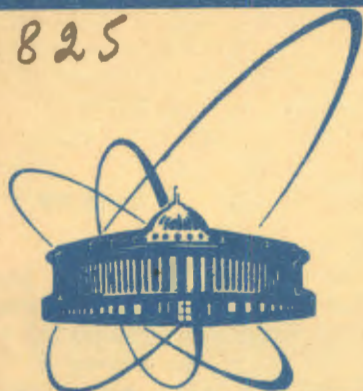


ЛЯП

Б-825



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

4435/4-81

9-81-304

+

З.В.Борисовская, С.Б.Ворожцов, Т.Н.Дударева

РАСЧЕТЫ
ТРЕХМЕРНЫХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
ПО ПРОГРАММЕ GFUN3D

1981

I. ВВЕДЕНИЕ

Программа GFUN3D для расчета трехмерных магнитоэлектростатических полей методом интегральных уравнений создана в Резерфордской лаборатории ^{1/1}, адаптирована на ЭВМ CDC-6500 в ОИЯИ и организована в виде пользовательской библиотеки..

В данной работе представлено краткое описание программы GFUN3D, тем самым облегчен пользователям доступ к ней, а также на ряде примеров продемонстрированы возможности программы.

В методе интегральных уравнений, используемом в GFUN3D, рассчитываемый магнит рассматривается как система известных токовых и неизвестных наведенных /намагниченность/ источников поля ^{2/2}. При такой постановке задачи разбиению на подобласти подлежит лишь часть, занятая железом, и не требуется введения искусственных границ, необходимых при решении краевых задач для уравнений в частных производных.

II. КОМАНДЫ И ПАРАМЕТРЫ

В табл. 1 представлены используемые в данном варианте GFUN3D команды и их значения.

II. 1. BHDA - таблица значений \vec{B} /гаусс/ в зависимости от \vec{H} /эрстед/ задается в свободном формате и требует не более 30 значений.

Пример: BHDA NEW=YES, MATE = 3

0.0	0.0
1000.0	1.0
2000.0	20.0
3000.0	100.0

\$\$ и т.д.

Если необходимо рассмотреть поле только от обмотки, то достаточно задать

BHDA NEW=YES, MATE = 3

0.0	0.0
1.0	1.0

\$\$

2. DRAW - служит для задания геометрии проводника и железного экрана. Железо разбивается на треугольные призмы. Настоящая версия может работать

Объединенный институт

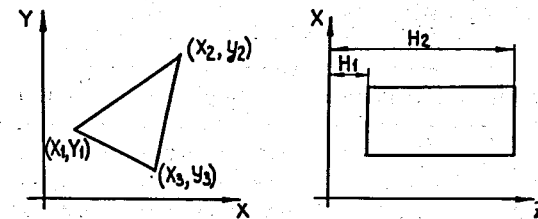
ядерных исследований

БИБЛИОТЕКА

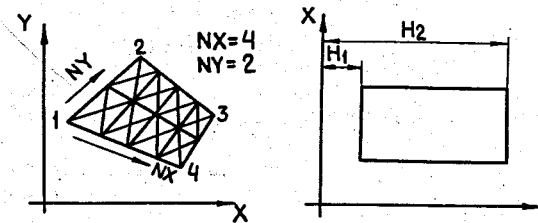
с SHAPE=4 - кодом разбиения на треугольные призмы и с SHAPE =7 - кодом разбиения на четырехугольные призмы /с последующим разбиением на треугольные призмы/. Каждая вершина треугольной призмы должна быть общей для соседних призм /см. рис. 1/.

Таблица 1

Команды	Функция	Параметры
BHDA	Ставит программу в режим вычисления /магнитная проницаемость/ для любого материала, задаваемого табличным значением В в зависимости от Н	MATE, NEW
DRAW	Используется для задания геометрии проводника и железного экрана	SHAP, MATE, SYMM, END, x1 x4, y1 y4, z1 z4, R1, R2, R, A, B, H1, HZ, ANGLE, XCEN, YCEN, RCEN, PHI, NX, NY, NZ, J
FRAM	Служит для задания максимума и минимума X и Y массивов, выводимых на дисплей	XMAX, YMAX, XMIN, YMIN
GETB	Служит для вызова команд, вычисляющих поле в точке, вдоль осей и на заданном радиусе. Эта команда используется также для задания начальных параметров для "HARM"	X, Y, Z, DX, DY, DZ, NX, NY, NZ, XO, YO, ZO, COMP, FINT, PRINT, HMIN, HMAX, R, DR, NR, PHI, NPHI
GETM	Служит для вычисления намагниченности. Должна предшествовать команде GETB	
HARM	Анализирует поле на цилиндрической кривой вокруг оси методом гармонического анализа	R, DR, NR, PHI, DPHI, NPHI, RN, SER, COMP, ZO, Z, N
PRIN (T)	Служит для вывода на печать результатов расчета и печати используемых данных	



ПРАВЯЯ ТРЕУГОЛЬНАЯ ПРИЗМА, SHAPE=4.



SHAPE=7, ЧЕТЫРЕХУГОЛЬНАЯ ПРИЗМА

Рис. 1

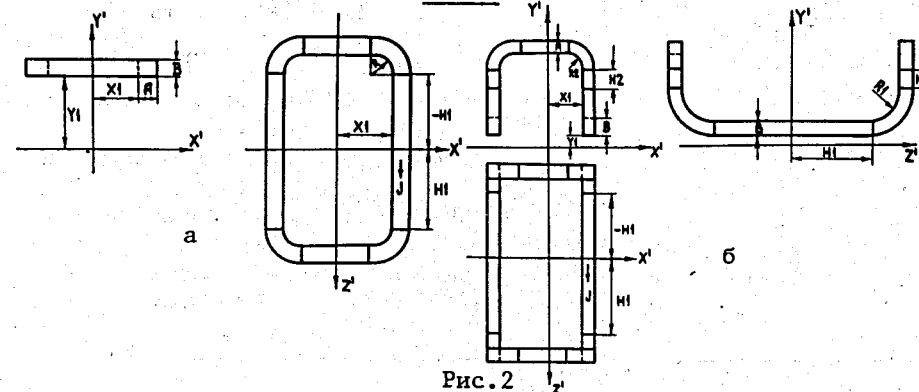


Рис. 2

Если установить локальную систему координат в центр магнита, то для задания геометрии проводника необходимо указать тип обмотки:

DRAW END = { 1, если проводник типа "RECETRACK" /см. рис. 2а/,
2, если проводник типа "BEDSTEAD" /см. рис. 2б/.

При END =1 необходимо задать:

- XI - расстояние по оси X' до проводника,
- YI - расстояние по оси Y' до проводника,
- A - ширина проводника,
- B - высота проводника,
- H1 - длина прямого участка проводника в Z-направлении,
- R - радиус поворота проводника в пл. XZ.

Таблица 2

Команда	Параметры	Ограничения	Функция параметра
GETB	X	0.0	точка поля /X-координата/;
	Y	0.0	точка поля /Y-координата/;
	Z	0.0	точка поля /Z-координата/;
	DX	1.0	приращение по оси X;
	DY	1.0	приращение по оси Y;
	DZ	1.0	приращение по оси Z;
	NX	1	число точек по оси X;
	NY	1	число точек по оси Y;
	NZ	1	число точек по оси Z;
	XO	0.0	нормализованная точка поля,
YO	0.0	используемая для COMP = DNBH	
ZO	0.0	/см. далее/;	
GETB	COMP	NY	вычисляются компоненты поля вдоль соответствующих осей NX, NY, NZ и HMOD, а также $DNBH = \frac{H(X,Y,Z) - H(XO,YO,ZO)}{H(XO,YO,ZO)}$; MODXY - абсолютное значение поля в пл. XY; MODZX - абсолютное значение поля в пл. ZX; MODYZ - абсолютное значение поля в пл. YZ;
PRINT	0		контроль печати за полем PRINT = 0 не печатается; PRINT = 2 печатается.

При END=2 задаются XI, YI, HI, A, B, аналогичные коду END=1, и еще H2 - длина прямого участка проводника в Y-направлении, R1 - радиус поворота проводника в плоскости XZ; R2 - радиус проводника в плоскости XY.

При вычислении по программе GFUN3D поля соленоида можно использовать код END=1 с величиной HI = 0,1 см и XI = 1 /см. рис. 2а/.

При помощи команды DRAW задается также код симметрии SUMM

SYMM = { 2 - диполь /поле вдоль оси Y/ - см. рис. 3а ,
4 - квадруполь /поле вдоль линии под углами 45° и 135° в плоскости XY / - см. рис. 3б.

II.3. GETM. При помощи этой команды задаются следующие параметры:

ITLI - число итераций;
ITER - номер итерации, начинаем с =0;
PRIN - контроль печати { =0 - не печатать,
=3 - печать матриц,
=5 - печать матриц и коэффициентов;
MU - магнитная проницаемость, если расчет производится при постоянном ее значении.

II.4. GETB. Параметры, используемые этой командой, и их значения приведены в табл. 2.

II.5. HARM - команда вызывает программы, вычисляющие амплитуды гармоник поля при разложении поля в ряд Фурье в виде

$$B_{\theta}(R, \theta, z) = \sum_{N1}^{NZ} \{ A_N \cdot R^{(N-1)} \cos(N\theta) - D_N \cdot R^{(N-1)} \cdot \sin(N\theta) \}. \quad /2/$$

Гармоники вычисляются для поля диполя HARM SER=DIPO и квадруполя HARM SER=QUAD. В табл. 3 собраны параметры, используемые командой HARM. На рис. 3в показаны координаты, используемые при гармоническом анализе поля. Поле диполя анализируется в угловой области от 0° до 90°.

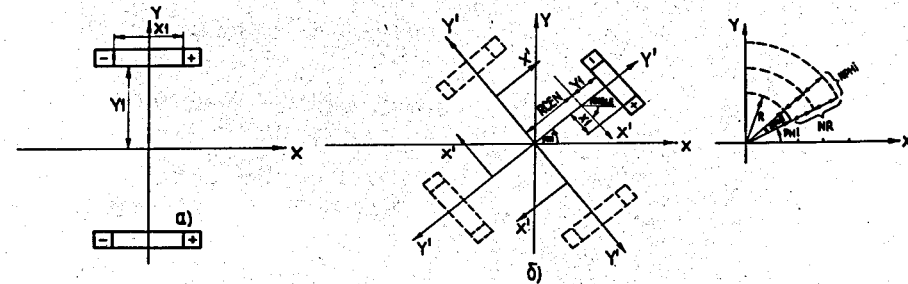


Рис. 3

III. ПРИМЕРЫ ПАКЕТОВ ПРОГРАММЫ

III.1. Сверхпроводящий диполь типа СКД

Программа GFUN3D была использована для расчета поля сверхпроводящего диполя СКД^{3/} с обмоткой типа "BEDSTEAD" (END=2) и железным экраном типа "оконной рамы" /см. рис. 4 и 5/. На

рис. 4а и 4б железный экран /1/8 часть/ разбит на отдельные элементы. В этом примере использовалось максимальное число разбиений по железу - 36 треугольных призм.

Полученное распределение поля вдоль оси Z /ось магнита/ совпадает с экспериментальным /см. рис. 4в/ с точностью измерения /1%/. Время, затраченное на ЭВМ CDC-6500 на расчет данного варианта, составляет 5 минут. При расчете амплитуд высших гармоник поля /4/ это время увеличивается почти вдвое: до 9 минут.

Таблица 3

Команда	Параметры	Значения	Функции
HARM	SER	DIPO	Определяет номер вычисляемой гармоники N DIPO, N = 1,3,5,7,9 и т.д. QUAD, N = 2,6,10,14 и т.д. ALL, N = 1,2,3,4,5.
	COMP	HT	Определяет используемую компоненту поля HT - азимутальная HR - радиальная HZ - вдоль оси
	N	0	Высший номер вычисляемой гармоники
	Z	0.0	Z-координата в плоскости XY, в которой вычисляется поле
	R	3.0	Радиус, определяющий границу области, в которой вычисляется поле
	DR	0.3	Шаг по радиусу
	NR	3	Число точек по радиусу
	PHI	0.0	Начальный угол от оси Z
	DPHI	6.0	Шаг по азимуту
	NPHI	30	Число точек по азимуту
	RN	5.0	Для поля диполя вводится нормализованный радиус
	ZO	0.0	

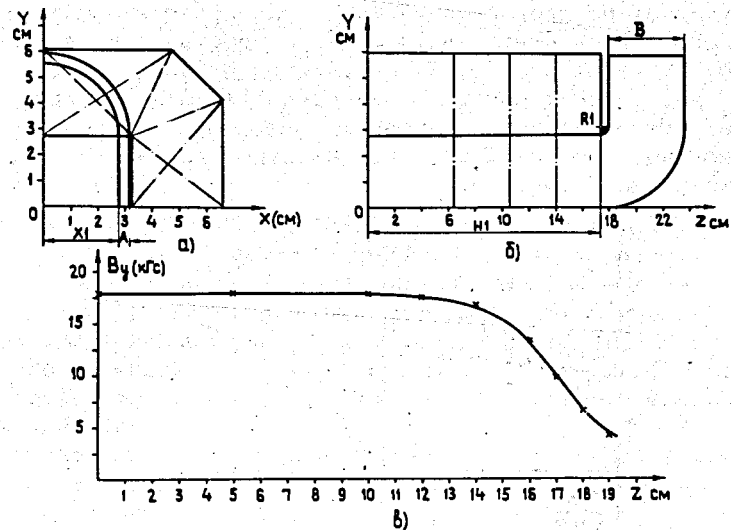


Рис. 4

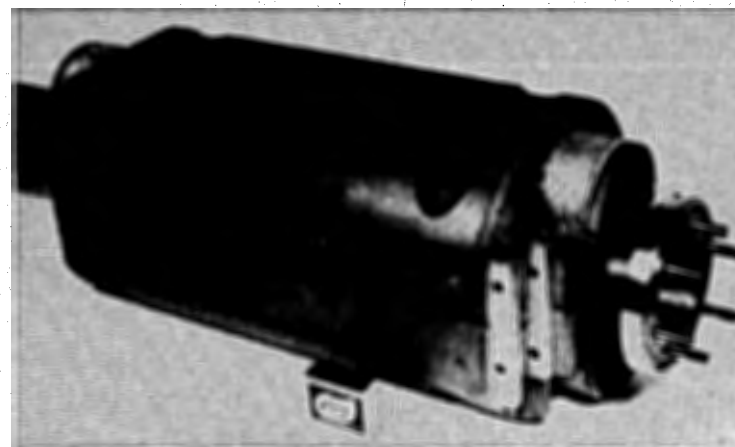


Рис. 5

III.2. Н - м а г н и т

Н-образный электромагнит с обмоткой типа "RACETRACK" (END=1) и железным ярмом, выполненным в виде прямоугольника /см.рис. 6а и 6б/, имеет поперечный размер полюса магнита в два раза меньше межполюсного расстояния.

Полученное по программе GFUN3D распределение индукции магнитного поля в центре межполюсного пространства в зависимости от значения в обмотках отличается от аналогичного распределения, рассчитанного по программе POISSON /6/ /см. рис. 6в/. Таким образом, становится очевидной необходимость учета конечных по оси Z размеров электромагнита. Время счета варианта равно 4 минутам.

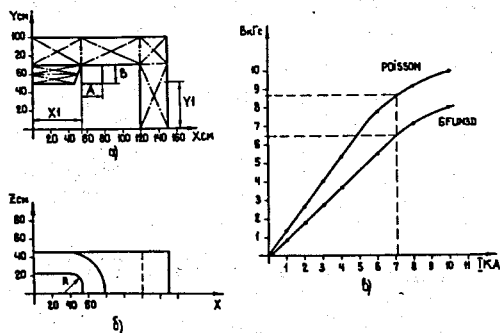


Рис. 6

III.3. Квадруполь /6/

На рис. 7а представлена конфигурация квадрупольного магнита с двумя секциями обмотки (END=1). Расчет этого магнита был предпринят для тестирования типа симметрии SYMM=4. Результат расчета приведен на рис. 7б). Сплошная линия - расчет по прог-

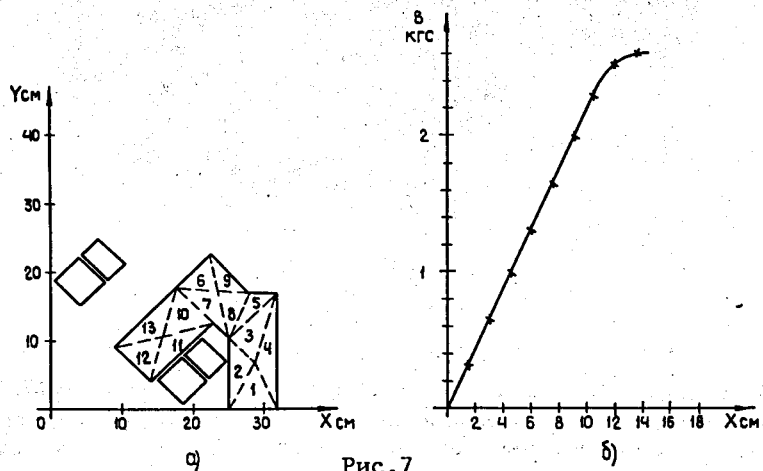


Рис. 7

рамме GFUN3D. Крестиками отмечены результаты расчета по программе MAGSYS /6/. Наблюдается хорошее совпадение зависимости компоненты поля вдоль линии $y=0, z=0$. Примеры задания исходных данных для этих магнитов приведены в приложении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленные в ОИЯИ на ЭВМ CDC-6500 программы POISSON и GFUN3D для расчета двух- и трехмерных магнитоэстатических полей позволяют проводить как предварительные оценки, так и прецизионные расчеты магнитных полей: На основании получаемых данных удастся либо значительно сократить объем экспериментального формирования магнитного поля методом проб и ошибок, либо, в некоторых случаях, обойтись без предварительного моделирования магнита /7/.

В заключение авторы выражают благодарность И.А.Шелаеву за постоянную поддержку работы и О.М.Кузнецову за помощь в расчетах Н-магнита.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Магнит СКД

```

JOB,T930,XXXXXXXXX
ACCOUNT(XXXXXX)
REDUCE.
ATTACH,GFUN3D,IO=LNPOHU,CY=.1,MR=1.
LDSET,PRESET=ZERO.
GFUN3D.
7/8/9
FRAM XMAX=36,YMAX=36
$F
DRAW END=2,SYMM=2,X1=2.75,Y1=4.,
A=0.40,B=2.70,H1=17.4,R1=1.45,R2=2.75,H2=0.,J=37600,RCEN=0..
$F
$HDA NEW=YES,MATE=3
0.6 0.0
2000 0.171
4000 3.328
5300 0.48
8000 0.656
9000 0.841
10000 1.099
11000 1.617
13000 5.200
15000 37.500
17000 6.00
18100 219.394
20300 548.648
21000 1105.26
21500 1653.846
23000 1916.6
25000 2840.91
27000 4821.43
29000 6904.76

```

```

32000 9E96.96
35000 12362.96
38000 15833.35
42000 21000.0
52000 32575.0
60000 42957.14
68000 56666.64
80000 76190.48
$$
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=C.0,H2=6.5
X1=3.25,Y1=0.0,X2=3.25,Y2=2.75,X3=6.55,Y3=4.2,X4=6.55,Y4=0.0
$$
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=C.0,H2=6.5
X1=3.25,Y1=2.75,X2=4.8,Y2=6.11,X3=6.55,Y3=6.11,X4=0.0,Y4=2.75
$$
DRAW SHAPE=4,SYMM=2,MATE=3,H1=C.0,H2=6.5
X1=3.25,Y1=2.75,X2=6.55,Y2=4.2,X3=4.8,Y3=6.11
$$
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=C.0,H2=10.5
X1=3.25,Y1=C.0,X2=3.25,Y2=2.75,X3=6.55,Y3=4.2,X4=6.55,Y4=0.0
$$
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=C.0,H2=10.5
X1=3.25,Y1=2.75,X2=4.8,Y2=6.11,X3=6.55,Y3=6.11,X4=0.0,Y4=2.75
$$
DRAW SHAPE=4,SYMM=2,MATE=3,H1=C.0,H2=10.5
X1=3.25,Y1=2.75,X2=6.55,Y2=4.2,X3=4.8,Y3=6.11
$$
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=0.0,H2=14.0
X1=3.25,Y1=0.0,X2=3.25,Y2=2.75,X3=6.55,Y3=4.2,X4=6.55,Y4=0.0
$$
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=C.0,H2=14.0
X1=3.25,Y1=2.75,X2=4.8,Y2=6.11,X3=6.55,Y3=6.11,X4=0.0,Y4=2.75
$$
DRAW SHAPE=4,SYMM=2,MATE=3,H1=C.0,H2=14.0
X1=3.25,Y1=2.75,X2=6.55,Y2=4.2,X3=4.8,Y3=6.11
$$
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=C.0,H2=17.4
X1=3.25,Y1=C.0,X2=3.25,Y2=2.75,X3=6.55,Y3=4.2,X4=6.55,Y4=C.0
$$
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=0.0,H2=17.4
X1=3.25,Y1=2.75,X2=4.8,Y2=6.11,X3=6.55,Y3=6.11,X4=0.0,Y4=2.75
$$
DRAW SHAPE=4,SYMM=2,MATE=3,H1=C.0,H2=17.4
X1=3.25,Y1=2.75,X2=6.55,Y2=4.2,X3=4.8,Y3=6.11
$$
PRINT
GETH ITLI=7,ITER=0,PRIN=0
WRITE
GETB DZ=2.0,NZ=30,COMP=HMOD,PRINT=2
7/8/9
6/7/8/9

```

```

JOB,T900. XXXXXXXXX
ACCOUNT (XXXXXX)
ATTACH,GFUN30,IO=L4P0IU,CY=.1,HR=1.
LDSET,PRESET=ZERO.
GFUN30.
7/8/9
FRAM XMAX=36,YMAX=36
$$
DRAW END=1,SYMM=2,X1=57.0,Y1=50.0,
A=23.,B=20.,H1=0.,R=22.,J=854
$$

```

H-магнит

```

BHDA NEW=YES,MATE=3
0.0 0.0
2000 0.171
4000 0.328
5300 0.48
8000 0.666
9000 0.841
10000 1.099
11000 1.617
13000 5.200
15000 37.500
17000 68.0
18100 219.394
20300 548.648
21500 1175.26
21500 1653.846
23000 1916.6
25000 2840.91
27000 4821.43
29000 6904.76
32000 9696.96
35000 12902.96
38000 15833.35
42000 21000.0
52000 32500.0
60000 42857.14
68000 56666.64
80000 76130.48
$$
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=0.0,H2=45.0
X1=120.0,Y1=0.0,X2=120.0,Y2=70.0,X3=150.0,Y3=70.0,X4=150.0,Y4=0.0
$$
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=C.0,H2=45.0
X1=120.0,Y1=70.0,X2=120.0,Y2=100.0,X3=150.0,Y3=100.0,X4=150.0,Y4=70.0
$$
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=0.0,H2=45.0
X1=55.0,Y1=70.0,X2=55.0,Y2=100.0,X3=120.0,Y3=100.0,X4=120.0,Y4=70.0
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=C.0,H2=45.0
X1=0.0,Y1=70.0,X2=0.0,Y2=100.0,X3=55.0,Y3=100.0,X4=55.0,Y4=70.0
$$
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=C.0,H2=12.0
X1=0.0,Y1=60.0,X2=0.0,Y2=70.0,X3=55.0,Y3=70.0,X4=52.5,Y4=60.0
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=0.0,H2=12.0
X1=0.0,Y1=50.0,X2=0.0,Y2=60.0,X3=52.5,Y3=60.0,X4=50.0,Y4=50.0
$$
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=12.0,H2=22.0
X1=0.0,Y1=60.0,X2=0.0,Y2=70.0,X3=44.0,Y3=70.0,X4=44.0,Y4=60.0
$$
DRAW SHAPE=7,SYMM=2,MATE=3,H1=12.0,H2=22.0
X1=0.0,Y1=50.0,X2=0.0,Y2=60.0,X3=44.0,Y3=60.0,X4=44.0,Y4=50.0
$$
PRINT
GETH ITLI=7,ITER=0,PRIN=0
WRITE
GETB DX=1.0,NX=10,COMP=HMOD,PRINT=2
7/8/9
6/7/8/9

```

Квадруполь

```

JOB,T700. XXXXXXXXX
ACCOUNT (XXXXXX)
REDUCE.

```

ATTACH,GFUN3D ID=LNPOU,CY=01,MR=1.
LOSET,PRESET=ZERO.

GFUN3D.

7/8/9

FRAM XMAX=36,YMAX=36

\$\$

DRAW END=1,SYMM=4,X1=7.25,Y1=3.85,A=5.6,B=4.2,
H1=15.8,R=1.8,J=316.1,RCEN=10

\$\$

DRAW END=1,SYMM=4,X1=7.25,Y1=8.25,A=5.6,B=3.5,
H1=15.8,R=1.8,J=306.1,PCEN=10

\$\$

BHDA NEH=YES,MATE=3

0.0 0.0

2000 2.4

6000 4.3

8000 5.2

9000 5.91

10000 6.94

12000 10.3

14000 17.84

16000 41.49

17000 64.06

18000 105.52

19000 175.76

20000 276.24

21000 427.7

22000 666.67

23000 1095.24

24000 1846.15

25000 2840.9

27000 4821.43

29000 8904.76

32000 9896.96

35000 12962.96

38000 15833.35

42000 21900

52000 32500

60000 42857.14

\$\$

DRAW SHAPE=4,SYMM=4,MATE=3,H1=0.0,H2=15.0,
X1=25,Y1=0,X2=28.5,Y2=6.8,X3=32,Y3=0

\$\$

DRAW SHAPE=4,SYMM=4,MATE=3,H1=0.0,H2=15.0,
X1=25,Y1=10.4,X2=28.5,Y2=6.8,X3=25,Y3=0

\$\$

DRAW SHAPE=4,SYMM=4,MATE=3,H1=0.0,H2=15.0,
X1=32,Y1=16.8,X2=28.5,Y2=6.8,X3=25,Y3=10.4

\$\$

DRAW SHAPE=4,SYMM=4,MATE=3,H1=0.0,H2=15.0,
X1=32,Y1=0,X2=28.5,Y2=6.8,X3=32,Y3=16.8

\$\$

DRAW SHAPE=4,SYMM=4,MATE=3,H1=0.0,H2=15.0,
X1=25,Y1=10.4,X2=28.2,Y2=16.8,X3=32,Y3=16.8

\$\$

DRAW SHAPE=4,SYMM=4,MATE=3,H1=0.0,H2=15.0,
X1=25,Y1=10.4,X2=23.38,Y2=16.88,X3=24.2,Y3=16.8

\$\$

DRAW SHAPE=4,SYMM=4,MATE=3,H1=0.0,H2=15.0,
X1=17.7,Y1=17.7,X2=23.38,Y2=16.88,X3=25,Y3=10.4

\$\$

DRAW SHAPE=4,SYMM=4,MATE=3,H1=0.0,H2=15.0,
X1=22.5,Y1=22.6,X2=23.38,Y2=16.88,X3=17.7,Y3=17.7

\$\$

DRAW SHAPE=4,SYMM=4,MATE=3,H1=0.0,H2=15.0,
X1=28.2,Y1=16.8,X2=23.38,Y2=16.88,X3=22.6,Y3=22.6

\$\$

DRAW SHAPE=4,SYMM=4,MATE=3,H1=0.0,H2=15.0,
X1=22.65,Y1=12.75,X2=25.73,Y2=10.78,X3=17.7,Y3=17.7

\$\$

DRAW SHAPE=4,SYMM=4,MATE=3,H1=0.0,H2=15.0,
X1=13.76,Y1=3.86,X2=15.73,Y2=10.78,X3=22.65,Y3=12.75

\$\$

DRAW SHAPE=4,SYMM=4,MATE=3,H1=0.0,H2=15.0,
X1=17.7,Y1=17.7,X2=15.73,Y2=10.78,X3=8.8,Y3=8.8

\$\$

DRAW SHAPE=4,SYMM=4,MATE=3,H1=0.0,H2=15.0,
X1=8.8,Y1=8.8,X2=15.73,Y2=10.78,X3=13.76,Y3=3.86

DRAW END=1,SYMM=4,X1=7.25,Y1=8.25,A=5.6,B=3.5,
H1=15.8,R=1.8,J=316.1,RCEN=10

\$\$

\$\$

PRINT

GETB ITLI=29,ITER=0,PRIN=0

WRITE

GETB DX=1.5,NX=10,COMP=HMOD,PRINT=2

\$\$

HARM SER=QUAD,N=14,Z=0.0,R=1.5,DR=0.0,NP=1,PHI=0.0,DPHI=9.0

\$\$

6/7/8/9

ЛИТЕРАТУРА

1. Armstrong A.G. et al. RL-76-029/A.
2. Hamnala A.Y., Simkin I., Trowbridge C.W. RL-79-077.
3. Аверичев С.А. и др. ОИЯИ, Р8-11700, Дубна, 1978.
4. Борисовская З.В. и др. ОИЯИ, Р9-80-756, Дубна, 1980.
5. Ворожцов С.Б. и др. ОИЯИ, Б1-11-12070, Дубна, 1978.
6. Akishin P.G., Vorozhtsov S.B., Zhidkov E.P. JINR, E9-11859, Dubna, 1978.
7. Дойников Н.И. ОИЯИ, 13-80-396, Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 мая 1981 года.