

С 3450

22/6-72

Г-42

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

1701/2-72

9 - 6253



Х.У.Герш, С.И.Чеснова, А.А.Карлов,  
А.В.Кавченко

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

ПРОГРАММА РАСЧЕТА  
ИОНООПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
ПО ТЕОРИИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

1972

9 - 6253

Х.У.Герш, С.И.Чеснова, А.А.Карлов,  
А.В.Кавченко

ПРОГРАММА РАСЧЕТА  
ИОНООПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
ПО ТЕОРИИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

## Введение

Оптимизацию параметров ионооптических систем в настоящее время почти повсеместно проводят при помощи ЭВМ. На первом этапе расчеты всегда выполняются в линейном приближении. В ОИЯИ существует целый ряд программ для решения проблем, связанных с ионооптическими системами по теории первого порядка, например, "TRAMP" /1/ (библиотека БЭСМ-6), "Фокус" /2,3/. В ОНУ ЛЯП разработана программа линейной оптики *SYS1*, преимуществом которой является возможность пользоваться при счете дисплеем.

В большинстве случаев оказывается достаточным при оптимизации ограничиться линейным приближением, однако для расчетов прецизионных магнитных систем необходимо учитывать aberrации второго и третьего порядка малости /4/.

В связи с постановкой задачи оптимизации параметров анализирующей системы высокого разрешения была написана программа *SYS2*, с помощью которой можно считать все aberrации второго порядка магнитных фокусирующих систем. Программа написана на языке ФОРТРАН 63 для ЭВМ СДС-1604 А<sup>х/</sup>. Возможности программы следующие:

---

<sup>х/</sup> Имеется вариант программы для БЭСМ-6.

- 1) расчет матриц полного преобразования системы;
- 2) расчет огибающих при любых параметрах начального пучка;
- 3) нахождение параметров системы, обеспечивающих или фокус первого порядка, или кроссовер на конце системы;
- 4) нахождение распределения частиц на конце системы с учетом aberrаций второго порядка при постоянной плотности начального фазового объема;

5) использование дисплея со световым карандашом для решения различных задач оптимизации системы при непосредственной работе с ЭВМ и получение результатов на экране осциллографа.

Программа состоит из основной части - программы расчета системы транспортировки пучка, подпрограмм формирования изображения на дисплее и работы с ним, а также подпрограммы, учитывающей внутренние связи параметров системы (например, симметричные параметры или условия постановки элементов).

## 2. Основная программа

Блок-схема программы представлена на рис. 1. Центральная ее часть - программа для вычисления матриц полного преобразования элементов системы, таких как отклоняющие магниты, квадрупольные линзы и длины дрейфов. Полная матрица системы получается перемножением матриц отдельных элементов. Заполнение исходной матрицы определяется свойствами начального пучка. Задача нахождения фокуса или кроссовера на конце системы решается итерационным способом при изменении двух параметров системы. Число итерационных циклов ограничивается достижением нужной точности или заданным максимальным числом шагов MAX. При решении задач проводки пучка через известную систему итерационная часть программы не используется, MAX = 0. Ввод исходных данных, выведение результатов счета на печать, а также вызов подпрограммы концентрируется в отдельных частях программы. Существенную роль играет часть подготовки распределений магнитного поля и его первых двух производных в случае расчета краевых полей. Далее подробно обсуждаются отдельные части основной программы.

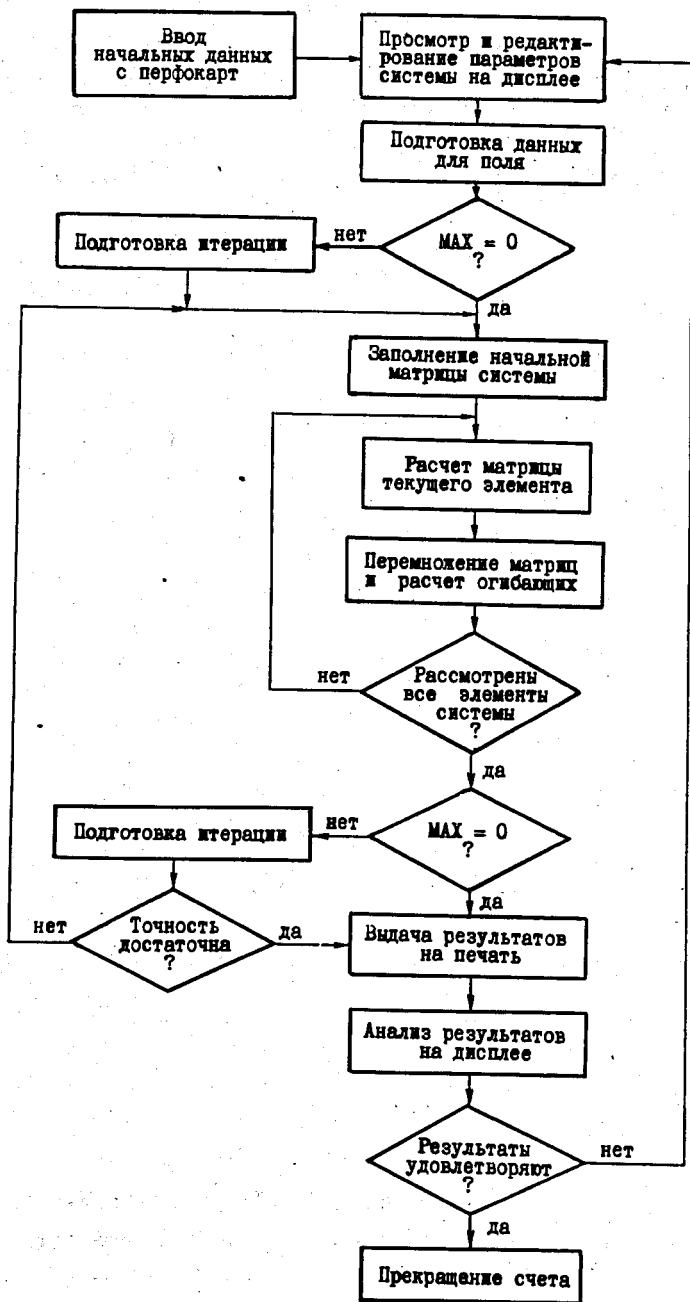


Рис. 1. Блок-схема программы.

## 2.1. Элементы иконооптической системы

При расчетах использовалась матричная теория, представленная в /5/. На рис. 2 изображена криволинейная система координат, которая вводилась в соответствии с этой работой. По теории второго порядка матрица элемента преобразует фазовые координаты частиц следующим образом:

$$\begin{array}{c}
 z \\
 z' \\
 x \\
 x' \\
 \delta \\
 z \\
 zx' \\
 z'x \\
 z^2 \\
 zz' \\
 z'^2 \\
 z^2 \\
 xx' \\
 x'^2
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 C_z & S_z & 0 & 0 & q_{z1} & q_{z2} & q_{z3} & q_{z4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 C'_z & S'_z & 0 & 0 & q'_{z1} & q'_{z2} & q'_{z3} & q'_{z4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & C_x & S_x & D & 0 & 0 & 0 & q_{x1} & q_{x2} & q_{x3} & q_{x4} & q_{x5} & q_{x6} \\
 0 & 0 & C'_x & S'_x & D' & 0 & 0 & 0 & q'_{x1} & q'_{x2} & q'_{x3} & q'_{x4} & q'_{x5} & q'_{x6} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix}
 \begin{array}{c}
 z_0 \\
 z'_0 \\
 x_0 \\
 x' \\
 \delta_0 \\
 z_0 x_0 \\
 z_0 x'_0 \\
 z'_0 x_0 \\
 z_0^2 \\
 z_0 z'_0 \\
 z_0'^2 \\
 x_0^2 \\
 x_0 x'_0 \\
 x_0'^2
 \end{array}$$

Здесь,  $z_0, x_0, z, x$  - начальные и конечные координаты частиц соответственно в вертикальном и горизонтальном направлениях,  $D, D'$  -

дисперсия и ее производная,  $z'_0, z', x'_0, x'$  - начальные и конечные фазовые углы частиц,  $\delta = \frac{\Delta p}{p}$  - относительное отклонение импульса от среднего,  $C, S, C', S'$  - элементы матрицы первого порядка и их производные,  $q_z, q_x, q'_z, q'_x$  - нелинейные абберационные коэффициенты, характеризующие эффекты аббераций второго порядка и их производные.

Элементами в системе являются отклоняющие магниты, квадрупольные линзы и длины дрейфа.

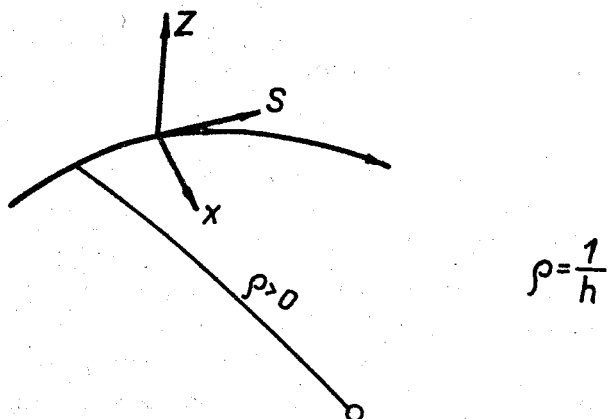


Рис. 2. Система координат, используемая в расчетах.

### 2.1.1. Отклоняющий магнит

Отклоняющий магнит в ионооптической системе характеризуется следующими параметрами:

$MA(N) = 1$  - индекс типа элемента ( $N$  - номер элемента);  $B(N)$  - длина главной траектории в постоянном вдоль координаты  $s$  поле  $x'$ ;

---

$x'$  Все длины в системе берутся в выбранных для данной задачи единицах, все углы в радианах.

$CH = h = \frac{1}{\rho}$  - величина, характеризующая магнитное поле ( $\rho$  - радиус главной траектории);  $CK = k = \frac{\partial h}{\partial x}$  - первая производная магнитного поля в радиальном направлении;  $CR = r = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$  - вторая производная магнитного поля по радиальной координате.

Перечисленные параметры полностью характеризуют элемент с постоянным вдоль координаты  $s$  полем. Элементы матрицы первого порядка в обеих плоскостях удовлетворяют следующим дифференциальным уравнениям:

$$\begin{aligned}
 C''_x + kC_x &= 0; & C''_x - \left(k - \frac{1}{\rho^2}\right)C_x &= 0; \\
 S''_x + kS_x &= 0; & S''_x - \left(k - \frac{1}{\rho^2}\right)S_x &= 0.
 \end{aligned} \tag{2}$$

при

$$C(0) = 1, \quad C'(0) = 0$$

$$S(0) = 0, \quad S'(0) = 1.$$

В программе используется аналитическое решение этих уравнений. В случае поля, изменяющегося вдоль координаты  $s$ , величины  $h$ ,  $k$ ,  $r$  являются функциями от пути  $s$ , и тогда матрицы первого порядка в программе находятся численным решением дифференциальных уравнений (2).

Члены матрицы второго порядка, т.е. нелинейные абберационные коэффициенты  $q_{xi}$  и  $q'_{xi}$ , а также их производные рассчитываются путем интегрирования следующих уравнений:

$$\begin{aligned}
 q_{xi} &= S_x \int_0^s C_x f_{xi} d\sigma - C_x \int_0^s S_x f_{xi} d\sigma \\
 q_{zi} &= S_z \int_0^s C_z f_{zi} d\sigma - C_z \int_0^s S_z f_{zi} d\sigma \\
 q'_{xi} &= S'_x \int_0^s C_x f_{xi} d\sigma - C'_x \int_0^s S_x f_{xi} d\sigma \\
 q'_{zi} &= S'_z \int_0^s C_z f_{zi} d\sigma - C'_z \int_0^s S_z f_{zi} d\sigma.
 \end{aligned} \tag{3}$$



Решение этих интегралов производится по методу Симпсона. Для этого в качестве исходных данных вводится число шагов интегрирования через параметр  $NE(N)$ , равное числу шагов при решении дифференциальных уравнений (2). Величины поля и его первой и второй производных на каждом шаге рассчитываются в начале программы (блок-подготовка данных для поля) и запоминаются в массиве  $FORM$  ( $NN$ ,  $NS$ ), где  $NS$  - номер шага (элемент начинается с  $NS = 2$ ), а  $NN$  характеризует размещение распределения поля и его первых двух производных в массиве. Для расчета элемента используются части массива, соответствующие или  $NN = 8, 10, 12$ , или  $NN = 9, 11, 13$  для распределения поля и его первых двух производных вдоль главной траектории, нормированных на начальную величину, если  $NE(N)$  положительно и на конечную величину, если  $NE(N)$  отрицательно.

### 2.1.2. Квадрупольная линза и длина дрейфа

Квадрупольная линза не дает aberrаций второго порядка, поэтому при расчетах используется матричная теория первого порядка. Квадрупольная линза характеризуется следующими параметрами:

$MA(N) = 3$  - индекс элемента,  $B(N)$  - длина линзы с постоянным вдоль осевой траектории полем;  $CK = k = \frac{e}{p_0} \frac{\partial H}{\partial x}$  - характеристика силы линзы,  $\frac{\partial H}{\partial x} = g$  - градиент магнитного поля,  $k [M^{-2}] = 3 \frac{g [KGS/CM]}{p_0 [ГЭВ/С]}$ .

Положительный знак означает фокусировку в вертикальном направлении.

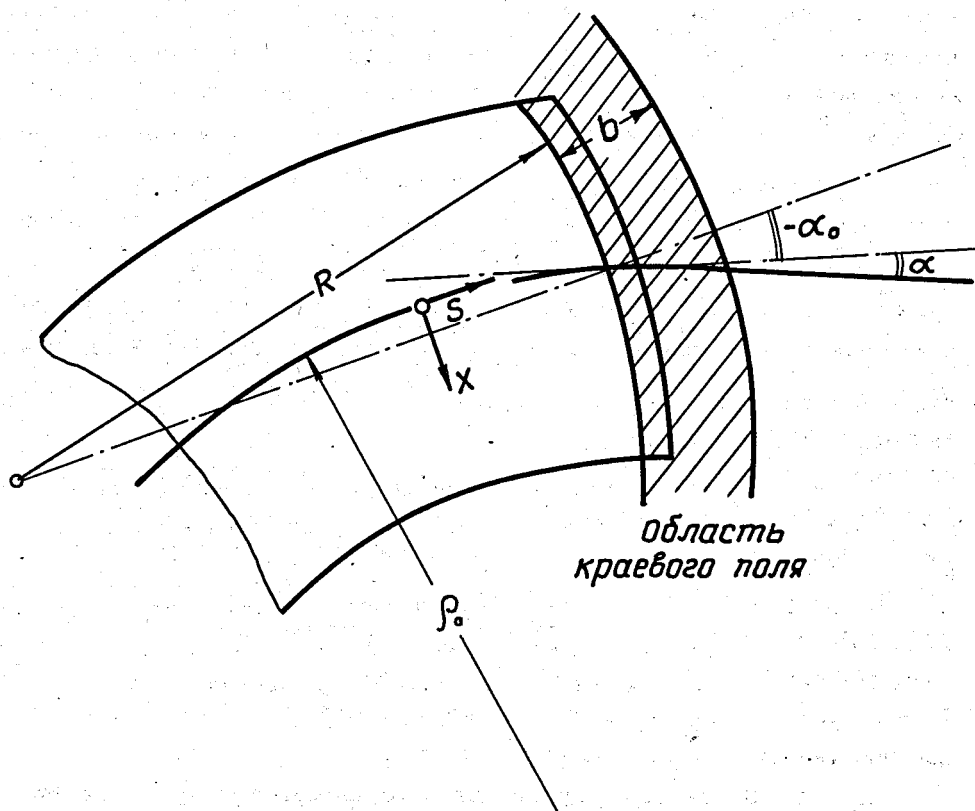
Для характеристики тонкой линзы или края магнита в расчетах первого порядка вводится параметр  $A(N)$  - сила линзы. Для тонкой линзы  $A(N) = \frac{1}{f}$ , где  $f$  - фокусное расстояние, для края магнита  $A(N) = tg \alpha_0$ , где  $\alpha_0$  - угол входа или выхода частиц (см. рис. 3).

Дрейф характеризуется только длиной  $B(N)$  между соседними элементами,  $NA(N) = 2$ .

## 2.2. Подготовка данных для магнитного поля

Для расчета магнитных элементов по теории второго порядка необходимо знать распределение краевого поля вдоль главной траектории, а также распределение его первой и второй производной по радиальной координате. Если такие распределения известны, они вводятся в программу массивом *FORM* (*NN*, *NS*), (где *NN* = 1, 2, 3) в любой последовательности. Кроме того в программе заложена возможность расчета главной траектории в краевом поле, магнитного поля вдоль главной траектории и его первой и второй производной по известному распределению краевого поля в плоскости, перпендикулярной краю магнита. При этом в память можно вводить сразу до трех различных распределений магнитного поля в виде числовых массивов, начиная с максимальной величины. Распределение краевого поля и его первые две производные в программе характеризуются условными числами *MH(N)*, *MK(N)*, *MR(N)*, означающими, из какой колонки двумерного массива *FORM* (*NN*, *NS*) берутся данные для последующих расчетов. Распределение данных в массиве *FORM* (*NN*, *NS*) осуществляется следующим образом: *NN* = 1, 2, 3 - часть массива, предназначенная для распределения краевого поля в плоскости, перпендикулярной краю магнита; *NN* = 8, 9 - рассчитанное распределение поля вдоль главной траектории; *NN* = 10, 11 - первая производная вдоль главной траектории; *NN* = 12, 13 - вторая производная вдоль главной траектории.

На рис. 3 показаны другие важные параметры краевого поля: *B(N)* - длина краевого поля; *ALFAO* - угол входа или выхода частиц в магните;  $XK = \frac{l}{R}$  - величина, характеризующая закругление края полюса магнита, *R* - радиус закругления; *CHIS* - параметр, определяющий длину переходной области между магнитом и краевым полем.



### 2.3. Итерационный процесс в программе

В программе *SYS2* заложена возможность решения задач согласования параметров системы и пучка при постановке специальных требований: определения фокуса или кроссовера на конце системы при любых свойствах начального пучка. Задача сводится к решению системы двух уравнений с двумя неизвестными итерационным методом. Для организации итерационного процесса необходимо ввести следующие параметры:

$LA$  ,  $LB$  - номера элементов, параметры  $CK$  которых варьируются при итерации;  $CK ( LA )$ ,  $CK ( LB )$  - начальные значения этих параметров;  $DELT$  - интервал изменения этих параметров при итерации;  $EPS$  - требуемая точность итерации;  $MAX$  - ограничение числа итерационных циклов;  $WUFOK$  - условное число, соответствующее разным задачам: преобразованию в фокус  $WUFOK = 0$  , а кроссовер  $WUFOK$  - любое число.

#### 2.4. Начальные параметры пучка. Результаты расчетов

Для расчетов параметров пучка в системе вводятся начальные данные:

$ROZ$  ,  $ROX$  - вертикальный и горизонтальный эмиттанс (площадь эллипса, деленная на  $\pi$  );  $ZA$  ,  $XA$  - начальный полуразмер пучка в вертикальном и горизонтальном направлении;  $ZAA$  ,  $XAA$  - максимальный угловой размер пучка.

Исходя из этих параметров , вычисляем расстояния до начального кроссовера пучка, в соответствии с которыми заполняется начальная матрица системы.

В программе есть возможность вычислять распределение частиц на конце системы с учетом aberrаций второго порядка. Для этого вводятся размеры плоскости, на которую проецируется пучок на конце системы  $ZAK$  - высота (ось  $Z$  ),  $XAK$  - ширина (ось  $X$  ).

На печать выводятся:

- 1) список начальных параметров элементов системы  $MA$  ,  $B$  ,  $CH$  ,  $MH$  ,  $CK$  ,  $MK$  ,  $CR$  ,  $MR$  ,  $NE$  ,  $A$  ;
- 2) массив  $FORM$  (  $NN$  ,  $NS$  );
- 3) информация о процессе итерации;
- 4) матрица системы;
- 5) координаты огибающей пучка после каждого элемента;
- 6) распределение частиц на плоскости  $ZAK$  ,  $XAK$  ;
- 7) распределение плотности частиц вдоль координаты  $X$  ;
- 8) при задании  $MAX=0$  на печать кроме (1-7) выводятся матрицы всех элементов, а при  $MAX=1$  - массив, связанный с подготовкой данных для расчета элемента.

### 3. Использование дисплея со световым карандашом

К ЭВМ СДС-1604 А, для которой написана рассматриваемая программа расчета ионооптических систем, в настоящее время подключен разработанный в ОИЯИ дисплей со световым карандашом /6/. Этот дисплей имеет развитое математическое обеспечение, что позволило в достаточно короткий срок разработать методику и написать дисплейные программы, необходимые для реализации режима оперативного взаимодействия человека с основной расчетной программой.

Начальные данные вводятся с перфокарт и выдаются на экран дисплея в виде списка переменных или таблиц массивов. Большое число исходных параметров не позволяет высвечивать их на экране все одновременно. Однако наличие световых клавиш, высвечиваемых внизу экрана, позволяет с помощью светового карандаша легко перейти к изображению требуемой группы параметров.

При указании световым карандашом на клавишу *DATA* на экране дисплея формируется изображение списка начальных параметров пучка, а также ряд переменных, определяющих начальные условия для итерационного процесса (рис. 4). Выбор клавиш *ELM*, *GRD* и *FLD* позволяет перейти к наблюдению содержимого массивов, описывающих конфигурацию и начальные характеристики системы транспортировки (рис. 5, 6а и 6б).

Чтобы изменить некоторый параметр, достаточно указать световым карандашом на его численное изображение на экране, в результате чего на пультовую пишущую машинку будет выдан запрос на ввод нового значения выбранного параметра. После завершения ввода (признаком завершения является нажатие клавиши "возврат каретки") старое значение параметра в памяти и на экране замещается новым значением. Переход к расчету осуществляется выбором световой клавиши *RUN*.

Расчет по основной программе продолжается около 1,5 минуты. Затем производится распечатка полученных результатов с целью сохранить возможность их последующего детального анализа, и на экране дисплея высвечиваются огибающие пучка в вертикальном и радиальном

ZAL	.0030	JKY..	-0	13
ZAR	.0038	IKY..	-0	2
XAL	.0001			
XAR	.0200	XKY..	-0	-0
ZAK	.0100	ALFRY	-0	-.2330
XAK	.0010	CHISY	-0	-0
MK	1.0000			
MKU	0			
DLT	.0500	CK(LA)	1.918	
EPS	.0010	CK(LB)	-.087	
STP	-0			
		LA.	3	
		LB.	7	
		MAX	7	

ELM	FLD	GRD	RUN	ENV
-----	-----	-----	-----	-----

Рис. 4. Список начальных параметров пучка.

	MA	MH	MK	MR	NE	MA	MH	MK	MR	NE
1	2	-0	-0	-0	-0	21	3	-0	1	-0
2	3	-0	1	-0	-20	22	3	-0	-0	-0
3	3	-0	-0	-0	1	23	3	-0	1	-0
4	3	-0	1	-0	20	24	2	-0	-0	-0
5	2	-0	-0	-0	-0	25	3	-0	1	-0
6	3	-0	1	-0	-20	26	3	-0	-0	-0
7	3	-0	-0	-0	1	27	3	-0	1	-0
8	3	-0	1	-0	20	28	2	-0	-0	-0
9	2	-0	-0	-0	-0					
10	1	8	10	12	-60					
11	1	-0	-0	-0	40					
12	1	-0	-0	-0	40					
13	1	8	10	12	60					
14	2	-0	-0	-0	-0					
15	2	-0	-0	-0	-0					
16	1	8	10	12	-60					
17	1	-0	-0	-0	40					
18	1	-0	-0	-0	40					
19	1	8	10	12	60					
20	2	-0	-0	-0	-0					

FLD	GRD	DAT	RUN
-----	-----	-----	-----

Рис. 5. Индексы и число шагов интегрирования для элементов начальной системы.

B	CH	B	CH
1 1.3000	-0	21 .3000	0
2 .3000	-0	22 .1500	0
3 .1500	-0	23 .3000	0
4 .3000	-0	24 .2000	0
5 .2000	-0	25 .3000	0
6 .3000	-0	26 .1500	0
7 .1500	-0	27 .3000	0
8 .3000	-0	28 1.3000	0
9 .1000	-0		
10 .2000	1.0000		
11 .7000	1.0000		
12 .7000	1.0000		
13 .2000	1.0000		
14 .9000	-0		
15 .9000	0		
16 .2000	-1.0000		
17 .7000	-1.0000		
18 .7000	-1.0000		
19 .2000	-1.0000		
20 .1000	0		

ELM GRD DAT RUN

a)

CR	CR	CR	CR
1 -0	-0	21 -.0875	0
2 1.9185	-0	22 -.0875	0
3 1.9185	-0	23 -.0875	0
4 1.9185	-0	24 -0	0
5 -0	-0	25 1.9185	0
6 -.0875	-0	26 1.9185	0
7 -.0875	-0	27 1.9185	0
8 -.0875	-0	28 -0	0
9 -0	-0		
10 .0010	-.3200		
11 .0010	-.3200		
12 .0010	-.3200		
13 .0010	-.3200		
14 -0	-0		
15 -0	0		
16 .0010	.3200		
17 .0010	.3200		
18 .0010	.3200		
19 .0010	.3200		
20 -0	0		

ELM FLD DAT RUN

b)

Рис. 6. Список начальных параметров системы: а) длины элементов и радиусы кривизны траекторий; б) параметры  $CR$  и  $CR$  элементов.

направлениях, а также ряд переменных, характеризующих фокусировку на конце системы (рис. 7). Выбор световой клавиши *IMG* позволяет посмотреть величины параметров системы и сделать вывод о корректности их выбора (рис. 8).

Если анализ полученных результатов показал, что следует провести новый расчет при других значениях исходных параметров, то через соответствующую световую клавишу можно перейти к высвечиванию той группы параметров, в которой необходимо выполнить редактирование. В процессе редактирования при необходимости можно вернуться к наблюдению результатов расчета с помощью световых клавиш *ENV* и *IMG*.

Таким образом, используя дисплей со световым карандашом, можно, во-первых, выполнять оперативный просмотр и редактирование исходных параметров, а во-вторых, наблюдать в удобной графической форме результаты расчета. Это в конечном итоге позволяет более эффективно по сравнению с обычной методикой использовать опыт и научную интуицию человека и уменьшить затраты машинного времени на получение окончательного результата.

#### Литература

1. Proceeding of International Conference on High Energy Accelerators, Brookhaven, Brookhaven National Laboratory, 1961, King N.M., p.422.
2. В.В. Миллер, Препринт ОИЯИ, 9-3582, Дубна, 1967.
3. В.В. Миллер. Препринт ОИЯИ, 5-3263, Дубна, 1967.
4. Howry S. et al. SLAC-DOC 12, Stanford, 1963.
5. К. Штеффен. "Оптика пучков высокой энергии", Москва, 1969.
6. А.И. Ефимова и др. Препринт ОИЯИ P10-5387, Дубна, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 января 1972 года.



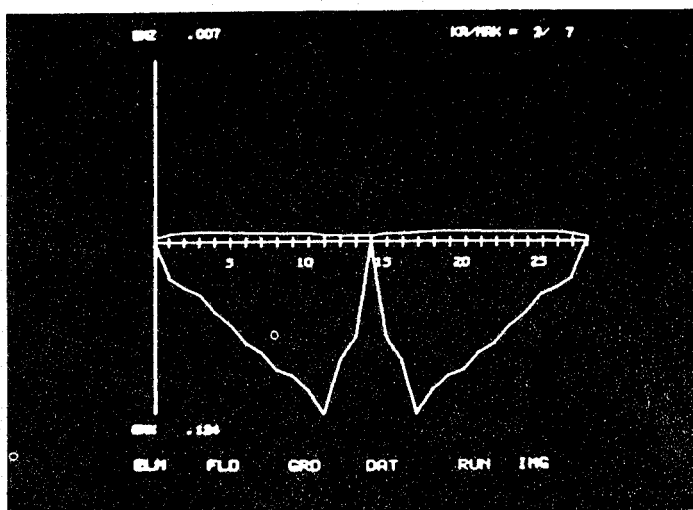


Рис. 7. Огибающие пучка.

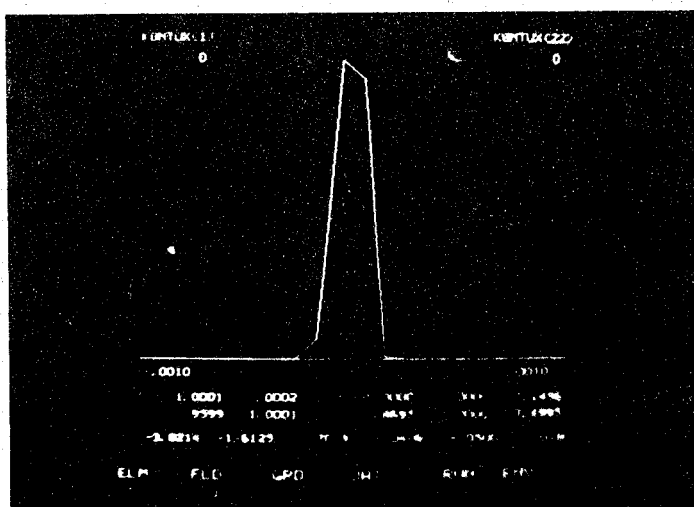


Рис. 8. Распределение плотности частиц на конце системы вдоль радиальной координаты.