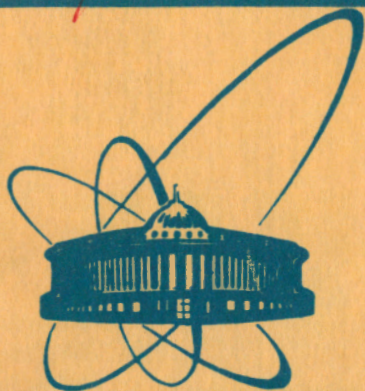


1974/82

29/III-82



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

11-81-818

Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов

СИСТЕМА ПРОГРАММ
ДЛЯ РАСЧЕТА ДВУМЕРНЫХ
МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

1981

При разработке ускорителей с пространственной вариацией поля одним из наиболее сложных и трудоемких процессов является формирование требуемого магнитного поля.

Прогресс в создании различных программ для расчета магнито-статических полей привел к тому, что в настоящее время можно с высокой точностью / ~ 1% / производить расчет систем с ферро-магнитными и токовыми элементами, что позволяет значительно сократить объем экспериментальных работ по моделированию полей. Магнитные поля ускорителей циклотронного типа с пространственной вариацией могут быть сформированы элементами, конфигурация которых отличается сложностью и несоизмеримостью масштабов мелких деталей и всей магнитной системы. По этой причине не удастся провести расчет в целом магнитной системы с требуемой для ускорителя точностью. Разработано много приемов /1-3/, с помощью которых, используя имеющиеся программы расчета двумерных конфигураций магнито-статических полей, можно проанализировать влияние различных параметров магнитной системы на распределение и величину магнитного поля.

В ОИЯИ на ЭВМ CDC-6500 поставлены разработанные в Беркли /США/ и в Резерфордской лаборатории /Англия/ программы POISSON /4/ для расчета двумерных конфигураций, и GFUN3D /5/ для расчета трехмерных магнито-статических полей, в основе которых лежат методы расчета дифференциальных и интегральных уравнений. Аналогичные программы были разработаны в ОИЯИ /6,7/.

В настоящей работе приводится описание системы программ TRIMA, созданной в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Эта система применяется для расчета и анализа магнитных полей ускорителей, и поэтому не имеет таких широких возможностей, как аналогичная система программ POISSON. Однако уменьшение универсальности позволило увеличить количество точек сетки до 1600 /без использования внешней памяти/ по сравнению с 1100 для POISSON - ОИЯИ, нет ограничения на число точек в области ферромагнетика и т.д.

СИСТЕМА ПРОГРАММ TRIMA

Система программ включает в себя три основные программы: AXMA2, AXTRI1, TRIMA и программы обработки результатов: PICTU3, CALE /рис.1/.

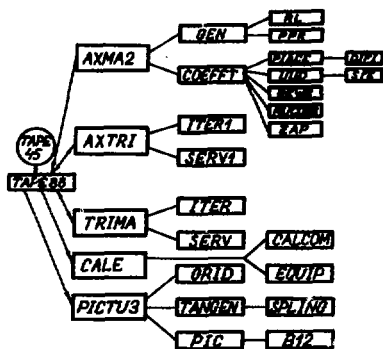


Рис.1. Блок-схема системы программ TRIMA.

Программа подготовки начальных данных (AXMA2)

Эта программа по исходным данным, порядок и формат задания которых описан в приложении, рассчитывает координаты узлов нерегулярной треугольной сетки (GEN) по алгоритму, предложенному в работе^{8/}, и подготавливает другие начальные данные, записывающиеся

на числовой файл с математическим номером 45.

Пример логической диаграммы и геометрии с нанесенной сеткой приведен на рис.2,3. Для упрощения процесса задания граничных значений логическая диаграмма всегда представляется в виде прямоугольника с зигзагообразными боковыми сторонами, на горизонтальных линиях располагается одинаковое количество узлов регулярной сетки. Координаты вершин треугольников логической диаграммы - всегда целые числа. Узлы сетки нумеруются по горизонтальным линиям слева направо и снизу вверх. Для взаимоднозначного отображения границ заданной геометрии /рис.3/ на границы логической диаграммы /рис.2/ ставятся в соответствие специфицируемые точки, соединенные между собой на рис.3 прямыми линиями, а на рис.2 - с помощью линий, тип и соответствующие индексы которых показаны на рис.4. Индекс означает тип

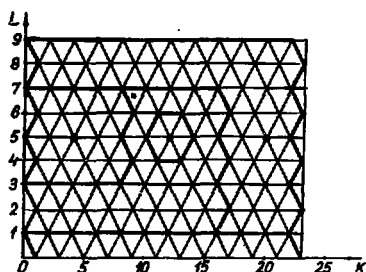


Рис.2. Логическая диаграмма области расчета.

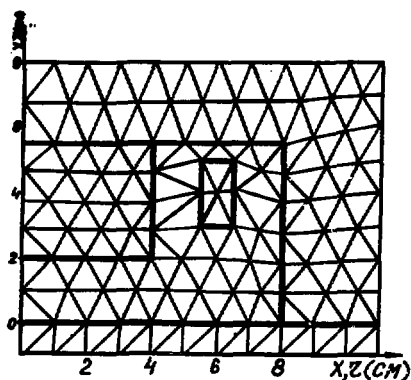
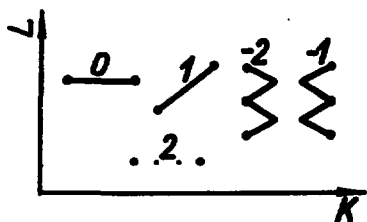


Рис.3. Пример геометрии области расчета.

Рис.4. Типы и индексы линий соединения точек.



связи текущей точки с последующей, причем индекс 2 означает, что две последовательные точки не связаны. В соответствии с заданной спецификацией вычисляются координаты всех граничных точек, количество их на каждом

отрезке, заданном специфицируемыми точками, определяется количеством узлов логической диаграммы между соответствующими точками, а распределение равномерно. Подпрограмма **СОЕФФТ** вычисляет постоянные коэффициенты для итерационной схемы и устанавливает заданные начальные и граничные условия. В программе предусмотрена возможность коррекции начальных и граничных распределений: γ - величины, обратной магнитной проницаемости ($\gamma = 1/\mu$), S - источника тока и U - потенциала в заданных точках M . Для этой цели служит подпрограмма **МUCОРР**. Коррекция начального распределения γ может понадобиться в следующих случаях:

а/ треугольник точки M , не относящийся к ферромагнетику, всеми тремя вершинами лежит на границе воздух - ферромагнетик. В этом случае нужно задать $MU1(M) = -1$ для верхнего треугольника, или $MU2(M) = -1$ для нижнего;

б/ для изменения величины γ в небольшой области, геометрия которой задана;

в/ для задания небольших областей с коэффициентом заполнения надо треугольникам, соединяющим заданные точки M , присвоить значения $MU1(M) = -\gamma$, $S(M) = -K$, где K - значение коэффициента заполнения. Токовые нити можно вводить в расчет в воздушных и ферромагнитных областях с коэффициентом заполнения $K = 1$. Для этого в точке M нужно задать значение $S(M) = I/j$, где I - требуемый ток в нити, j - его плотность в заданной области /см. п.17 приложения/.

Возможные варианты граничных условий показаны на рис.5. Для обычно используемых граничных условий /рис.5а/ на всех границах задается однородное условие Дирихле. В случае, если линия $y = 0$ есть ось симметрии ($NPROG \neq 0$), на этой границе задается однородное условие Неймана и она должна проходить по линии логической диаграммы $L = 1$. Для цилиндрической системы координат при $r \rightarrow 0$ скалярный потенциал вычисляется из условия $A(r, z) = rU(r, z) = a(z)r^2$, которое следует из того факта, что на оси $r = 0$ поле является четной функцией /8/.

Для расчета выделенных областей магнитной системы возможно задавать граничные условия в виде, показанном на рис.5б. В этом

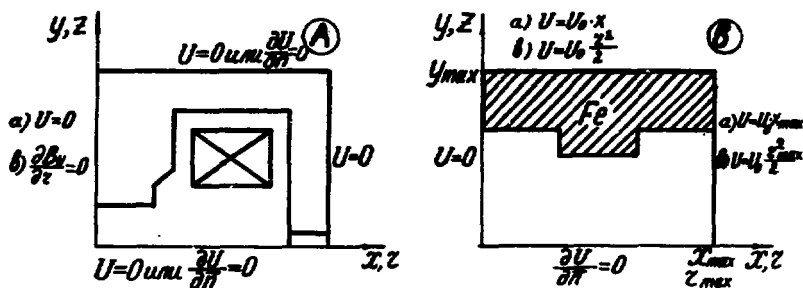


Рис.5. Возможные граничные условия.

случае в подпрограмме MUCORR задаем $RKY = r_{max}$ /или $RKY = X_{max}$ /, $UZERO = U_0$. Граничные условия также можно задавать, выделяя область из проведенных ранее расчетов, в этом случае задаются номера точек /п.14 приложения/, между которыми проводится линейная интерполяция скалярного потенциала по осям X или Y соответственно. Точки NP1, NP2, NP3, NP4 соединяются прямыми линиями, параллельными соответствующей оси, поэтому в первоначальной геометрии соединение между этими точками необходимо задавать требуемым образом.

Начальные условия могут быть нулевыми ($U=0, \gamma = AMU0$) или полученными с предварительно рассчитанного числового файла /см. п.15 приложения/.

Коэффициент заполнения ферромагнетиком в заданной области может быть постоянным или переменным, и вычисляется в подпрограмме функции ZAP(X,Y) /см. приложение/. Если коэффициент заполнения равен нулю, то эта область считается областью с постоянной магнитной проницаемостью, величина которой задается параметром AMI /см. п.11 приложения/.

Перед генерированием сетки печатается массив условных чисел. Нулями в этом массиве обозначены точки, координаты которых фиксируются начальными условиями /п.4 приложения/. После идентификации точек, относящихся к многоугольникам токов или ферромагнетиков, печатается массив условных чисел, в котором единица определяет внутренние точки многоугольника, нули - внешние точки, и минус единица - граничные точки. Заполнение всей области задачи единицами означает, что нет соответствия между начальными условиями /п.4 приложения/ и описанием многоугольников ферромагнетика /п.п. 7,13 приложения/ или тока /п.п. 8,9 приложения/.

Программа расчета конечно-разностных уравнений (АХМА2, TRIMA)

Алгоритм вычисления конечно-разностных уравнений описан в работах /4,9/. Используемая в программе зависимость магнитной проницаемости от индукции магнитного поля соответствует материалу СТ-3 и вычисляется по аналитическим формулам /10/.

Возможны четыре выхода из итерационного процесса:

1. По достижении заданной точности $E = \frac{\sum \Delta U^n}{\sum U^n} < 2 \cdot 10^{-6}$.
2. По достижении максимального количества итераций МГТЕВ
3. По управлению с пульта.
4. За 2,5 мин. до конца времени, заданного перфокартой

* TIME: ...

По окончании счета на числовой файл записывается полученное распределение U, y в узлах сетки, а также вычисляется поле по формуле $B_y = \partial U / \partial x$ на линии $L=1$ с помощью четырехточечной формулы Лагранжа.

Программа обработки результатов расчета (PICTU3)

В программу включены три подпрограммы, вызов их осуществляется перфокартой, в которой пробивается соответствующее название с первой позиции. Для отказа от работы подпрограммы нужно подложить перфокарту с любой другой информацией.

а/ Подпрограмма GRID печатает узлы сетки на цифропечатающем устройстве.

б/ Подпрограмма TANGEN вычисляет первую и вторую производные от скалярного потенциала с использованием SPLINE - алгоритма на линиях, определяемых входными параметрами. Шаг выдачи определяется как $[X(2) - X(1)]/4$, количество точек не более 300. В этих же точках вычисляется и печатается относительная величина поля $B(r)/B(0)$.

в/ Подпрограмма PIC заполняет и печатает массив условных чисел CN по следующим правилам:

для источников

$$S(I) < 0 \quad -CN(I) = -1,$$

$$S(I) = 0 \quad -CN(I) = 0,$$

$$S(I) > 0 \quad -CN(I) = 1,$$

для потенциалов

$$U(I) < 10^9 \quad -CN(I) = \text{порядок } U(I),$$

$$U(I) < -10^9 \quad -CN(I) = 10,$$

$$U(I) > 10^9 \quad -CN(I) = 11.$$

Для магнитной проницаемости печатается сначала массив верхних треугольников

$$MU.1(I) = -1 \quad -CN(I) = -1,$$

$1 < MU1(I) < 10^9$ - CN(I) = порядок μ .

$MU1(I) > 10^9$ - CN(I) = 10,

затем - для нижних треугольников (MU2(I)).

Задавая начальные параметры I1, I2, I3, I4, можно напечатать массивы координат узлов сетки X(I), Y(I); величины потенциала и источников в узлах сетки U(I), S(I), распределение магнитной проницаемости MU1(I), MU2(I) в области задачи и распределение магнитной индукции |B|.

Программа построения результатов расчета на CALCOMPe

Программа состоит из двух подпрограмм, вызов их осуществляется перфокартой, в которой с первой позиции пробито название подпрограммы:

а/. CALCOM - рисует на CALCOMPe сетку /пример построения на рис. 2/.

б/. EQUIP - строит точки на эквипотенциальных линиях.

Система программ TRIMA поставлена на ЭВМ БЭСМ-6, написана на языке ФОРТРАН и записана в виде библиотеки на личном диске №61.

В приложении показан пакет перфокарт, необходимый для вызова библиотечного файла TRIMLB. Для работы программы необходим числовой файл, который должен быть зарезервирован пользователем.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пакет перфокарт для вызова программы

```
*NAME ALENITSKIY
*TIME:
*PASS *****
*DISC:61- ALEN81, MASC3
*FILE:TRIMFO,43,R
*FILE:TRIMLB,42,R
*FILE: 45,W (ФАЙЛ ЧИСЛОВЫХ ДАННЫХ)
*PERSO:42
PROGRAMMA
CALL LOADGO(5HAXMA2)
CALL LOADGO(6HAXTRI1)
CALL LOADGO(6HPICTU3)
END
```

```

SUBROUTINE MUCORR
COMMON/UZERO/UZERO,RKY,ZKY
COMMON/CTG/AMU1(1600),AMU2(1600),A(1600),
*B(1600),S(1600),C(1600)/U/U(1600)
C   КОРРЕКЦИЯ ПОТЕНЦИАЛА, ИСТОЧНИКОВ, МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ
C   AMU1 - 1/M-ВЕРХНЕГО ТРЕУГОЛЬНИКА
C   AMU2 - 1/M-НИЖНЕГО ТРЕУГОЛЬНИКА
C   S - ИСТОЧНИКИ, U - ПОТЕНЦИАЛ
UZERO=0.8RKY=1.E+05ZKY=RKY
RETURN
END
FUNCTION ZAP(NPO,X,Y,M)
COMMON/CTG/AMU1(1600),AMU2(1600),A(1600),
*B(1600),S(1600),C(1600)
DIMENSION X(NPO),Y(NPO)
C   РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПОЛНЕНИЯ
C   NPO-КОЛИЧЕСТВО ТОЧЕК, X,Y-КООРДИНАТЫ,
C   M-НОМЕР ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ТОЧКИ
ZAP=0.5
RETURN
END
*EXECUTE
      ДАННЫЕ
*END FILE

```

Формат и порядок задания данных

В скобках указан формат информации на перфокартах. Параметры, величины которых указаны слева, можно не задавать, если нет необходимости изменять указанные значения.

1. /9A6/ - заголовок.

2. /30X, i5/ - порядковый номер конфигурации, записанный /или будет записан/ в числовом файле.

3. /2I3, 3F14.7/ AC, AK, OMX, OMY, E0.

AC - количество точек спецификации для построения сетки;

AK - индекс, характеризующий левую линию логической диаграммы сетки. Если индекс линии - 1 /см. рис.4/, то AK=1; если индекс левой линии -2, то AK=2.

1.375=OMX.

1.375=OMY - нулевое приближение фактора верхней релаксации по осям X и Y соответственно.

0.1=E0 - относительная точность первого приближения генерирования сетки.

4. / 2F14. 7, 3I3 / UC, VC, XC, YC, IN.

UC, VC - координаты точек на рис.3.

XC, YC - целочисленные координаты рис.2.

IN - индекс, характеризующий тип соединения данной точки со следующей /рис.4/. Всего таких AC перфокарт.

5. /2I3/ NPROG, NPR2

NPROG $\left\{ \begin{array}{l} =0 - \text{несимметричный магнит (} U|_{y=0} = 0) \\ \neq 0 - \text{симметричный магнит (} \partial U / \partial x|_{y=0} = 0) \end{array} \right.$

NPR2 $\left\{ \begin{array}{l} =0 \quad U|_{y=y_{\max}} = 0 \\ \neq 0 \quad \partial U / \partial x|_{y=y_{\max}} = 0 \end{array} \right.$

6. /4I3, F14.7/ AF, AP, AM, AX, AMUO. Количество точек, описывающих многоугольники железа, AF, положительного тока - AP, отрицательного тока - AM.

AX $\left\{ \begin{array}{l} =0 - \text{цилиндрическая система координат.} \\ \neq 0 - \text{декартова система координат.} \end{array} \right.$

0.002 = AMUO - начальное значение y .

7. /2 F14.7/ XF, YF - координаты узлов многоугольника, заполненного ферромагнетиком, AF перфокарт.

8. /2 F14.7, XP, YP - координаты узлов многоугольника положительного тока, AP перфокарт.

9. /2 F14.7/ XM, YM - координаты узлов многоугольника отрицательного тока, AM перфокарт.

10. /3I10/ IXS1, IXS2, IXS3 - номера точек, принадлежащих многоугольникам ферромагнетика положительного и отрицательного тока соответственно.

11. /2I10, 2 F14.7/ NFD, INDA, ZAPP, AMI.

NFD - количество областей ферромагнетика, координаты которых будут заданы ниже. Для области ферромагнетика, координаты которой заданы выше / K_3 - коэффициент заполнения /,

INDA $\left\{ \begin{array}{l} \neq 0 - K_3 < 1. \\ = 0 - K_3 = 1. \end{array} \right.$

При $0 < K_3 < 1$ ZAPP $\left\{ \begin{array}{l} = K_3 \\ = 0 - K_3 \end{array} \right.$ вычисляется подпрограммой-

функцией ZAP /см. пример/.

AMI - значение y для области с постоянным y /если ZAPP = 0 и ZAP = 0/.

12. /3I10, 2 F14.7/ IXS5, AF, INDA, ZAPP, AMI.

IXS5 - номер точки, принадлежащей области, координаты вершин которой будут заданы ниже.

AF - количество точек описания этой области.
INDA, ZAPP, AMI - аналогично предыдущему заданию.

13. /2 F14.7/ XF, YF - координаты узлов вершин многоугольника ферромагнетика, AF перфокарт.

* задание 12/, 13/ - повторяется NFD раз.

14. /5I10/ NP1, NP2, NP3, NP4, NOL.

С числового файла номер NOL, математический номер 46, формируются граничные условия.

Номера точек выделенной зоны: 0= NP1 - левая нижняя; NP2 - левая верхняя; NP3 - правая верхняя; NP4 - правая нижняя. Если NP1 = 0, граничные условия не изменяются.

15. /30X, 2I5/ NMN, NML.

NMN - номер конфигурации на числовом файле, с которой считываются начальные условия. NMN < NMAP. Если NMN = 0 - начальные условия не изменяются.

5= NML=6 - номер числового файла.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ИТЕРАЦИОННОЙ ПРОГРАММЫ (AXTRI, TRIMA):

16. /30X, I5/ NMAP - номер зоны на числовом файле 45.

17. / F20.10/ R - плотность тока в заданной токовой области.

18. /I8/ MITEE - максимальное число итераций.

Задание для программы обработки результатов (PICTU3):

19. /30X, I5/ NMAP - номер зоны на числовом файле.

20. /A6/ A. { = GRID - печать сетки на АЦПУ.
A { ≠ GRID - нет обращения к этой подпрограмме.

21. /A6, 4X, 4I10/ A, KOLIN, KOPOI, KDL, IKP.

A { = TANGEN - проводится обработка
A { ≠ TANGEN - нет обращения к этой программе.

1= KOLIN - количество линий сетки, по которым проводится обработка потенциала.

IX = KOPOI - количество точек на каждой линии для обработки.

1= KDL - шаг, показывающий, через сколько линий проводится обработка.

1= IKP - количество точек на левой стороне линии, которые не обрабатываются.

22. /A6, 4X, 4I10/ A, I1, I2, I3, I4.

A { = PIC - проводится обработка.
A { ≠ PIC - нет обращения к этой подпрограмме.

$-1 - I_1 \geq 0$ - печатать координаты узлов сетки.

$-1 - I_2 \geq 0$ - печатать потенциал и источники в каждой точке сетки.

$0 - I_3 \geq 0$ - печатать потенциал и источники в каждой точке сетки.

$0 - I_8 \geq 0$ - печатать распределение магнитной проницаемости в треугольниках сетки.

$0 - I_4 \geq 0$ - печатать распределение $|B|$ во всей области расчета.

При значении параметров меньше нуля не печатаются соответствующие массивы.

Задание для программы построения графиков (CALE)

23. /30 X, I 5/ NMAP - номер зоны на числовом файле.

24. (A6) A, $\left\{ \begin{array}{l} = \text{CALCOM} - \text{построение сетки.} \\ \neq \text{CALCOM} - \text{не вызывается.} \end{array} \right.$

25. (A6, 4X, I10) A, P

A $\left\{ \begin{array}{l} = \text{EQUIP} - \text{построение эквипотенциали.} \\ \neq \text{EQUIP} - \text{не вызывается.} \end{array} \right.$

P = $\left\{ \begin{array}{l} = P - \text{количество эквипотенциальных линий.} \\ = 0 - P=10. \end{array} \right.$

Ограничения в параметрах программы следующие:

1. Количество узлов в сетке для аксиально-симметричной геометрии (AXTRI) $AN \leq 1500$, для плоскостно-параллельной геометрии (TRIMA) $AN \leq 1600$, причем число горизонтальных линий сетки не более 44.

$$AN = (XC_{\max} + 1) * (YC_{\max} + 1) / 2.$$

2. Количество многоугольников железа не ограничено, токов - один положительный и один отрицательный. Имеется возможность задавать любое количество токовых нитей в воздушных областях.

3. Количество точек построения сетки $AC \leq 100$.

4. Количество точек описания многоугольника железа $AF \leq 100$, многоугольника тока $AP, AM \leq 40$.

Единицы измерения: размеры - [l], плотность тока [R] = $-A/l^2$, поле - [B] кГс.

Пример числовых данных /для конфигурации рис.2,3/

23	2			
0.0	0.0	0		
0.0	0.0	0		
0.0	5.2	0		
0.0	8.5	0		
II.0	8.0	22		
II.0	0.0	22		
II.0	-1.0	23		
0.0	-1.0	I		
0.0	0.0	0		
8.0	0.0	16		
II.0	0.0	22		
0.0	5.5	8		
4.0	5.5	8		
8.0	0.0	16		
4.0	5.5	6		
4.0	5.5	8		
0.0	2.0	0		
5.5	3.0	II		
6.5	0.0	II		
6.5	0.0	II		
5.5	3.0	II		
I	0			
8	5	0		
0.0	5.5	0		
0.0	8.0	0		
II.0	8.0	0		
II.0	0.0	0		
8.0	0.0	0		
8.0	5.5	0		
4.0	5.5	0		
0.0	5.5	0		
5.5	0.0	0		
5.5	0.0	0		
6.5	0.0	0		
5.5	3.0	0		
70		67		
I				
62		5		I
0.0		2.0		
0.0		5.5		
4.0		5.5		
4.0		0.0		
0.0		2.0		
0				
				I
				I

100.0
2000

I

GRID
TANGEN
PIC

I

CALCOM
EQUIP

ЛИТЕРАТУРА

1. Alenitckiy Ju.G. et al. Proceed. of Conf. on the Comput. of Magn. Fields, Oxford, March, 1976, p. 75-80.
2. Ворожцов С.Б. ОИЯИ, Р9-9216, Дубна, 1975.
3. Заплатин Н.Л., Морозов Н.А. ОИЯИ, Р9-12587, Дубна, 1979; ОИЯИ, Р9-81-476, Дубна, 1981.
4. Ворожцов С.Б. и др. ОИЯИ, Б1-11-12070, Дубна, 1978.
5. Борисовская З.В. и др. ОИЯИ, 9-81-304, Дубна, 1981.
6. Ворожцов С.Б. и др. ОИЯИ, Р9-5013, Дубна, 1970.
7. Akishin P.G. et al. JINR, E9-11859, Dubna, 1978.
8. Winslow A.M. Journ. of Comp. Phys., 1966, v.1, No.2, p. 149.
9. Diserens N.T. RMEL/R, 1969, p. 171.
10. Дерендяев Ю.С. и др. ОИЯИ, Р11-6579, Дубна, 1972.