отклонения датчиков (a_{xz} , a_{yz}) от оси Z приведены в таблице 1.

Для проверки описанного способа вычисления B_x , B_y , B_z проведены контрольные измерения в магните СП-40. Из измерения в положении, когда $B_x = 0$, $B_y = 0$, $B_z = 21,8$ кгс, определялась величина \vec{B} при помощи датчиков Холла и ЯМР. Потом измерительный элемент поворачивался на 8° вокруг оси Y и из измеренных значений $U_{3,4}$ определялись B_x , B_y , B_z . То же самое измерение сделано и при повороте головки вокруг оси X . Разброс в величинах B , определенных из отдельных измерений всеми измерительными элементами, был меньше, чем $\pm 0,03\%$, и в определении направления \vec{B} меньше, чем ± 5 .

Влияние планарного эффекта на точность измерений изучено М.Полаком и И.Гласником [11]. По результатам измерения величины планарного эффекта в магните СП-40 в Дубне из 17 датчиков было отобрано 12, для которых можно было не учитывать планарный эффект при обработке результатов измерения.

Для питания датчиков Холла использовался стабилизированный источник питания, изготовленный в ЭТИ САН. Источник предназначен для работы с изменением входного сопротивления в диапазоне 0-300 ом. В этом диапазоне сопротивления нагрузки значение тока сохраняется в пределах 0,1% с возможностью точной подстройки до номинального значения. При изменении сопротивления нагрузки с определенного значения на $\pm 25\%$ номинальное значение тока сохраняется с точностью 0,01%. Во время измерения сопротивление 12 датчиков Холла, включенных последовательно, составляло 50 ± 2 ом. Источник может работать в двух режимах на выходе - 50 и 100 ма. Схема источника питания показана на рис.4. Долговременная стабильность тока 0,01%.

Градуировка датчиков проводилась с помощью ядерно-магнитного резонанса. Датчики, измеряющие B_z -компоненту, были проградуированы в интервале -25 кгс \pm $+28,5$ кгс с шагом 300 кгс. Датчики, измеряющие B_y и B_x -компоненты, были проградуированы в интервале -3 кгс \pm $+3$ кгс. Градуировочные кривые для всех датчиков описаны аналитическим уравнением вида:

$$B = a_0 + a_1 U_{3.4} + a_2 U_{3.4}^2 + a_3 U_{3.4}^3$$

где: B - напряженность вектора магнитной индукции, перпендикулярного к плоскости датчика Холла, в гс;

$U_{3.4}$ - напряжение на холловских электродах /контактах/, в мв; коэффициенты a_0, a_1, a_2, a_3 найдены по методу наименьших квадратов. Разница между B , вычисленным и измеренным ЯМР, не превышала нескольких гс для всех датчиков. Градуировка датчиков проводилась несколько раз в разных магнитах, а также непосредственно перед измерением топографии магнитного поля магнита МС-7 и после измерения. Все независимые градуировки совпадают с точностью до приборной ошибки /0,03%/.

Измерение топографии магнитного поля проводилось внутри объема дьюара камеры. Дьюар был жестко закреплен в шахте магнита. Координатное устройство крепилось к дьюару и давало возможность перемещаться по осям X и Y с фиксированным шагом 100мм, а также равномерно перемещаться по оси Z /рис. 5/.

Измерительные головки были прикреплены по вертикали одна над другой с шагом 50 мм. При измерениях координатное устройство перемещало все измерительные головки /4 штуки/ вверх на 150 мм так, что первая становилась на место четвертой для проведения контрольных замеров.

Контроль стабильности тока питания магнита производился тремя независимыми способами:

а/ цифровым вольтметром измерялся ток генераторов, питающих магнит;

б/ мониторным датчиком Холла, установленным на дне дьюара;

в/ датчиком ЯМР, установленным на дне дьюара рядом с мониторным датчиком Холла.

По показаниям всех приборов стабильность тока через магнит МС-7 за все время измерений была не хуже 0,02%.

Структурная схема регистрации информации о магнитном поле, поступающей от датчиков Холла, представлена на рис. 6. В состав схемы входят:

- 12 датчиков Холла,
- стабилизированный источник питания,
- датчик ядерно-магнитного резонанса /ЯМР/,
- частотомер ядерно-магнитного резонанса,
- автоматический коммутатор, обеспечивающий последовательное подключение датчиков Холла на вход цифрового вольтметра,
- цифровой вольтметр типа TR -6515,
- печатающее устройство типа БЗ-15,
- операторский пульт, обеспечивающий управление автоматическим коммутатором, печатающим устройством и цифровым вольтметром, а также ручной набор координат X , Y , Z и ввод их в печатающее устройство.

Напряжения с датчиков Холла подавались на входы автоматического коммутатора: последовательный опрос датчиков проводился по команде оператора с пульта, после перемещения координатного устройства в заданную точку. Информация о величине магнитного поля распечатывалась на бумажной ленте с указанием номеров датчиков, координаты точки измерения, величины тока через датчики Холла, их температуры. Три координаты магнитного поля были измерены в 2000 точек за 20 часов. Истинные значения B_x , B_y , B_z рассчитаны с учетом следующих зависимостей:

$$U_{3,4z} = U_{0z} + K_z B_z,$$

$$U_{3,4x} = U_{0x} (B_z) + K_x B_x + K_x B_z \sin \alpha_{xz},$$

$$U_{3,4y} = U_{0y} (B_z) + K_y B_y + K_y B_z \sin \alpha_{yz}.$$

Результаты измерения составляющей B_z в плоскости $Z=0$ вдоль оси X приведены на рис. 7: на рис. 8 - составляющая B_z в той же плоскости вдоль оси Y , на рис. 9 показано изменение B_z по Z в середине камеры ($X=0$, $Y=0$).

Из-за особенности конструкции магнита /рис. 5/ наблюдается спад в величине \vec{B} в рабочем объеме камеры вблизи механизма расширения /координата $X = 1000$ /. Магнитное поле в рабочем объеме камеры /24-26 кгс/, максимальная неоднородность в рабочем объеме 12%, что хорошо согласуется с расчетными данными /2/.

По результатам контрольных замеров в одних и тех же точках /540 замеров/ разными измерительными головками и повторных замеров в середине камеры в процессе измерения получена точность в определении B 0,1% и точность в определении направления в пространстве 15'. Основной вклад в погрешности измерения дали неточность установки измерительных головок и перекосы координатного устройства в процессе перемещения.

Методом ЯМР было измерено магнитное поле при обратной полярности тока в магните. С точностью до нескольких эрстед топография магнитного поля одинакова при обоих направлениях тока питания магнита. Магнитное поле может быть искажено деталями камеры /4/. При контрольных замерах в 30 точках методом ЯМР без камеры и с полностью собранной камерой при комнатной температуре изменения топографии магнитного поля не обнаружено.

Авторы благодарят сотрудников ОЭФА, принимавших участие в наладке прибора ЯМР и проведении магнитных измерений, С.С.Кирilloва за изготовление электроники для вывода данных на цифропечать, а также сотрудников ОВК, принимавших участие в подготовке и проведении магнитных измерений.

Литература

1. M.Polak, I.Hlasnik. *Planar Hall Effect in Heavy Doped n-InSb and its Influence on the Measurement of Magnetic Field Components with Hall Generators at 4.2 K. Solid-State Electronics, Pergamon Press 1970, vol. 13, pp 219-227.*
2. Н.И. Дойников и др. *Препринт ОИЯИ Р13-4134 /1968/.*
3. О.К.Хомерику. "Энергия", М., /1971/.
4. R.Armenteros, P.Baillon. *New Measurements of the 2m HBC Magnetic Field. CERN/D. Ph. II/200, 1970.*

Рукопись поступила в издательский отдел
25 октября 1972 года.

Таблица 1

Датчик	U_0 [мВ]	U_0 [мВ] в поле $B_H = 25 \text{ кгс}$	K (мВ/кгс)	α X Z α Y Z	Составляю- щая полю
КМК-24	0,005	0,106	1,55	-7'	B _x
ЛМК-19	0,076	0,651	3,51	-12'	
КМК-29	-0,02	-0,271	6,19	-7'	
ЛМК-55	0,008	0,034	0,84	-3'	
КМК-25	-0,005	-0,051	2,76	0	B _y
КМК-32	-0,005	-0,129	1,74	5'	
КМК-31	0,008	-0,014	1,36	-8'	
КМК-27	0,014	-0,019	1,21	30'	
ЛМК-82	-0,003		1,07		B _z
КМК-54	-0,001		0,85		
ЛМК-80	-0,003		0,85		
ЛМК-52	-0,001		0,74		

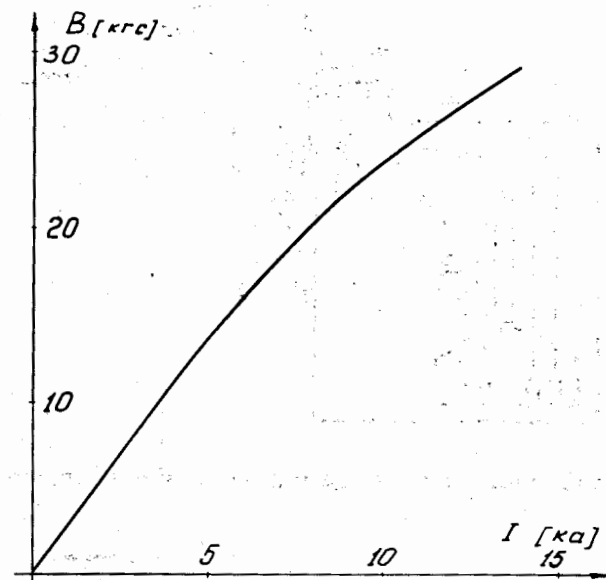


Рис. 1. Кривая намагничивания магнита МС-7.

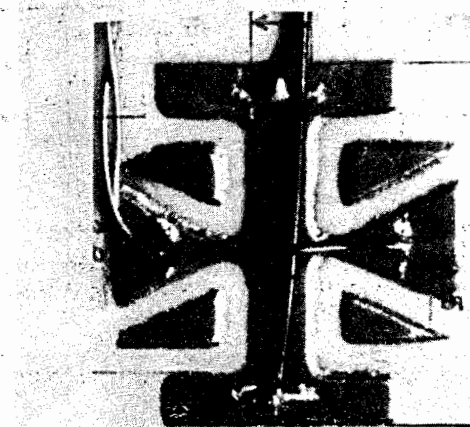


Рис. 2. Конструкция датчика Холла.

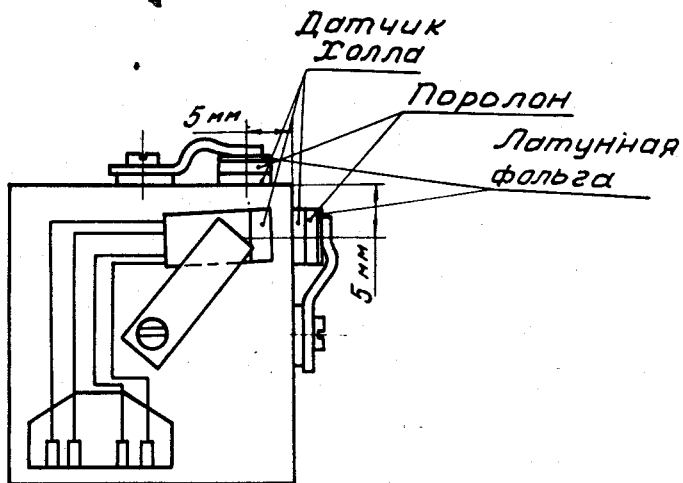
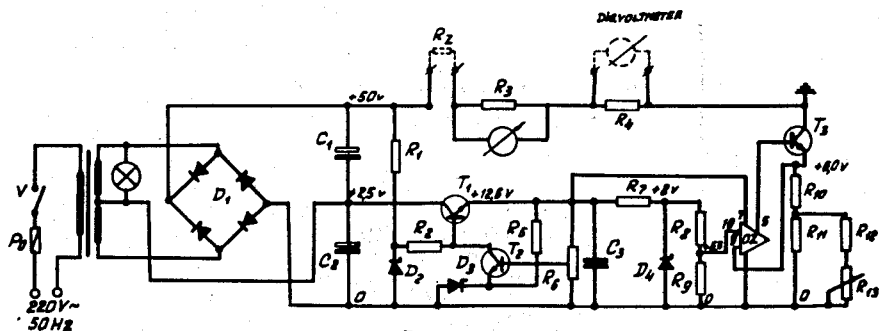


Рис. 3. Конструкция измерительного кубика элемента /головки/.



$R_1 - 570, R_2 - 18K, R_3 - 0,1, R_4 - 1, R_5 - 470, R_6 - 47K, R_7 - 50,$
 $R_8 - 300, R_9 - 1000, R_{10} - 50, R_{11} - 9, R_{12} - 40, R_{13} - 50,$
 $C_1 - 1000 \mu F / 50V, C_2 - 1000 \mu F / 50V, C_3 - 100 \mu F / 15V, D_1 - KY 705,$
 $D_2 - KZ 715, D_3 - 1N270, D_4 - KZ 82, T_1 - KP 60P, T_2 - KC 509, T_3 - KUB 02,$
 $CZ - 11T 401A.$

Рис. 4. Схема стабилизированного источника питания.

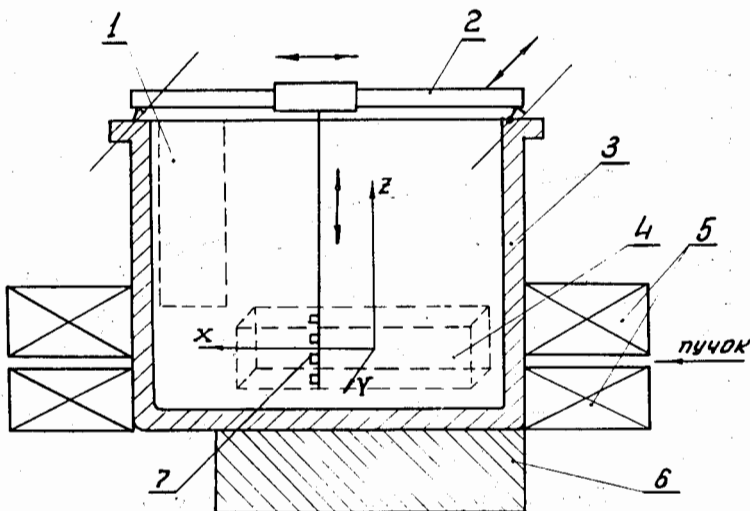


Рис. 5. Схема координатного устройства: 1. Место расположения механизма расширения. 2. Координатное устройство. 3. Дьюар установки "Людмила". 4. Рабочий объем водородной камеры. 5. Катушки магнита МС-7. 6. Нижнее ядро магнита МС-7. 7. Измерительные головки с датчиками Холла.

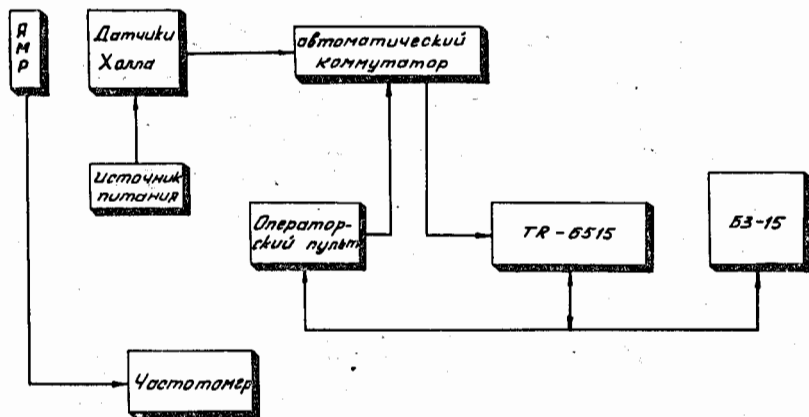


Рис. 6. Структурная схема регистрации информации магнитного поля.

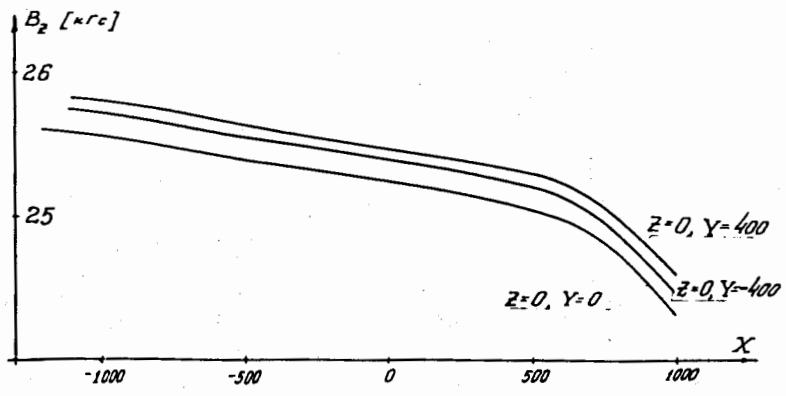


Рис. 7. Изменение B_z вдоль оси X .

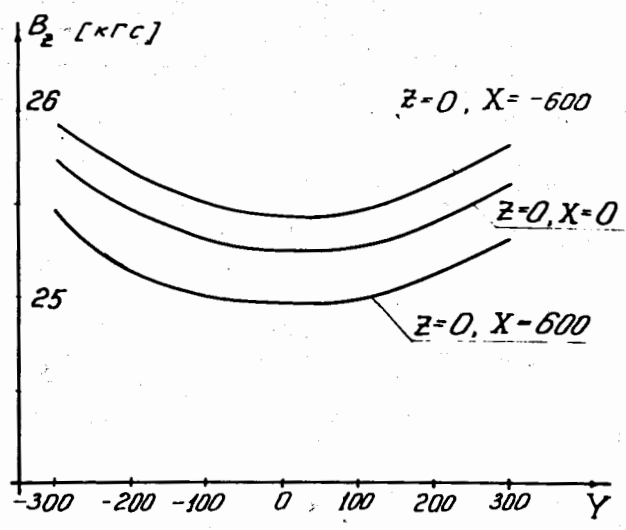


Рис. 8. Изменение B_z вдоль оси Y .

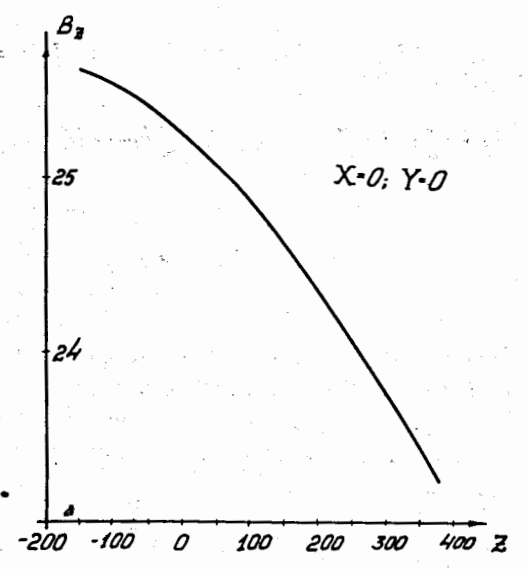


Рис. 9. Изменение B_z вдоль оси Z .