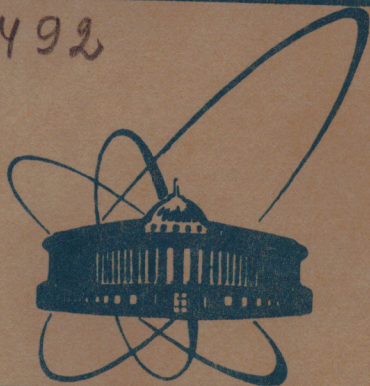


Д-492



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

5263 / 2-80

3/11-80  
9-80-495

Ю. Дитрих

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЫ

1980

Дитрих Ю.

9-80-495

Численное моделирование трехэлектродной ионно-оптической системы

Теоретически исследуется трехэлектродная ионно-оптическая система, используемая на стенде ионных источников Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Для вычисления траекторий частиц с учетом влияния пространственного заряда применялось квазигидродинамическое приближение. Расчеты выполнялись на ЭВМ CDC-6500 с использованием вычислительной программы ELENIS. Исследовалось влияние различных параметров трехэлектродной ионно-оптической системы на расходимость пучка. Показано, что наибольшее влияние на расходимость пучка оказывает геометрия первого электрода. Результаты расчетов качественно согласуются с результатами экспериментальных и теоретических работ, проведенных другими авторами.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1980

Dietrich J.

9-80-495

Calculation of the Design of Three-Electrode Ionoptical System

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема формирования интенсивных ионных пучков является актуальной во многих областях науки и техники, например, в ускорительной технике, в установках для разделения изотопов и других. Она заключается в нахождении оптимальных параметров ионно-оптической системы, позволяющих формировать интенсивные ионные пучки с минимальной расходимостью, без сферических aberrаций, с минимальными потерями пучка на электродах ионно-оптической системы. Решение этой проблемы является сложным ввиду наличия многих факторов /геометрии электродов, формы плазменного эмиттера, пространственного заряда и других/, влияющих на параметры пучка.

Чтобы найти оптимальную конфигурацию начальной оптики, можно провести расчеты траекторий ионов с помощью аналоговой или цифровой вычислительной машины. В данной работе исследуется теоретически трехэлектродная ионно-оптическая система, которая применяется на стенде ионных источников Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ<sup>1,2</sup>. Эта система может быть использована на четырехметровом изохронном циклотроне тяжелых ионов У-400. Такие ионно-оптические системы с числом электродов больше двух имеют много возможностей вариации при экстракции ионных пучков с высоким первенсом и низкой угловой расходимостью.

## 2. ОПИСАНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПУЧКА

Геометрия трехэлектродной ионно-оптической системы приведена на рис.1. Здесь  $d$  - толщина электродов;  $D$  - расстояние между электродами;  $R$  - радиус отверстия в электродах в аксиально-симметричном случае или полуширина щели в двумерном плоско-симметричном случае;  $V$  - потенциал электродов и  $\alpha$  - угол эмиссионной щели.

Первый электрод находится под потенциалом земли ( $V_1$ ), следующие электроды находятся под отрицательным потенциалом ( $V_2, V_3$ ).

Оптический аналог трехэлектродной ионно-оптической системы изображен на рис.2<sup>3/</sup>. В зависимости от потенциала электродов первая линза действует как рассеивающая и вторая линза - как собирающая, или наоборот. По сравнению с двухэлектродной ионно-оптической системой уже этот простой случай показывает, как

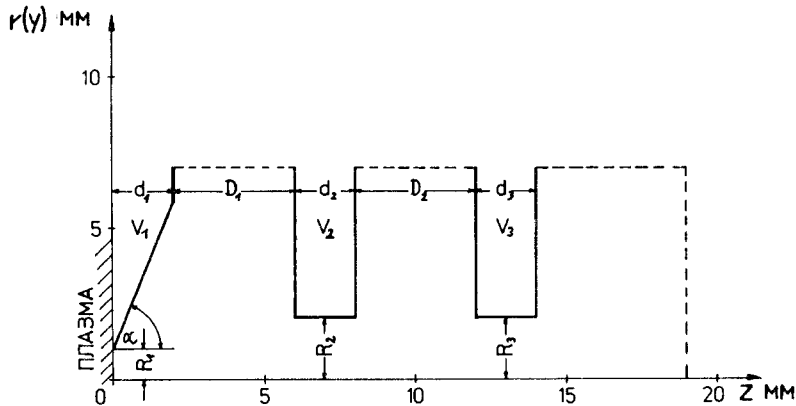


Рис.1. Геометрия трехэлектродной ионно-оптической системы:  $r, z$  - цилиндрические координаты,  $y, z$  - декартовы координаты.

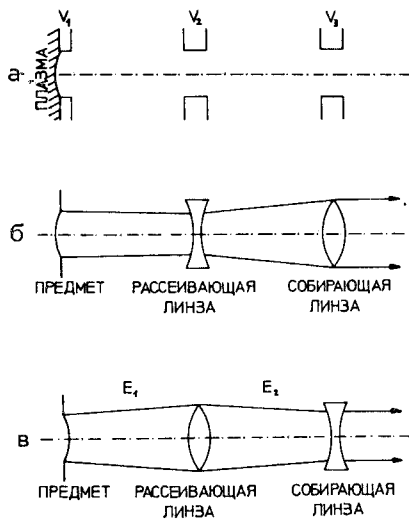


Рис.2. Оптический аналог трехэлектродной ионно-оптической системы: а/ геометрия электродов,  $V_1, V_2, V_3$  - потенциалы электродов; б/  $|V_2| > |V_3|, V_1 = 0$ ; ионы будут сначала ускоряться, а потом замедляться; в/  $|V_3| > |V_2|, V_1 = 0$ ; ионы будут ускоряться в две ступени. Когда напряженность электрического поля первой части системы  $E_1$  больше, чем напряженность электрического поля второй части системы  $E_2$ , получают представленные здесь действия линз.

при использовании добавочного электрода увеличивается возможность варьирования ионно-оптических параметров системы.

### 3. МЕТОД РАСЧЕТА

Для вычисления траекторий частиц с учетом влияния пространственного заряда используется так называемое квазигидродинамическое приближение<sup>4/</sup>. В этом случае поток заряженных частиц разбивается на некоторое конечное число трубок /в аксиально-симметричном случае/ или слоев /в двумерном плоско-симметричном случае/ для вычисления кулоновских поправок. Плотность ионного тока при этом в плоскости, перпендикулярной пучку, постоянна. Форма границы плазмы зависит от параметров плазмы, формы и потенциалов электродов.

Для упрощения расчета предположим, что поверхность эмиттера является плоской и его положение совпадает с эквипотенциальной плоскостью в непосредственной близости от первого электрода. Ионы эмиттируются в направлении, перпендикулярном плоскости эмиттера. Влияние тепловых скоростей ионов не учитывается.

Для расчетов ионных траекторий используется вычислительная программа ELENS<sup>5/</sup>. Она содержит подпрограмму EPDE1<sup>6/</sup>, с помощью которой можно решить уравнение Пуассона или уравнение Лапласа при заданном расположении электродов и значениях их потенциалов на основе метода конечных разностей и метода верхней релаксации.

Используя программу ELENS, решаем уравнения Лапласа и уравнение движения в аксиально-симметричном случае в виде квазигидродинамической модели потока с помощью метода Эйлера с уточнением

$$\frac{\partial^2 U(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 U(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 U(r, z)}{\partial z^2} = 0,$$

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{1 + (dr/dz)^2}{2U(r, z)} \left[ \frac{\partial U(r, z)}{\partial r} - \frac{dr}{dz} \frac{\partial U(r, z)}{\partial z} + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2Q}} \frac{I_0 r}{\rho^2 \sqrt{U(r, z)}} \right],$$

где  $m$  - масса частицы;  $Q$  - заряд;  $U(r, z)$  - потенциал электростатического поля;  $\epsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума;  $r, z$  - цилиндрическая система координат;  $I_0$  - ток пучка;  $\rho$  - радиус пучка.

В данной работе программа ELENS расширяется таким образом, что можно решить уравнение Лапласа и уравнение движения в двумерном случае:

$$\frac{\partial^2 U(y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U(y, z)}{\partial z^2} = 0,$$

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{1 + (dy/dz)^2}{2U(y, z)} \left[ \frac{\partial U(y, z)}{\partial y} - \frac{dy}{dz} \frac{\partial U(y, z)}{\partial z} + \frac{1}{2\epsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2Q}} \frac{I_0 y}{\rho \sqrt{U(y, z)}} \right],$$

где  $I_0$  - значение тока пучка, приходящееся на единицу его ширины,  $y, z$  - декартовы координаты.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Расчеты производятся для аксиально-симметричного случая и для двумерного случая. Область, в которой решается уравнение Лапласа, имеет радиальный размер 7 мм и аксиальный размер 19 мм. Шаг сетки при вычислении потенциала составляет 0,25 мм в двух направлениях системы координат. Шаг интегрирования уравнения движения составляет 0,1 мм.

Оценка качества пучка происходит следующим образом. Траектории частиц после прохождения трехэлектродной ионно-оптической системы составляют угол  $\Theta$  с оптической осью /рис.3/. Положительные углы соответствуют расходящемуся пучку, отрицательные углы - сходящемуся. Чтобы исследовать влияние различных факторов на расходимость пучка, вычисляются девять траекторий частиц. На основе полученных величин углов  $\Theta$  вычисляется среднее значение  $\bar{\Theta}$ , которое характеризует в нашем случае расходимость пучка. С помощью  $\bar{\Theta}$  можно оценить общее поведение пучка. Качество пучка будет тем лучше, чем меньше  $\bar{\Theta}$ .

Ниже представлены типичные параметры трехэлектродной ионно-оптической системы:  $V_1=0$  В,  $V_2=-35$  кВ,  $V_3=-30$  кВ,  $R_1=1$  мм,  $R_2=R_3=2$  мм,  $D_1=D_2=4$  мм,  $d_1=d_2=d_3=2$  мм,  $\alpha=67,5^\circ$  и  $I=100$  мА/см<sup>2</sup>. Отношение массы к заряду составляет  $A/Z=8$ . Исследовалась зависимость  $\bar{\Theta}$  от различных параметров ( $V, d, D, R$ )

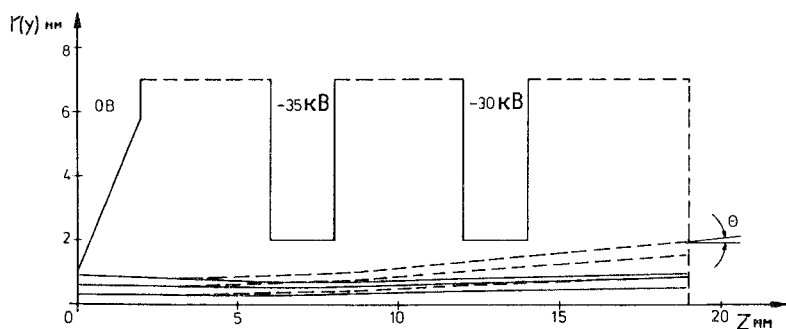


Рис.3. Траектории частиц в аксиально-симметричном (—) и двумерном плоско-симметричном (---) случаях при типичных параметрах.

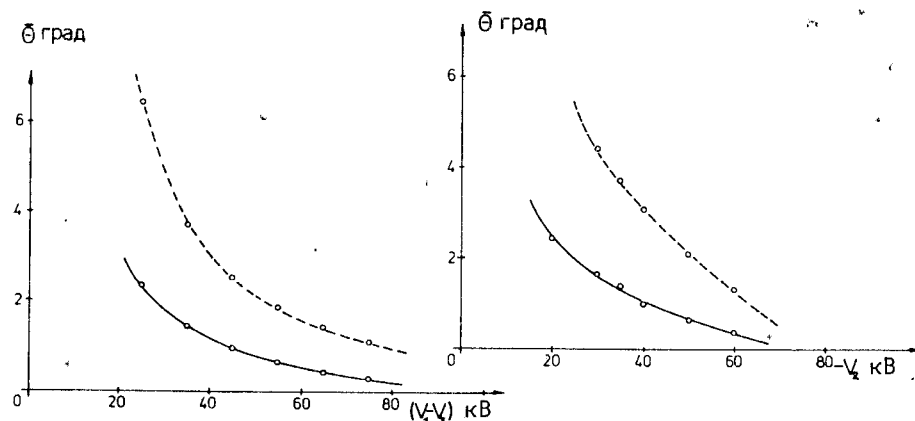


Рис.4. Зависимость расходимости пучка ( $\Theta$ ) от потенциала второго электрода:  $V_1=0$  В,  $V_2-V_3=-5$  кВ; — аксиально-симметричный случай; --- двумерный плоско-симметричный случай.

Рис.5. Зависимость расходимости пучка ( $\Theta$ ) от потенциала второго электрода:  $V_1=0$  В,  $V_3=-30$  кВ /постоянный/, — аксиально-симметричный случай, --- двумерный плоско-симметричный случай.

трехэлектродной ионно-оптической системы. При изменении одного из этих параметров остальные имеют фиксированные значения. Плотность тока на поверхности эмиттера меньше плотности тока, ограниченной пространственным зарядом, которая для плоского диода определяется значениями  $V_1, V_2, D_1$ .

На рис.3 приведены для сравнения траектории частиц в аксиально-симметричном и двумерном случаях. Расходимость пучка в аксиально-симметричном случае меньше, чем в двумерном случае. Из рис.4 видно, что расходимость пучка сильно уменьшается с увеличением отрицательного потенциала второго электрода ( $V_2$ ). При этом разность потенциала между вторым и третьим электродом ( $V_2-V_3$ ) постоянна. Таким же образом  $\bar{\Theta}$  зависит от  $V_2$  при постоянных потенциалах  $V_1, V_3$  /рис.5/.

Влияние величины радиусов отверстий электродов в аксиально-симметричном случае или полуширины щели в двумерном плоско-симметричном случае на расходимость пучка показано на рис.6. Расходимость пучка с увеличением  $R_2$  возрастает в двумерном случае сильнее, чем в аксиально-симметричном случае. При изменении  $R_3$  расходимость практически не меняется в обоих случаях.

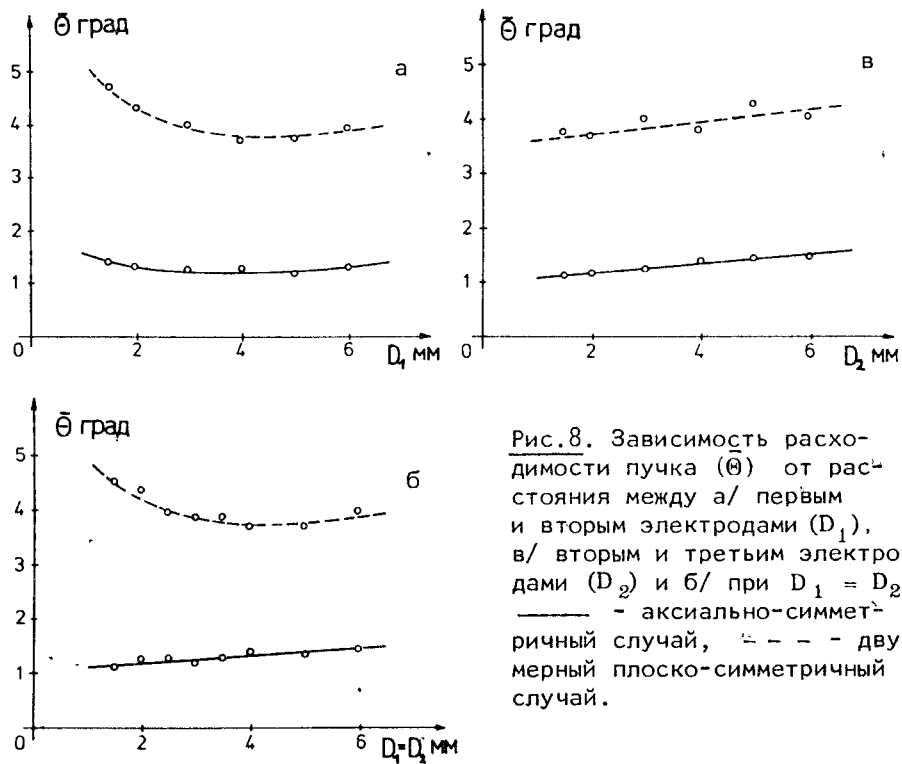


Рис.8. Зависимость расхо-  
димости пучка ( $\Theta$ ) от рас-  
стояния между а/ первым  
и вторым электродами ( $D_1$ ),  
в/ вторым и третьим электро-  
дами ( $D_2$ ) и б/ при  $D_1 = D_2$ :  
— аксиально-симмет-  
ричный случай, - - - - - дву-  
мерный плоско-симметричный  
случай.

Сравнение полученных результатов, определяющих зависимость ионно-оптических параметров пучка от потенциала электродов /рис.4,5/, от геометрии трехэлектродной системы /рис.6-8/ и от плотности тока пучка /рис.9,10/, с экспериментальными результатами исследования, полученными в работе /7/, показывает их хорошее качественное согласие несмотря на принятые упрощающие предположения относительно формы эмиттера частиц. Для более точных расчетов надо учитывать положение и форму границы плазмы, которые зависят от ряда параметров. Сравнение проведенных расчетов с результатами, которые получены в работе /8/ на основе решения уравнений Пуассона-Власова, показывает, что квазигидродинамическая модель потока заряженных частиц является пригодной для исследуемой задачи. Результаты расчета фазовых диаграмм качественно согласуются с результатами, полученными в работе /9/.

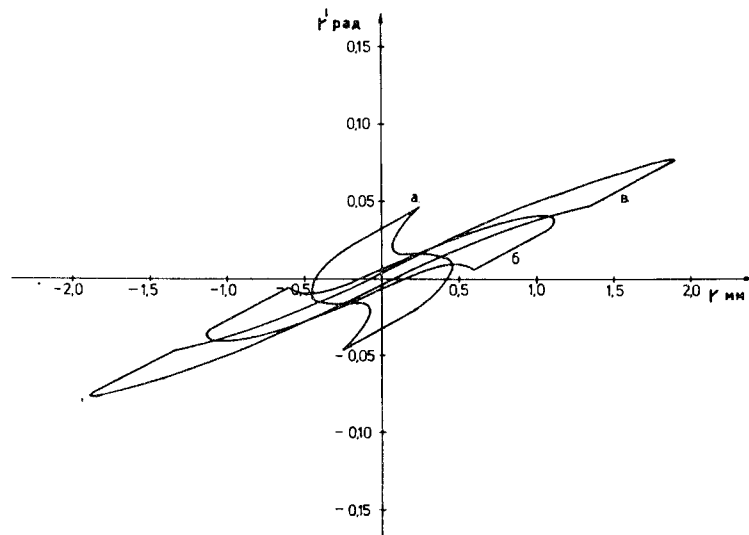


Рис.9. Зависимость фазовой диаграммы от плотности тока в аксиально-симметричном случае с вышеуказанными параметрами трехэлектродной ионно-оптической системы: а/ без пространственных зарядов,  $I = 0$ , б/  $I = 100 \text{ mA/cm}^2$ , в/  $I = 200 \text{ mA/cm}^2$ .

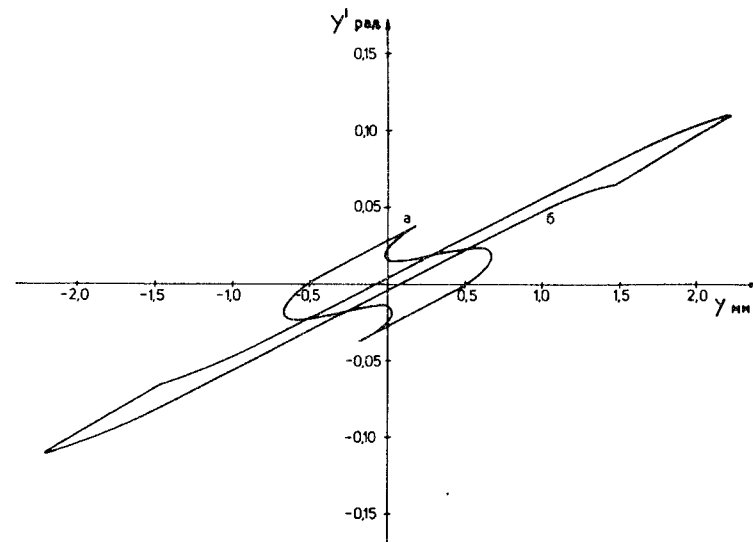


Рис.10. Зависимость фазовой диаграммы от плотности тока в двумерном плоско-симметричном случае с вышеуказанными параметрами трехэлектродной ионно-оптической системы: а/ без пространственных зарядов,  $I = 0$ , б/  $I = 100 \text{ mA/cm}^2$ .

$\rho$   
отн.ед.

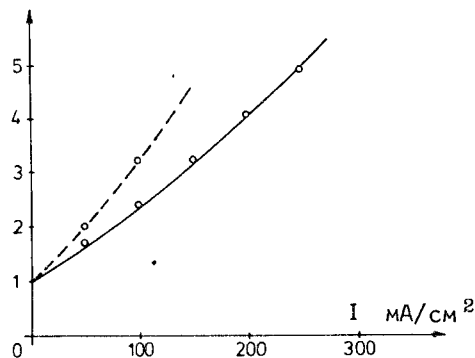


Рис.11. Зависимость величины радиуса или полуширины пучка ( $\rho$ ) от плотности тока в аксиально-симметричном случае (—) и в двумерном плоско-симметричном случае (---) после прохождения трехэлектродной ионно-оптической системы /  $z = 19$  мм/.

Принимая во внимание упрощающие предположения, можно резюмировать, что изготовление и юстировка первого электрода трехэлектродной ионно-оптической системы должны быть проведены с большой точностью. Расходимость пучка сильно зависит от геометрии первого электрода и от расстояния между первым и вторым электродами. Остальные параметры трехэлектродной ионно-оптической системы не оказывают существенного влияния на расходимость пучка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пасюк А.С. и др. ОИЯИ, 1522, Дубна, 1964.
2. Пасюк А.С. и др. АЭ, 1968, т.24, вып.1, с.21.
3. Green T.S. IEEE Trans. on Nucl.Sci., 1976, v.NS-23, No.3, pp.918-928.
4. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. "Энергия", Л., 1972.
5. Hornsby J.S. CERN, 6600 Computer, Program Library, 1965.
6. Hornsby J.S. CERN, 63-7, 1963.
7. Coupland J.R. et al. Rev.Sci.Inst., 1973, 44(9), pp.1258-1270.
8. Ohara Y. et al. Jap.J.Appl.Phys., 1976, v.15, No.1, pp.135-140.
9. Kim J. et al. J.Appl.Phys., 1978, 49(2), pp.517-524.

Рукопись поступила в издательский отдел.  
10 июля 1980 года.

## Нет ли пробелов в Вашей библиотеке?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д1,2-8405	Труды IV Международного симпозиума по физике высоких энергий в элементарных частиц. Варна, 1974.	2 р. 05 к.
Р1,2-8529	Труды Международной школы-семинара молодых ученых. Актуальные проблемы физики элементарных частиц. Сочи, 1974.	2 р. 60 к.
Д6-8846	XIV совещание по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1975.	1 р. 90 к.
Д13-9164	Международное совещание по методике проволочных камер. Дубна, 1975.	4 р. 20 к.
Д1,2-9224	IV Международный семинар по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1975.	3 р. 60 к.
Д-9920	Труды Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра. Дубна, 1976.	3 р. 50 к.
Д9-10500	Труды II Симпозиума по коллективным методам ускорения. Дубна, 1976.	2 р. 50 к.
Д2-10533	Труды X Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Баку, 1976.	3 р. 50 к.
Д13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
Д17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
Д6-11574	Сборник аннотаций XV совещания по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1978.	2 р. 50 к.
Д3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна 1978. /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна 1978.	5 р. 00 к.
Р18-12147	Труды III совещания по использованию ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач.	2 р. 20 к.

Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
P2-12462	Труды V Международного совещания по нелокальным теориям поля. Алушта, 1979.	2 р. 25 к.
Д-12831	Труды Международного симпозиума по фундаментальным проблемам теоретической и математической физики. Дубна, 1979.	4 р. 00 к.
Д-12965	Труды Международной школы молодых ученых по проблемам ускорителей заряженных частиц. Минск, 1979.	3 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1979.	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:

101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79.

издательский отдел Объединенного института ядерных исследований