

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 53.072; 53: 681.3

© А. В. Мележик, А. П. Щербаков

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ СЕПАРАТОРОВ. I. КОНФИГУРИРОВАНИЕ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

На основе специального выбора глобальной и совокупности локальных систем координат разработаны методика, алгоритм и программа конфигурирования ионно-оптической схемы газонаполненного сепаратора, состоящего из произвольного числа элементов: дипольных магнитов, квадрупольных линз, диафрагм и бесполых промежутков. Методика позволяет записывать уравнения траекторий ионов в различных элементах схемы в инвариантном виде.

ВВЕДЕНИЕ

Газонаполненные сепараторы широко используются в ядерной физике для исследования структуры продуктов деления тяжелых ядер и для выделения сверхтяжелых элементов в асимметричных реакциях синтеза при бомбардировке твердых мишеней быстрыми частицами — нейтроноизбыточными изотопами [1]. Последняя задача привлекает в настоящее время наибольшее внимание в связи с недавними удачными экспериментами по синтезу новых элементов с атомными номерами 114 и 116 и попытками синтеза последующих элементов, приближающимися к гипотетическому "острову стабильности" сверхтяжелых элементов [2]. Эти эксперименты проводятся сейчас в исследовательских центрах Дубны [3, 4], Berkeley [5], Jyväskylä (Finland) [6, 7], Osaka [8, 9], Darmstadt [10]. Газонаполненные сепараторы этих научных центров включают в себя: дипольный магнит (D) с однородным полем, осуществляющий сепарацию частиц, и ряд квадрупольных магнитных линз (Q), (чаще в виде дублета), фокусирующих пучок на детектор. Возможности такой схемы, как было отмечено в недавнем обзоре [1], представляются исчерпанными, и для развития исследований в этой области необходимы инструменты с улучшенными характеристиками.

Разработка новых сложных исследовательских систем, какими являются газонаполненные сепараторы, требует большого объема математического моделирования и исследований на базе оптики заряженных частиц с учетом взаимодействия с газовой средой. Последнее обстоятельство является весьма существенным, поскольку ионно-оптические характеристики газонаполненных сепараторов в очень большой степени определяются этим взаимодействием.

Разработанные к настоящему времени компьютерные модели газонаполненных сепараторов как у нас в стране [11], так и за рубежом [10, 12–14] привязаны к конкретным ионно-оптическим схемам и в основном ориентированы на калибровку сепараторов. Разработанные модели движения заряженных частиц не в полной мере учитывают физические процессы, в частности не учитываются многоэлектронные процессы обмена зарядом. До сих пор не было проведено систематического сравнения различных схем, не исследовались схемы, отличные от классической схемы DQQ и включающие в себя различные комбинации дипольных магнитов, в том числе с неоднородным полем, и квадрупольных линз.

Целью данной работы является разработка компьютерной модели газонаполненного сепаратора произвольной конфигурации, ионно-оптическая схема которого включает произвольное число дипольных магнитов и квадрупольных линз, разделенных бесполыми промежутками и расположенных в произвольном порядке. В качестве основного метода решения задачи исследования ионно-оптических характеристик принят траекторный анализ, основанный на методе статистического моделирования, позволяющий в полной мере учитывать физические, технологические и конструктивные параметры моделируемой установки. Основное внимание в этой работе уделено методам конфигурирования ионно-оптической схемы.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГАЗОНАПОЛНЕННОГО СЕПАРАТОРА

Принцип работы газонаполненного сепаратора описан в ряде работ (см., например, [5, 10–12, 15]). Диспергирующим элементом сепаратора является

дипольный магнит. Ион массы m , имеющий заряд q и скорость v , в магнитном поле индукции B в вакууме движется по траектории, определяемой силой Лоренца

$$\mathbf{F} = q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]. \quad (1)$$

Магнитная жесткость иона

$$B\rho = \frac{mv}{q}, \quad (2)$$

где ρ — радиус кривизны траектории (предполагается $\mathbf{B} \perp \mathbf{v}$), определяет траекторию его движения в однородном поле дипольного магнита. Ионы данной массы с различной магнитной жесткостью движутся по различным траекториям. Их распределение в фокальной плоскости сильно зависит от начальных распределений по скоростям и зарядам.

Если область магнитного поля заполнена газом, траектория движения иона наряду с магнитным полем определяется также столкновениями с молекулами газа. При столкновениях изменяется скорость иона (как по величине, так и по направлению) и его заряд. Если число столкновений достаточно велико, траектории ионов концентрируются вблизи траектории, соответствующей значению магнитной жесткости, определяемой средней величиной $(v/\bar{q})$, где $\bar{q}$ — средний равновесный заряд иона, устанавливающийся в результате большого числа взаимодействий с молекулами среды с передачей одного или нескольких электронов.

Если принять приближение Бора для среднего заряда

$$\bar{q} = \frac{v}{v_0} Z^{1/3}, \quad (3)$$

где Z — атомный номер иона, $v_0 = e^2 / \hbar = 2.19 \cdot 10^8$ см/с — боровская скорость, то для магнитной жесткости получаем

$$B\rho = \frac{mv_0}{Z^{1/3}} = 0.02267 \frac{A}{Z^{1/3}} (\text{Т} \cdot \text{м}), \quad (4)$$

где A — масса иона в атомных единицах m_0 ($m = Am_0$).

В этом приближении радиус кривизны траектории иона в магнитном поле зависит только от его массы и атомного номера (заряда ядра) и не зависит от ионного заряда и скорости. На этом основан принцип действия газонаполненного сепаратора: все ионы данной массы независимо от их начального заряда и скорости будут собраны в ограниченной области фокальной плоскости.

Размеры фокального пятна определяются главным образом характером флуктуаций ионного заряда, угловым рассеянием из-за многократных столкновений с молекулами газа и размерами области источника ионов (области зарождения продуктов ядерных реакций). Определенный вклад вносит разброс ионов по скоростям и скоростная зависимость среднего заряда, в принципе отличная от боровской (3). Перечисленные выше составляющие вклада в размеры фокального пятна неустраняемы в силу самого принципа действия газонаполненного сепаратора, их вклад значительно выше вклада ионно-оптических aberrаций. Поэтому газонаполненные сепараторы отличаются невысокой разрешающей способностью по массам и уступают по этому параметру вакуумным сепараторам. Однако независимость их аксептанса от начального ионного заряда и скорости крайне важна при выделении продуктов ядерных реакций, имеющих очень широкие распределения по скоростям и ионным зарядам. Газонаполненные сепараторы остаются незаменимыми в тех задачах, где требуется высокое пропускание и где их основной недостаток — невысокая разрешающая способность — не играет большой роли [1].

ПОСТРОЕНИЕ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СЕПАРАТОРА

В газонаполненных сепараторах используются только элементы с магнитным полем: дипольные (D) и квадрупольные (Q) магниты. Любую схему сепаратора можно представить в виде определенной комбинации этих двух элементов, разделенных бесполевыми промежутками и диафрагмами. Таким образом, основными блоками, позволяющими построить ионно-оптическую схему (ИОС) произвольного сепаратора, являются:

α — дипольный магнит D;

β — квадрупольный магнит Q_h или Q_v (индексы h или v показывают соответственно фокусировку в горизонтальной или вертикальной плоскости);

γ — бесполовый промежуток или бесполовый канал (диафрагма).

Дипольный магнит описывается следующими ионно-оптическими и геометрическими параметрами:

а) углом поворота и радиусом центральной траектории φ и ρ ; при этом условимся, что $\varphi > 0$, $\rho > 0$, если поворот происходит по часовой стрелке, в противном случае $\varphi < 0$, $\rho < 0$. При таком выборе знаков длина центральной траектории в магнитном поле $S_D = \rho\varphi$ положительна.

б) углами наклона входной и выходной границ

магнитного поля ε' и ε'' ; положительные значения этих углов отвечают фокусировке в вертикальной плоскости.

в) углом λ полураствора полюсных наконечников конусных полюсов магнита.

г) величиной G полузазора полюсных наконечников магнита.

Квадрупольный магнит описывается длиной центральной траектории в магнитном поле S_Q , радиусом апертуры r_a и значением индукции магнитного поля B вблизи полюсов.

Бесполевой промежуток и бесполевой канал (диафрагма) описываются их геометрическими размерами: длиной и размерами поперечного сечения.

Каркасом, на котором строится схема сепаратора, является центральная (осевая) траектория, состоящая для рассматриваемых нами элементов из отрезков прямых (для элементов типа β или γ) и дуг окружности (для элементов типа α). Для ее описания вводится глобальная система координат (ГСК) XYZ . Будем считать, что плоскость XY — плоскость дисперсии (плоскость симметрии дипольных магнитов), или горизонтальная плоскость, XZ — вертикальная плоскость (рис. 1). Каждому из элементов соотнесем свою двумерную локальную систему координат (ЛСК) $x^i y^i$ в плоскости XY , где i — порядковый номер элемента

в схеме (рис. 1). Начало координат O^i локальной системы координат i -го элемента поместим в точку входа центральной траектории в этот элемент, а ось $O^i x^i$ направим вдоль центральной траектории. Локальная система координат полностью определяется глобальными координатами ее начала $X_{O_i} Y_{O_i}$ и углом Ψ_i между осью $O^i x^i$ и осью OX , который назовем углом ориентации ЛСК. Будем считать $\Psi_i > 0$, если поворот от оси OX к оси $O^i x^i$ осуществляется по часовой стрелке, и $\Psi_i < 0$, если — против.

Для элемента с поворотом центральной траектории (типа α) при $\rho_i < 0$ осуществляем дополнительно отражение относительно оси $O^i x^i$, так что ось $O^i y^i$ будет направлена вдоль радиуса центральной траектории в точке входа по направлению от центра кривизны. Такое преобразование обеспечит нам инвариантность выражений для траекторий движения иона в ЛСК как при $\rho_i > 0$, так и при $\rho_i < 0$.

Координаты начала ЛСК $(i+1)$ -го элемента в глобальной системе координат и угол поворота Ψ_i полностью определяются рекуррентными соотношениями.

Если i -й элемент — элемент с прямолинейной центральной траекторией (элемент типа β или γ), то для глобальных координат начала ЛСК $(i+1)$ -го элемента имеем (см. рис. 2)

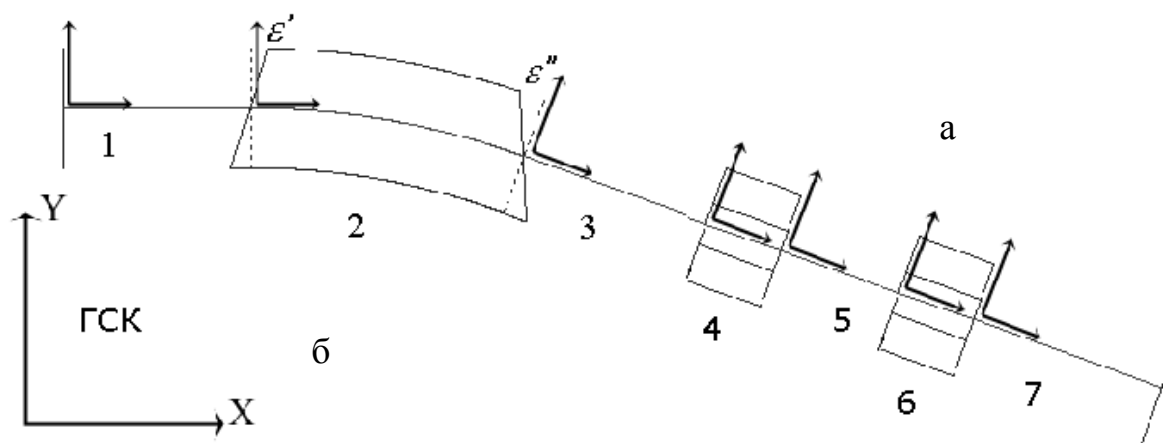


Рис. 1. Сепаратор из семи элементов.

а — совокупность локальных систем координат (ЛСК);

б — глобальная система координат (ГСК)

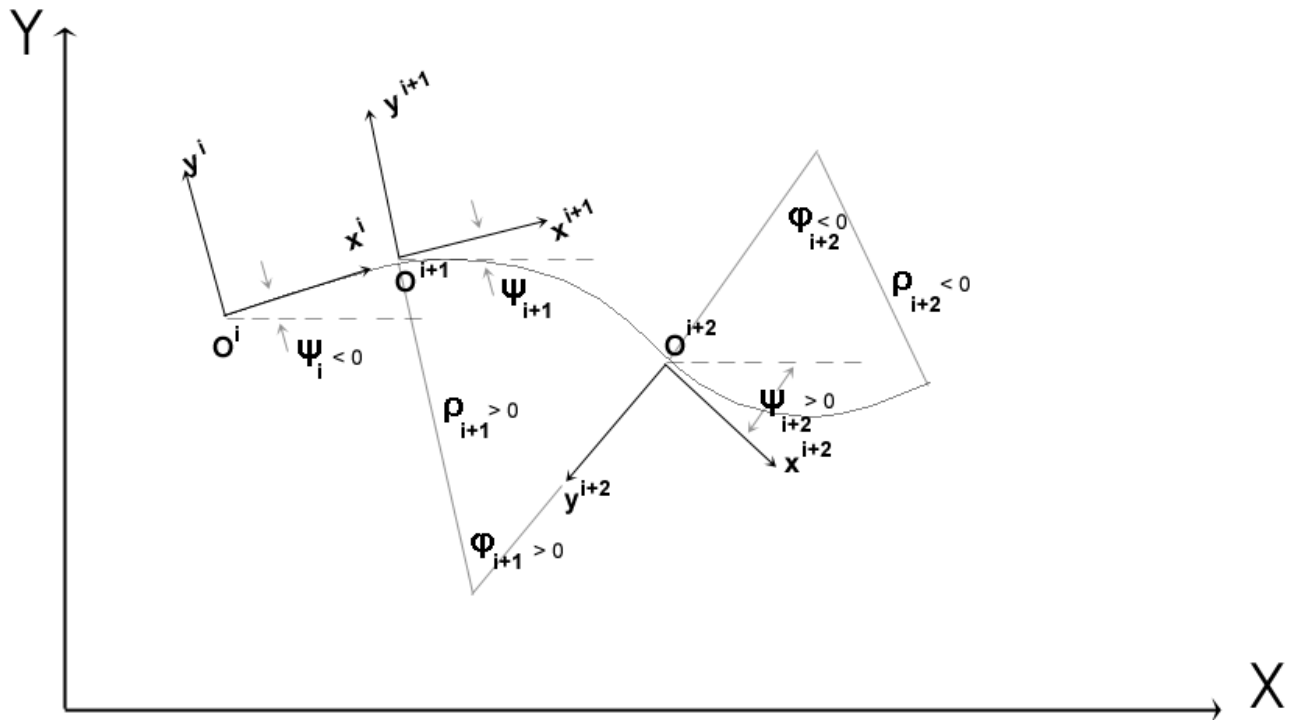


Рис. 2. Локальные системы координат для трех последовательных элементов схемы: с прямолинейной осевой траекторией (i -й элемент), с поворотом центральной траектории по часовой стрелке ($(i+1)$ -й элемент), с поворотом центральной траектории против часовой стрелки ($(i+2)$ -й элемент)

$$\begin{cases} X_{O_{i+1}} = X_{O_i} + S_i \cos \Psi_i, \\ Y_{O_{i+1}} = Y_{O_i} - S_i \sin \Psi_i, \\ \Psi_{i+1} = \Psi_i, \end{cases} \quad (5)$$

где S_i — длина центральной траектории в i -м элементе.

Если i -й элемент — элемент типа α с поворотом центральной траектории, то

$$\begin{cases} X_{O_{i+1}} = X_{O_i} + \rho_i (\sin \Psi_{i+1} - \sin \Psi_i), \\ Y_{O_{i+1}} = Y_{O_i} + \rho_i (\cos \Psi_{i+1} - \cos \Psi_i), \\ \Psi_{i+1} = \Psi_i + \varphi_i. \end{cases} \quad (6)$$

Единообразие соотношений (6) обеспечивается указанным выше выбором знаков параметров φ и ρ .

Конфигурация системы сепаратора — число, последовательность и тип элементов схемы и их параметры — однозначно определяет множество локальных систем координат: координаты начала ЛСК и их ориентацию.

Если известны координаты точки траектории

(x, y, z) в локальной системе координат i -го элемента, то ее координаты в глобальной системе определяются с учетом поворота вокруг оси $O^i z^i$ на угол Ψ_i и параллельного переноса начала координат:

$$\begin{cases} X = X_{O_i} + x \cos \Psi_i + y \sin \Psi_i, \\ Y = Y_{O_i} - x \sin \Psi_i + y \cos \Psi_i, \\ Z = z. \end{cases} \quad (7)$$

Для элементов типа α (с поворотом центральной траектории) при $\rho_i < 0$ сначала проводим отражение относительно оси $O^i x^i$: $y \rightarrow -y$, а затем определяем глобальные координаты по формулам (7).

Тем самым мы описали траекторию иона как в локальной, так и в глобальной системе координат, связанной с установкой в целом. При этом локальные системы координат обеспечивают нам возможность записывать уравнения траекторий в инвариантном виде.

Начальными значениями для уравнений траектории в $(i+1)$ -м элементе являются координаты конечных точек траекторий в i -м элементе, пере-

считанные в ЛСК $(i+1)$ -го элемента, в том числе с учетом отражения, если $(i+1)$ -й элемент типа α с $\rho_{i+1} < 0$.

Введение локальных систем координат для каждого элемента схемы позволяет достаточно просто проверять геометрические условия прохождения с учетом величины межполюсного зазора дипольных магнитов, радиуса апертуры квадрупольных линз и размеров диафрагм.

Таким образом, произвольная конфигурация сепаратора может быть описана в глобальной системе координат с помощью совокупности ЛСК в плоскости $Z = 0$, связанных с ней преобразованиями параллельного переноса, поворота и отражения относительно оси.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ

Для описания траекторий используется стандартная техника статистического моделирования. В ее основу положена микроскопическая модель движения ионов в газовой среде [16], учитывающая процессы обмена электронами иона с молекулами газа, рассеяние ионов на малые углы в результате многократных столкновений и потери энергии. В качестве промежутка дискретизации траектории принимается случайная величина — длина свободного пробега l между двумя последовательными столкновениями с изменением заряда иона. Длина свободного пробега генерируется в соответствии с соотношением

$$l = -\bar{\lambda} \ln R, \quad (8)$$

где R — равномерно распределенное на промежутке $[0, 1)$ случайное число. Средняя длина свободного пробега $\bar{\lambda}$ определяется полным сечением σ_{tot} процесса изменения заряда и концентрацией n молекул газа

$$\bar{\lambda} = 1/(n\sigma_{\text{tot}}). \quad (9)$$

В каждой точке столкновения производится изменение заряда иона в соответствии с вероятностями захвата $\sigma_c/\sigma_{\text{tot}}$ и потери электрона $\sigma_1/\sigma_{\text{tot}}$. В этих формулах σ_c и σ_1 — сечения захвата и потери электрона соответственно, $\sigma_c + \sigma_1 = \sigma_{\text{tot}}$.

В этой же точке производится пересчет направления движения и энергии частицы. В соответствии с принятой моделью угол отклонения траектории иона разыгрывается по нормальному закону

$$p(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\theta} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_\theta^2}\right). \quad (10)$$

Стандартное отклонение распределения σ_θ пропорционально длине l отрезка траектории, пройденной ионом до столкновения, и концентрации молекул газа n . Его численное значение определяется на основе формализма Мейера [17], Зигмунда [18].

Энергия частицы уменьшается на величину

$$\Delta E = sl, \quad (11)$$

где $s = -dE/dx$ — коэффициент торможения, значения для которого берутся из таблиц [19]. Скоростная зависимость коэффициента торможения определяется в соответствии с формулой Линдхарда—Шарфа [20], если скорость иона сравнима со скоростями атомных электронов, но не слишком велика ($v < Z^{2/3}v_0$, Z — атомный номер иона),

$$s = C_{LS}n\frac{v}{v_0}, \quad (12)$$

или в соответствии с формулой Бете—Блоха [21] для больших значений скорости

$$s = C_{BB}n\frac{v_0^2}{v^2} \ln(2mv^2/I), \quad (13)$$

где I — средний потенциал возбуждения атомов среды. Коэффициенты C_{LS} и C_{BB} определяются атомными номерами иона и атомов среды [21].

На длине свободного пробега l ион движется по траектории, определяемой только внешним магнитным полем. Выражения для этих траекторий могут быть взяты в параксиальном приближении, поскольку вклад ионно-оптических аберраций в размеры фокального пятна значительно меньше вклада, обусловленного взаимодействием с молекулами среды.

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

Общая схема моделирования представлена на рис. 3.

Ионно-оптическая схема сепаратора представляется в программе в терминах блоков. Каждый блок — это элемент схемы со своими параметрами и соответствующая ему процедура расчета. Например, для элемента схемы "магнитный диполь" будем иметь:

- блок — дипольный магнит;
- расчетная процедура — dmgnGFS;
- параметры: углы наклона входной и выходной границ; длина и радиус центральной траектории в элементе; угол полураствора и величина полузазора полюсных наконечников конусных полюсов магнита.

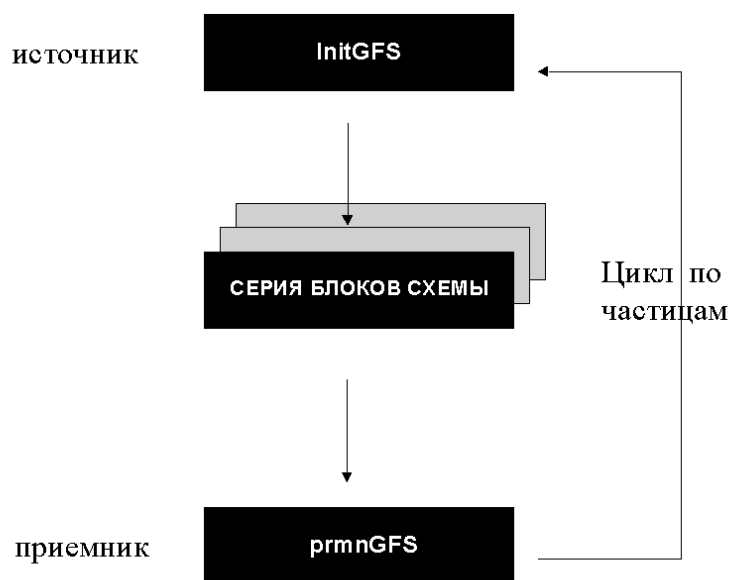


Рис. 3. Общая схема программы

Перечень типовых элементов и соответствующих расчетных процедур программы

Типовой элемент	Расчетная процедура
Бесполевой промежуток	poletGFS
Бесполевой канал (диафрагма)	trandGFS
Вход в дипольный магнит	entmGFS
Дипольный магнит	dmgnGFS
Выход из дипольного магнита	eximGFS
Квадрупольный магнит	qmgnGFS
Приемник	prmнGFS

Перечень типовых элементов (блоков) и соответствующих им расчетных процедур приведен в таблице. Любая ионно-оптическая схема может быть задана последовательностью таких блоков. Расчетные процедуры блоков "Бесполевой промежуток", "Бесполевой канал", "Вход в дипольный магнит", "Выход из дипольного магнита", "Приемник" моделируют движение ионов в бесполе в пространстве элементов схемы различной геомет-

рической конфигурации. Блоки "Вход в дипольный магнит" и "Выход из дипольного магнита" выделены в отдельные группы для удобства моделирования схем с косыми углами входной и выходной границ магнитного поля дипольного магнита. Расчетные процедуры блоков "Дипольный магнит" и "Квадрупольный магнит" моделируют движение ионов в однородном и квадрупольном магнитных полях соответственно.

Все начальные параметры программы хранятся в текстовом файле, который считывается при каждом запуске программы. В текстовом файле хранятся несколько групп данных, каждая из которых отвечает за определенную часть работы программы. Среди этих групп:

- 1) параметры окон (при запуске программы в качестве WindowsTM-приложения);
- 2) параметры схемы и геометрии;
- 3) полевые параметры магнитных элементов;
- 4) параметры начальных условий движения;
- 5) параметры блока рассеяния;
- 6) параметры режима счета и вывода результатов.

Параметры второй и третьей групп задаются в виде массивов, среди которых имеется массив конфигурации, определяющий порядок и тип элементов схемы. Такой подход позволяет в рамках единого кода сконфигурировать любую схему.

Расчет траекторий начинается с вызова процедуры initGFS (рис. 3), в которой генерируются начальные условия движения. Далее для каждой траектории производится последовательный проход по элементам схемы. Данные, полученные в результате работы программы, хранятся в виде одномерных и двумерных гистограмм распределений частиц по координатам, энергиям и зарядам.

Программа позволяет проводить моделирование траекторий без учета взаимодействия ионов со средой, а также с включением лишь отдельных факторов этого взаимодействия: малоуглового рассеяния, потери энергии, изменения заряда. Это позволяет исследовать вклад каждого из перечисленных факторов в отдельности.

Программа предусматривает два режима работы: фоновый и стандартный. При стандартном запуске программа работает как многооконное WindowsTM-приложение для одного набора начальных параметров. В этом режиме визуализируются схема и траектории ионов как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. При запуске в фоновом режиме программа запускается без визуального вывода на длительное время, как правило, с несколькими наборами начальных параметров. Фоновый режим позволяет более эффективно использовать программу, запуская ее с целым набором файлов начальных данных, а также позволяет делать выборку по значениям одного или нескольких параметров для каждого файла.

На рис. 4–8 представлены примеры конфигурирования ряда схем реально существующих и гипотетических сепараторов.

Газонаполненный сепаратор DGFRS Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (г. Дубна) имеет конфигурацию $DQ_h Q_v$ [11]: дипольный магнит с однородным полем—квадрупольный магнит

с фокусировкой в горизонтальной плоскости—квадрупольный магнит с фокусировкой в вертикальной плоскости. Горизонтальный разрез его ионно-оптической схемы приведен на рис. 4. Здесь же показаны параксиальные траектории ионов без учета взаимодействия со средой. На рис. 5 приведены горизонтальный и вертикальный разрезы той же схемы со спрямленной центральной траекторией и с базовыми параксиальными траекториями.

Аналогичную конфигурацию имеют сепараторы SASSY [5], HECK [10], проектируемая модификация сепаратора RITU [7].

Принципиально иную конфигурацию имеет сепаратор JOSEF [22]. Он имеет симметричную схему и состоит из трех последовательно расположенных дипольных магнитов, причем первый и последний — с однородным полем, средний магнит — с полем $B \sim 1/\rho$ (рис. 6, 7).

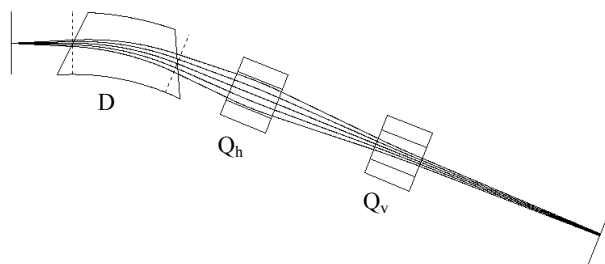


Рис. 4. Ионно-оптическая схема газонаполненного сепаратора Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (г. Дубна) [11]. Конфигурация $DQ_h Q_v$. Приведены параксиальные траектории ионов без учета взаимодействия

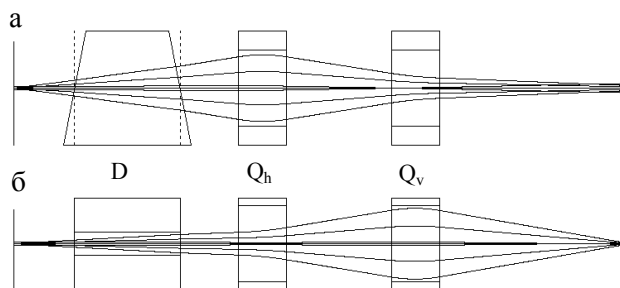


Рис. 5. Горизонтальный (а) и вертикальный (б) разрезы схемы газонаполненного сепаратора Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (г. Дубна)

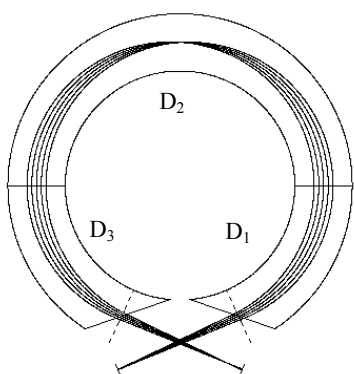


Рис. 6. Ионно-оптическая схема сепаратора JOSEF [22]. Конфигурация DDD

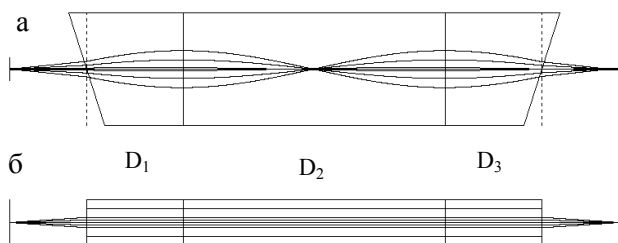


Рис. 7. Горизонтальный со спрямленной осевой траекторией (а) и вертикальный (б) разрезы схемы сепаратора JOSEF

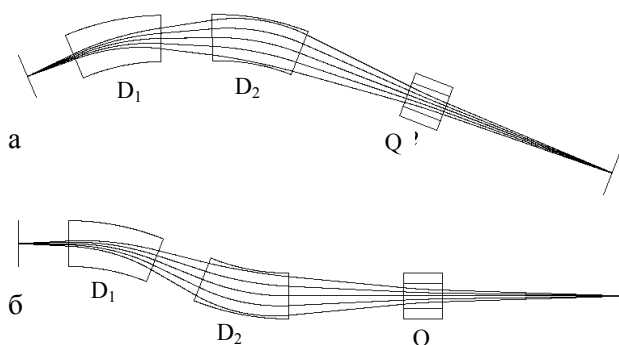


Рис. 8. Ионно-оптические схемы DDQ-сепараторов: а — "С-конфигурации" (поворот центральной траектории в дипольных магнитах осуществляется в одном направлении) и б — "S-конфигурации" (поворот центральной траектории в дипольных магнитах осуществляется в противоположных направлениях)

На рис. 8 приведены две гипотетические схемы, состоящие из одинаковых элементов: двух дипольных и одного квадрупольного магнита. В первой схеме поворот центральной траектории в дипольных магнитах осуществляется в одном направлении ("С-конфигурация"), во второй — в противоположных ("S-конфигурация"). Сравнение этих схем по степени уширения пучка ионов представляет интерес в связи с установленными ранее свойствами тандемных изотопных масс-спектрометров по изотопической чувствительности [23]: рассеяние ионов на остаточном газе вносит меньший вклад в уширение пиков в масс-спектрометрах, построенных по схеме S, по сравнению со схемой С.

Результатам моделирования траекторий ионов с учетом всего многообразия процессов рассеяния и сравнению различных схем будет посвящена отдельная статья.

ВЫВОДЫ

Предложенная методика и разработанные на ее основе алгоритм и программа конфигурирования ионно-оптической схемы составляют основу компьютерной модели газонаполненного сепаратора и позволяют генерировать схему, состоящую из произвольного числа элементов: дипольных магнитов, квадрупольных линз, диафрагм и бесполых промежутков. Число элементов ограничено только ресурсами компьютера.

Введенные в работе глобальная система координат и связанные с отдельными элементами схемы локальные системы координат, получающиеся в результате параллельного переноса, поворота и отражения относительно оси, позволяют записывать уравнения траекторий ионов в различных элементах в инвариантном виде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leino M. Gas-filled separators – An overview // Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. B. 2003. V. 204. P. 129–137.
2. Оганесян Ю.Ц. Новая область ядерной стабильности // Вестник РАН. 2001. Т. 71, № 7. С. 590–599.
3. Oganessian Yu.Ts. et al. // Proceedings of Fourth International Conference on Dynamical Aspects of Nuclear Fission, 19–23 October 1998, Easta-Papiernieka, Slovak Republic. World Scientific, Singapore, 2000. P. 334.
4. Lazarev Yu.A. et al. // Proceedings of International School-Seminar on Heavy Ion Physics, 10–15 May 1993, Dubna, Russia. JINP, Dubna, 1993. P. 497.
5. Ghiorso A. et al. SASSY, a gas-filled magnetic

- separator for the study of fusion reaction products // Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A. 1988. V. 269. P. 192–201.
6. *Leino M. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. B. 1995. V. 99. P. 653–656.
 7. *Enqvist T., Heikkinen P. et al.* The design of a new gas-filled separator at JYFL // Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. B. 2003. V. 204. P. 138–140.
 8. *Miyatake H. et al.* INS gas-filled recoil isotope separator // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 1987. V. 26. P. 309–313.
 9. *Morita K. et al.* RIKEN isotope separator on-line GARIS/IGISOL // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 1992. V. 70. P. 220–225.
 10. *Ninov V. et al.* Separation of actinide-made transurania by a gas-filled magnetic separator // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1995. V. 357. P. 486–494.
 11. *Subotic K. et al.* Evaporation residue collection efficiencies and position spectra of the Dubna gas-filled recoil separator // Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A. 2002. V. 481. P. 71–80.
 12. *Paul M et al.* Heavy ion separation with a gas-filled magnetic spectrograph // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1989. V. 277. P. 418–430.
 13. *Bazin D., Tarasov O., Lewitowicz M., Sorlin O.* The program LISE: a simulation of fragment separators // Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A. 2002. V. 482. P. 307–327.
 14. *Tarasov O., Bazin D.* Development of the program LISE: application to fusion – evaporation // Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. B. 2003. V. 204. P. 174–178.
 15. *Armbruster P. et al.* Are gas-filled magnetic separators a useful tool to investigate heavy fast recoils from nuclear reactions // Nucl. Instr. and Meth. 1971. V. 91. P. 499–507.
 16. *Melezhik A.V., Shcherbakov A.P., Yavor M.I.* Computer based simulation of gas-filled recoil separators // Book of Abstracts "Workshop on Computational Physics dedicated to the memory of Stanislav Merkuriev, St.Petersburg, August 24–27, 2003". St. Petersburg, 2003. P. 45–46.
 17. *Meyer L.* Plural and Multiple Scattering of Low-Energy Heavy Particles in Solids // Phys. Stat. Sol. (b). 1971. V. 44. P. 253–268.
 18. *Sigmund P. and Winterbon K.B.* // Nucl. Instr. Meth. 1974. V. 119. P. 541.
 19. *Northcliffe L.C., Schilling R.F.* Range and Stopping-Power Tables for Heavy Ions // Nucl. Data Tables. A. 1970. V. 7, N 3-4. P. 233–463.
 20. *Lindhard J., Scharff M.* Energy Dissipation by Ions in the keV Region // Phys. Rev. 1961. V. 124. P. 128.
 21. Готт Ю.В. Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях. М.: Атомиздат, 1978. 272 с.
 22. *Lawin H. et al.* The Jülich on-line separator for fission products "JOSEF" // Nucl. Instr. and Meth. 1976. V. 137. P. 103–117.
 23. *Gall R.N., Pliss N.S., Shcherbakov A.P.* Comparative Performance of Tandem and Double-Focusing Mass Spectrometers // Adv. Mass Spectrom. 1980. V. 8. P. 1893–1902.

*Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург*

Материал поступил в редакцию 22.12.2003.

COMPUTER BASED SIMULATION OF GAS-FILLED SEPARATORS. I. THE ION-OPTICAL SCHEME CONSTRUCTION

A. V. Melezhik, A. P. Shcherbakov

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

The ion-optical scheme construction method, algorithm and program based on a global and a set of local coordinates choice were developed. The ion-optical scheme of a gas-filled separator includes dipole and quadrupole magnets, apertures and drift spaces. The method applied allows trajectory equations to be invariant in different scheme elements.