

K-57

На правах рукописи

КОГАН Вильям Иосифович

СЕПАРАЦИЯ НЕЗАМЕДЛЕННЫХ ПРОДУКТОВ
ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР ПО МАССАМ, ЭНЕРГИЯМ
И ИОННЫМ ЗАРЯДАМ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ
И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

Специальность 01.04.16 —
физика атомного ядра и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна-1977

Работа выполнена в Институте электроники Академии Наук
Узбекской ССР.

Научный руководитель -

доктор физико-математических наук,
профессор, академик АН УзССР

У.А. АРИФОВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Б.М. ГОХБЕРГ

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Н.И. ТАРАНТИН

Ведущее предприятие:

Радиовый институт им. В.Г.Хлопина, г. Ленинград.

Защита диссертации состоится "20" января 1978 года
в "15³⁰" часов на заседании специализированного Ученого совета
Д.047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории
ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований
(г. Дубна, Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "15" декабря 1977 года.

Ученый секретарь специализированного Совета
кандидат физико-математических наук

Ю.В. ТАРАН

2

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Возможности создания единой непротиворечивой модели процесса деления ядер, определение того, как протекает деформация составного ядра, на какой стадии деформации и как решается все многообразие образующихся осколков деления, как оно зависит от ядерной структуры, тесно связаны с детальными измерениями распределений осколков деления по массам, энергиям и зарядам и с установлением точной корреляции между этими величинами.

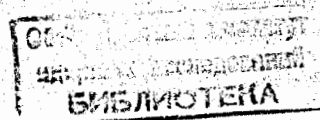
Проблемы развития ядерной энергетики, в частности, вопросы радиационной стойкости ряда конструкционных материалов и преобразования ядерной энергии, задачи детектирования осколков деления и дозиметрии обуславливают широкий интерес к изучению процессов, протекающих при взаимодействии осколков и продуктов деления ядер с веществом. Эти явления интересны и в связи с недостаточной изученностью процессов, происходящих в сложных атомных системах при столкновениях с веществом, и возникающих при этом изменений в структуре вещества.

Однако, методы, применяемые при изучении этих вопросов, не позволяют получать необходимые данные с высокой точностью и полнотой одновременно. Это обусловило интенсивность работ по совершенствованию существующих и разработке новых методов исследования свойств осколков и продуктов деления ядер и изучения взаимодействия их с веществом.

Одним из наиболее перспективных в этом отношении нам представляется метод отклонения незамедленных продуктов деления ядер в электрическом и магнитном полях, который позволяет за короткое время после акта деления (около 1 мксек при длине пути пролета ионов порядка 10 м) сепарировать в пространстве продукты деления одновременно по массам, энергии и ионным зарядам, с высокой точностью определить эти величины, а также выходы продуктов деления. Однако, на впервые разработанной в 1964 г. в ФРГ установке такого типа по ряду причин, связанных с выбором системы отклоняющих полей, была получена невысокая разрешающая способность, что позволило проводить эксперименты только с ограниченным числом сепарированных продуктов деления тяжелой группы. Это обусловило необходимость дальнейшей разработки данного метода.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Целью данной работы является разработка и осуществление метода сепарации в пространстве незамедленных продуктов деления ядер по массам, энергиям и ионным зарядам, при одно-

- 3 -



время измерения этих величин с высокой точностью, для проведения в последующем широкого круга исследований в области физики деления ядер и взаимодействия продуктов деления с веществом. Эта цель достигнута разработкой за период с 1965 г. по 1973 г. масс-сепаратора незамедленных продуктов деления ядер, состоящего из последовательно расположенных электростатического и магнитного полей и расположенного на пучке нейтронов реактора.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Впервые разработан масс-сепаратор незамедленных продуктов деления ядер, который обеспечил пространственную сепарацию подавляющего большинства продуктов деления по массам, энергиям и ионным зарядам по всему диапазону этих величин как тяжелой, так и легкой группы, при возможности проведения на нем долговременных измерений без ухудшения характеристик масс-сепаратора.

Новым в данной работе является следующее: применение для сепарации незамедленных продуктов деления ядер системы из электростатического поля цилиндрического конденсатора и секторного однородного магнитного поля, отклоняющих ионы в противоположных направлениях, с фокусировкой первого порядка по углам и скоростям и без промежуточного фокуса между полями; использование малых углов в этой системе; расположение электростатического анализатора с частью защиты и магнитного анализатора на снабженных механизмами выставки двух связанных тележках, которые могут перемещаться по колее с рельсами параллельно оси канала реактора; конструкция электростатического анализатора и применение в нем экранных диафрагм с широкими щелями относительно межэлектродного зазора; разработка двупольного стабилизированного выпрямителя с плавной регулировкой высокого напряжения, подаваемого на пластины электростатического анализатора; применение в масс-сепараторе разработанного монитора нейтронного пучка непрерывного действия; осуществление впервые в мировой практике сепарации продуктов деления легкой группы; разработка нового метода определения ионного заряда линий M/e по разности значений M/e равноотстоящих линий спектра.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Материалы работы докладывались на Всесоюзном семинаре по физике деления ядер (ФЭИ, Обнинск, 1972 г.) и были представлены на VIII Международной конференции по ионным ускорителям и масс-сепараторам (Шовде, Швеция, 1973 г.). Основ-

ные результаты содержатся в 6 публикациях.

ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка цитированной литературы из 182 наименований и примечания и изложена на 136 страницах машинописного текста, содержит 53 рисунка и 5 таблиц на 55 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В первой главе проведен обзор методов изучения свойств осколков и продуктов деления ядер, основное внимание уделено методам отклонения незамедленных продуктов деления в электрических и магнитных полях. Радиохимический и масс-спектрометрический методы дают детальные сведения о массах и зарядах ядра продуктов деления на поздних стадиях процесса деления, но не позволяют измерить их энергии или скорости, точность определения выходов обычно не превышает 7-15% и 3-6%, соответственно. Расположение анализирующей аппаратуры на пучках (метод "он-лайн") позволяет существенно ускорить сепарацию по M, Z , но не улучшает точность определения выходов. Инструментальные методы (ионизационные камеры, полупроводниковые детекторы, время пролета, сочетание полупроводниковых детекторов с методом времени пролета) позволяют измерениями энергий или скоростей дополнительных продуктов деления ядер получить выходы осколков и продуктов деления с определенными энергиями и массами. Эти методы использовались и в изучении взаимодействия продуктов деления с веществом. Однако точность определения масс этими методами невысока, 1,5-3 а.е.м. для метода времени пролета и около 6 а.е.м. для полупроводниковых детекторов (Паппас, Альстад и Хагебо).

В ряде работ применялся метод отклонения незамедленных продуктов деления ядер в магнитном поле. Этим методом Н.А.Перфилов впервые установил значения ионных зарядов продуктов деления урана. Н.Лассен аналогичным методом исследовал изменение ионных зарядов и потери энергии продуктов деления при прохождении их через вещества. Б.Ковн, А.Ковн и О.Колли на магнитном масс-спектрометре с фокусировкой с высокой точностью измерили распределение по энергиям продуктов деления заданной массы ($M=97$). А.А.Воробьев, Д.М.Селиверстов, В.Т.Грачев, В.А.Кондуров, А.М.Никитин, Н.Н.Смирнов и Ю.К.Залите используют квадрупольный магнитный сепаратор для изучения выходов и распределений по энергиям легких частиц, обра-

зующихся при делении ядер.

Развитием метода явилось создание Б.Козном и С.Фалмером газонаполненного магнитного сепаратора, в котором осуществляется фокусировка частиц по скоростям и по ионным зарядам, что обеспечило высокую светосилу таких сепараторов. Приборы этого типа были созданы также в ФРГ (П.Армбрустер и П.Армбрустер, Дж.Эйденс, Е.Рёкл) и в СССР (И.Бачо, Д.Д.Богданов, Ш.Дароци, В.А.Карнаухов, Л.А.Петров, Г.М.Тер-Акопьян). На них были проведены работы по определению первичных зарядов ядра продуктов деления в функции их масс, найдено распределение продуктов деления массы 97 по зарядам ядра, изучались радиоактивный распад продуктов деления и взаимодействие их с веществом. Однако разрешающая способность этих масс-сепараторов крайне низка: $(M/\Delta M)_{0,5} < 30$, что связано в основном с рассеянием ионов пучка данной массы в газе и с разбросом их по зарядам, в результате чего в фокусе сепаратора присутствуют ионы нескольких соседних масс со сравнимыми интенсивностями. Это затрудняет и делает недостаточно надежной идентификацию частиц.

Попытка П.Стивенсона и Х.Хика сепарировать замедленные до энергий 1-3 Мэв (ионные заряды $e = 1-4 e_p$) продукты деления ^{235}U в системе параллельных электростатического и магнитного полей окончилась неудачей.

В 1964 г. Г.Эвальд, Е.Конечный, Г.Гюнтер и Г.Рёслер разработали масс-сепаратор продуктов деления ядер, состоящий из последовательно расположенных электростатического поля тороидального конденсатора и секторного однородного магнитного поля, который был размещен на пучке нейтронов реактора. Хотя по техническим причинам, связанным с выбором системы полей и метода защиты от излучений реактора, было получено разрешение на 0,5 высоты пиков M/e около 150-200 (вместо расчетного значения 1800) и на установке невозможно точное определение выходов сепарированных продуктов деления, что сузило возможный диапазон исследований, значительное число линий M/e тяжелой группы продуктов деления ^{235}U оказалось разрешенным, и это позволило провести с ними ряд оригинальных работ по определению первичного заряда ядра продуктов деления нескольких масс (по измеренной длине цепочки β -распада) и по взаимодействию их с веществом. В 1975 г. запущен параболический масс-сепаратор незамедленных продуктов деления на пучке нейтронов реактора в Гренобле. Разрешающая способность около 800.

Рассмотренные в обзоре работы показывают широкие возможности применения метода сепарации незамедленных продуктов деления ядер в электрическом и магнитном полях (особенно в системе обоих полей) в исследовании многих важных свойств продуктов деления, связанных как с процессом деления ядер, так и с процессами, протекающими при этом в электронной оболочке, а также в изучении разных сторон взаимодействия продуктов деления с веществом. Вместе с тем выявилась недостаточная разработанность этого метода, связанная со значительными трудностями в применении его на пучках нейтронов для сепарации незамедленных продуктов деления ядер, когда для ионов высоких энергий имеется очень большой набор значений масс, энергий и ионных зарядов, причем для полного разделения подавляющего большинства линий M/e следует обеспечить разрешающую способность на 0,5 высоты пиков M/e около 800, что требует тщательного выбора системы отклоняющих полей в согласовании с конструктивными и технологическими возможностями изготовления установки, а также учета особенностей работы установки на пучках нейтронов реактора.

Учитывая это, в данной работе была поставлена задача разработать масс-сепаратор незамедленных продуктов деления ядер, содержащий электрическое и магнитное поля и расположенный на горизонтальном канале реактора, с разрешающей способностью около 800.

НА ЗАЩИТУ ВНОСЯТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ: 1) система из электростатического поля цилиндрического конденсатора и секторного однородного магнитного поля, отклоняющих ионы в противоположных направлениях, с фокусировкой первого порядка по углам и скоростям и без промежуточного фокуса между полями позволяет наиболее эффективно и просто решить проблему сепарации в пространстве незамедленных продуктов деления ядер; 2) разработанная на основе этой системы полей оригинальная конструкция масс-сепаратора незамедленных продуктов деления обеспечивает достижение высокой разрешающей способности, возможность долговременных точных и воспроизводимых измерений величин E/e и M/e по всему их диапазону для продуктов деления, удобство проведения разнообразных исследований на сепараторе; 3) масс-сепаратор может использоваться как в режиме работы масс-спектрометра, так и в режиме масс-спектрографа, что расширяет круг возможных исследований; 4) применение в масс-сепараторе монитора нейтронного пучка непрерывного действия обеспечивает точность измерения выходов сепарированных продуктов деления;

5) использованные методы обработки и расфировки спектров E/e и M/e надежны и эффективны; 6) хорошее разделение подавляющего большинства пиков в спектрах M/e продуктов деления тяжелой и легкой групп, точность определения значений масс, энергий и ионных зарядов пиков, воспроизводимость и долговременная стабильность положений сепарированных пучков продуктов деления, возможность сепарации по всему диапазону масс, энергий и ионных зарядов продуктов деления, обеспечивают проведение на сепараторе широкого круга оригинальных исследований как в области физики деления ядер, так и в области взаимодействия продуктов деления ядер с веществом.

Вторая глава посвящена выбору системы отклонения ионов и расчету масс-сепаратора продуктов деления ядер. Для осуществления сепарации незамедленных продуктов деления ядер по массам, M, энергиям E и ионным зарядам e выбрана система масс-сепаратора, состоящая из последовательно расположенных электростатического поля цилиндрического конденсатора и секторного однородного магнитного поля, отклоняющих ионы в противоположных направлениях в одной плоскости, без промежуточного фокуса между полями, рис. 1. При напряжении V между пластинами цилиндрического конде-

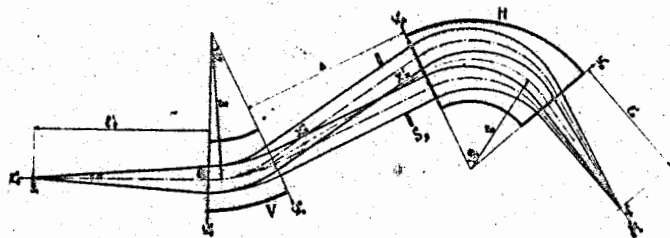


Рис. 1. Схема хода лучей в масс-спектрометрах с двойной фокусировкой и противоположными отклонениями ионов в полях при отсутствии промежуточного фокуса между полями ($l_e = \infty$ и $l_m = \infty$).

нсатора по его центральной траектории с радиусом r_0 пропускаются

ионы с выделенным значением отношения энергии к ионному заряду

$$\frac{E}{e} = \frac{1}{2 \ln(r_2/r_1)} V = \alpha V, \quad (1)$$

где r_1 и r_2 - радиусы внутренней и внешней обкладок конденсатора. При последующем пропускании этих ионов через магнитное поле осуществляется сепарация их по отношениям массы к заряду

$$\frac{M}{e} = r_m^2 \ln(r_2/r_1) \frac{H^2}{V} = \beta \frac{H^2}{V}, \quad (2)$$

где r_m - радиус отклонения ионов в магнитном поле с напряженностью H.

Для системы полей рисунка 1 выполняются условия фокусировки первого порядка по углу (Герцог Р.)

$$l_e' = (r_{e0}/\sqrt{2}) \operatorname{ctg} \sqrt{2} \Phi_e, l_e'' = \infty \quad (3)$$

в электрическом поле,

$$l_m' = \infty, l_m'' = r_m \frac{\cos \epsilon'' \cos(\Phi_m - \epsilon')}{\sin(\Phi_m - \epsilon' - \epsilon'')} \quad (4)$$

в магнитном поле, а также по скоростям (Маттэух и Герцог)

$$\sqrt{2} \sin \sqrt{2} \Phi_e = \sin \Phi_m + \operatorname{tg} \epsilon' (1 - \cos \Phi_m), \quad (5)$$

где l_e' - расстояние от объекта до входной границы соответствующего поля, l_e'' - расстояние от выходной границы поля до изображения, Φ - угол отклонения ионов, ϵ' и ϵ'' - углы входа и выхода ионов (центрального луча) в магнитном поле.

Выбор такой системы полей обусловлен тем, что, во-первых, цилиндрический конденсатор может быть изготовлен с высокой точностью (чтобы обеспечить разрешающую способность около 800, необходимую для сепарации большинства линий M/e продуктов деления без наложений, погрешности в геометрических параметрах l_e' , l_e'' , r и Φ сепаратора не должны превышать 0,1% при больших величинах этих параметров, обусловленных высокими скоростями продуктов деления и ограничениями, налагаемыми на максимальные значения полей V и H). Во-вторых, поскольку расстояние Δ между полями произвольно, эта система при данных r и Φ имеет минимальную длину, что увеличивает светосилу; отсутствие промежуточного фокуса между полями упрощает юстировку; противоположные отклонения ионов обеспечивает наименьшие поперечные габариты установки, что существенно при размещении ее на реакторе.

При учете необходимости помещать слой делящегося вещества

вблизи активной зоны реактора для получения максимальной интенсивности продуктов деления, ограниченности сектора рабочей площади у канала реактора и возможностей изменения полюсных наконечников имеющегося электромагнита СП-25Б, из условий фокусировки (3), (4) и (5) при компенсации рассеянных электрических полей на краях заземленными диафрагмами (Герцог) с шириной щелей - 2 см и введении виртуальных границ ($\xi = 6,05$ см) магнитного поля (К.Бейнбридж), рассчитанных по измеренной топографии полей рассеяния на его краях, определены основные геометрические параметры масс-сепаратора:

$$l_e' = 360,0 \text{ см}; \Phi_e = 19^{\circ}7'; \tau_{e0} = 274,2 \text{ см}; l_e'' = \infty; l_m' = \infty; \Phi_m = 40^{\circ}; \tau_{m0} = 174,5 \text{ см}; l_m'' = 217,0 \text{ см}; \epsilon' = 0; \epsilon'' = 2^{\circ}.$$

Расстояние между полями из конструктивных соображений выбрано $\Delta = 318,5$ см. Полная длина пути ионов в масс-сепараторе около 11,4 метра, время пролета его продуктами деления (при скоростях около 10^9 см/сек) около 1 мксек. Рассчитаны дисперсия $D_M = 87,3$ см, увеличение $R = 0,64$, ширина линии $2\beta'' = 0,13$ см и разрешающая способность $[(M/e)/\Delta(M/e)] = 700$ (по основанию) при ширине щели источника $S' = 0,1$ см и апертурном угле входа $\alpha_e' = 1,96 \times 10^{-3}$. Для большей точности расчета получены формулы ширины изображения и разрешающей способности данного типа масс-сепаратора с учетом aberrаций второго порядка $\Psi(\alpha_e'^2, \alpha_e' \beta, \beta^2)$

$$2\beta'' = (\tau_m / \tau_{e0}) S' + 2\Psi(\alpha_e'^2, \alpha_e' \beta, \beta^2), \quad (6)$$

$$\frac{M^*}{\Delta M^*} = \frac{\tau_{e0}}{2[S' + 2(\tau_{e0} / \tau_m) \Psi(\alpha_e'^2, \alpha_e' \beta, \beta^2)]}, \quad (7)$$

где $M^* = M/e$, $\beta = \Delta V / U_0$. Величины самих aberrаций рассчитаны по формулам работы Г.Хинтенбергера и Л.Кёнига. Был также проведен расчет ширины пучка ионов в ряде точек траектории (в области полей и вне их), для того чтобы соответствующим выбором диафрагмы предотвратить рассеивание ионов на стенках и деталях установки. Найдено распределение ионов данного M/e , пропускаемых через диафрагму $S_B = 3,00$ см в магнитное поле, по скоростям и по энергиям (полуширина распределения по скоростям $\beta_{0,5} = \pm 0,638 \cdot 10^{-2}$, по энергиям $(\Delta E/E)_{0,5} = \pm 1,28\%$).

При выбранном зазоре $d = 3,000$ см между пластинами цилиндрического конденсатора диапазон напряжений V между ними, необходимый для отклонения продуктов деления ядер с любыми возможными значениями E/e , найден равным 38 - 148 кв. Диапазон напряженнос-

тей H магнитного поля лежит в пределах 2200 - 6700 э.

Светосила прибора при выбранной геометрии - $1,1 \cdot 10^{-6}$. Тогда расчетные средние интенсивности на линию M/e равны 1,4 и 2,0 частиц/мин для продуктов деления тяжелой и легкой групп, соответственно (при потоке нейтронов $(0,75 \pm 0,25) \cdot 10^{12}$ нейтр/см²·сек и толщине слоя $^{235}\text{U} = 260$ мкг/см²).

В третьей главе описывается разработанный на основе проведенных расчетов масс-сепаратор незамедленных продуктов деления ядер. Его блок-схема приведена на рис. 2. Установка состоит из собственно масс-сепаратора; высоковольтного источника стабилизированного до 0,01% напряжения, обеспечивающего подачу на каждую из пластин регулируемого плавно напряжения от 5 кв до 70 кв соответствующей полярности, с системой измерения этого напряжения; источника питания электромагнита СП-25Б со стабилизацией по току до 0,01%; системы измерения по ЯМР магнитной индукции в зазоре электромагнита; двух полупроводниковых детекторов; за электростатическим анализатором и в фокальной плоскости за магнитом, каждый из которых снабжен системой спектрометрического усиления импульсов и амплитудного анализа; камеры детектирования, отсекаемой вакуумным затвором от масс-сепаратора, в которой размещена кассета с твердотельным трековым детектором; биологической защиты от излучений реактора и монитора нейтронного пучка (не показан).

Часть продуктов деления, возникших в слое ^{235}U , находящемся во входном плече 2, в потоке нейтронов $(0,75 \pm 0,25) \cdot 10^{12}$ нейтр/см²·сек, выходит через щель I шириной 1 мм и высотой 38 мм и слаборасходящимся пучком с апертурой, ограниченной диафрагмой 4 переменной ширины (высота всех последующих щелей - 40 мм), проходит в электростатический анализатор. Входное плечо состоит из двух коаксиальных труб, изготовленных из алюминиевого сплава. Наружная труба служит вакуумным кожухом, внутренняя труба несет устройство для подложки с делимым веществом и сменных диафрагм, систему коллиматоров для предотвращения рассеивания продуктов деления на стенках и алюминиевые коллиматоры 3 для ограничения ослепления пучка нейтронов. Электростатический анализатор представляет собой цилиндрический конденсатор, пластины 13 которого изготовлены с высокой точностью из цельных кусков алюминиевого сплава и укреплены с помощью вставочных приспособлений на полистироловых стойках, стянутых в жесткий каркас, который опирается на поворот-

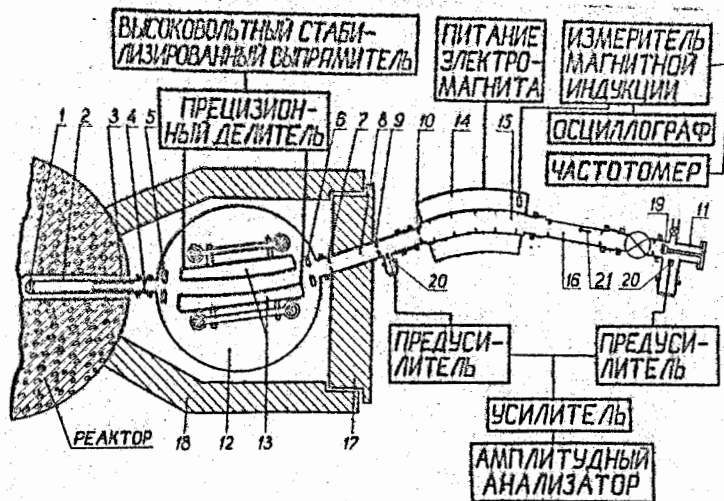


Рис. 2. Блок-схема масс-сепаратора продуктов деления ядер.

1 - источник ионов, 2 - входное плечо, 3 - коллиматор нейтронного пучка, 4 - диафрагма, коллимирующая пучок ионов, 5, 6 - диафрагмы, экранирующие рассеянное электрическое поле, 7 - диафрагма, предотвращающая рассеивание ионов на стенках, 8 - ионопровод, 9 - диафрагма со целью регулируемой ширины, определяющая разброс ионов по скоростям, 10 - диафрагма, определяющая максимальный разброс ионов по скоростям, 11 - камера детектирования, 12 - электростатический анализатор, 13 - пластины электростатического анализатора, 14 - полюса электромагнита, 15 - камера магнитного отклонения, 16 - выходное плечо, 17 - подвижная часть биологической защиты, 18 - неподвижная часть защиты, 19 - трековый детектор, 20 - полупроводниковые детекторы, 21 - заслонка пучка ионов.

ный стол и заключен вместе с ним в цилиндрической камере 12, толщина стенок и дна которой исключает в заданных пределах их прогиб под действием атмосферного давления. Диафрагмы 5 и 6, связанные с каркасом анализатора регулирующими их положение устройствами, экранируют поле на краях. Расстояния их от торцов пластин могут изменяться через сильфонные переходы с микрометрическими головками без нарушения вакуума. Вертикальный размер пластин цилиндрического конденсатора $R = 100$ мм выбран так, что обеспечивается прохождение пучка ионов высотой 40 мм в поле радиальной формы (отношение высоты пластин к зазору между ними равно 3,3). Для уменьшения вероятности электрических разрядов все острые кромки деталей анализатора скруглены, пластины и экранные диафрагмы отполированы до зеркального блеска (чистота обработки 10-12 класса), остальные детали тщательно шлифованы, размеры изоляторов и материал выбраны так, чтобы свести к минимуму утечки по поверхности. Через электростатический анализатор проходят ионы с выделенным согласно формуле (1) значением отношения энергии к ионному заряду E/e .

Разработанный нами двупольный высоковольтный выпрямитель с фотокомпенсационной системой стабилизации обеспечивает подачу на каждую из пластин электростатического анализатора плавно регулируемого напряжения величиной от 5 до 70 кв соответствующей полярности, стабилизированного до 0,01%. Измерение выпрямленного напряжения производится с помощью потенциометра Р-309 класса 0,005 сравнением части его, снимаемой с прецизионного высоковольтного делителя, с опорным напряжением нормального элемента 2-го класса НЭ-65. При 24-часовой непрерывной работе и в диапазоне температур 16-32°C величина установленного напряжения остается постоянной в пределах не хуже 0,01%. Уровень пульсаций составляет $1,6 \cdot 10^{-4}\%$. Диапазон напряжений, обеспечиваемый этим выпрямителем, позволяет пропускать через электростатический анализатор продукты деления с практически всеми возможными значениями E/e .

Полупроводниковый детектор 20 с маской $3,4 \times 8$ мм², размещенный за электростатическим анализатором, с помощью сильфона и регулирующего устройства может устанавливаться в любой части сечения пучка продуктов деления, либо вне его, позволяя проводить амплитудный анализ продуктов деления с выделенным значением E/e .

Затем продукты деления через ионопровод 8 проходят к магнитному анализатору - секторному однородному магнитному полю, созда-

ваемому полюсами I4 электромагнита СП-25В. Пропускаемый интервал значений E/e задается диафрагмами 9 (с изменяемой через сильфонный переход с микрометром шириной) и I0 (шириной 30 мм), $\Delta(E/e)_{\text{кат}} \pm 1,28\%$. В магнитном поле продукты деления разворачиваются согласно выражению (2) в спектр значений M/e и при соответствующем значении напряженности магнитного поля H часть пучков, характеризующихся определенными значениями M/e , через выходное плечо I6 попадает в камеру детектирования II, отсекаемую от выходного плеча вакуумным затвором, где детектируется либо трековым детектором I9 (выделяется участок фокальной плоскости 40 мм x 40 мм), либо полупроводниковым детектором 20 со щелью $1,3 \times 40 \text{ мм}^2$, вводимым в камеру через сильфонный переход. В последнем случае детектирование ионных пучков производится либо перемещением детектора с фиксацией его в отдельных точках, либо изменением H , и одновременно проводится амплитудный анализ импульсов (использовался амплитудный анализатор АИ-128). При детектировании трековыми детекторами начало и конец детектирования задаются механической заслонкой 21. Стандартный источник питания электромагнита СП-25В был модернизирован в соответствии с разработкой Б.М.Грищенко и В.А.Скубки: в блоке усилителя постоянного тока в цепи обратной связи электромеханический преобразователь постоянного тона в переменный заменен балансным модулятором на транзисторах, вследствие чего стабильность тона питания улучшилась с 0,1% до 0,01%. В результате модернизированный источник питания обеспечивает величину поля в зазоре электромагнита, равном 72 мм, от 1000 до 10600 в с стабильностью $\Delta H/H \leq 0,02\%$, что позволяет проводить с высоким разрешением анализ продуктов деления всех возможных значений M/e . Напряженность магнитного поля измеряется по ядерному магнитному резонансу на водороде и литии с точностью 0,01%.

Чтобы обеспечить смену источников делящегося вещества, юстировочные и ремонтно-профилактические работы независимо от режима работы реактора, камера электростатического анализатора с подвижным блоком щиты и электромагнит (весом 12 т) установлены на двух тележках, снабженных механизмами выставки и жестко соединенных регулируемым стержнем (рис. 3). Тележки с помощью электропривода могут перемещаться по колес с рельсами параллельно оси канала реактора (один из рельсов - направляющий, круглого сечения), обеспечивая введение входного плеча в канал реактора. Узлы масс-

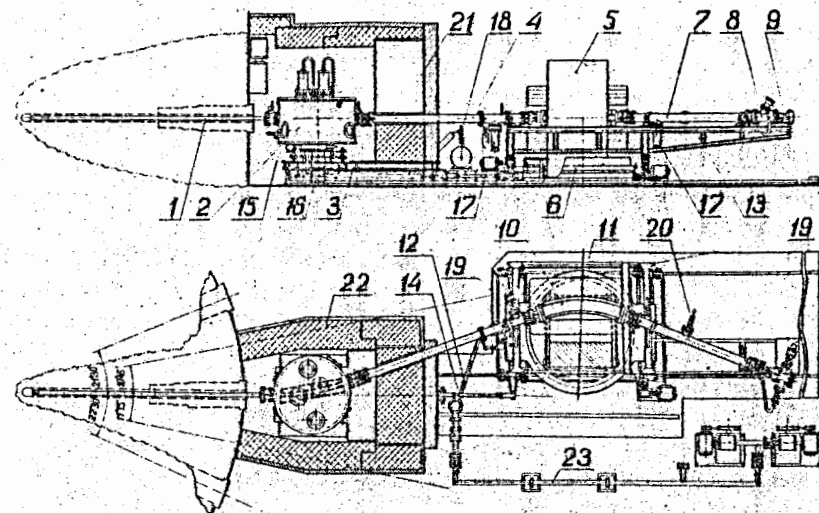


Рис. 3. Конструктивная схема масс-сепаратора продуктов деления ядер.

I - входное плечо, 2 - камера электростатического анализатора, 3 - передняя тележка, 4 - ионпровод, 5 - электромагнит СП-25В, 6 - задняя тележка с механизмом выставки и электроприводом, 7 - выходное плечо, 8 - вакуумный затвор, 9 - камера детектирования, I0 - камера магнитного отклонения, II - платформа с рельсами, I2 - направляющий рельс (круглого сечения), I3 - карниз в регулируемом креплении ионпровода и выходного плеча, I4 - регулируемый крепеж тележек, I5 - механизм выставки камеры электростатического анализатора, I6 - диффузионный насос Н-50 с маслоотражателем и азотной ловушкой, I7 - диффузионные насосы Н-1С с маслоотражателем и азотными ловушками, I8 - система подачи жидкого азота в ловушку насоса Н-5С, I9 - сильфонные переходы с микрометрическими головками для полупроводниковых детекторов, 20 - заслонка пучка ионов, 21 - подвижный блок биологической защиты, 22 - неподвижные блоки биологической защиты, 23 - форвакуумная линия.

сепаратора спроектированы так, чтобы обеспечить точность не хуже 0,1% геометрических размеров, определяющих его фокусирующие свойства, и воспроизводимость этих размеров при повторных разборках и сборках, а также при перемещениях масс-сепаратора по колее. Для проведения юстировочных работ предусмотрено необходимое количество устройств выставки. Для обеспечения быстрого спада наведенной активности узлы и детали, находящиеся в высоких потоках нейтронов, изготовлены из алюминиевого сплава САВ. К тому же алюминий обеспечивает высокую электрическую прочность межэлектродных зазоров в вакууме. Остальные детали и узлы, лежащие вблизи пути ионов, изготовлены из немагнитных сортов нержавеющей стали, латуни и меди. Для высоковольтной изоляции выбран полистирол в связи с его хорошими электроизоляционными, вакуумными и механическими свойствами, а также высокой радиационной стойкостью. В рабочем положении камера электростатического анализатора со всех сторон окружена защитой от излучений реактора (смесь парафина с борной кислотой и свинец), которая обеспечила снижение доз всех видов излучений ниже предельно допустимых уровней.

Вакуумная система спроектирована так, что обеспечивает откачку масс-сепаратора (объем 900 л) от атмосферного давления до давления $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. за 1,5-2 часа, и затем до давления $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. за 40 мин (в этом существенную роль сыграло присоединение диффузионного насоса Н-5С непосредственно ко дну камеры электростатического анализатора). Предельный вакуум после 2,5 ч откачки диффузионными насосами составляет $(1 - 2) \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Миграция паров масла в вакуумную систему снижена применением маслостражателей и азотных ловушек. Таким образом, вакуум в системе достаточен для обеспечения высокой электрической прочности межэлектродных зазоров и пренебрежимо малой вероятности столкновений продуктов деления с атомами остаточных газов.

Проведенная после монтажа масс-сепаратора на горизонтальном канале реактора его юстировка с использованием портативной лазерной установки в сочетании с плоскопараллельной (до 18") стеклянной пластиной и системой отвесов, нивелира, специально разработанных шаблонов, концевых мер и других измерительных устройств, обеспечила необходимую точность выставки всей установки по углам, горизонту и линейным размерам.

Разработанная методика тренировки пластин и диафрагм элект-

ростатического анализатора электрическими разрядами позволила довести напряжение между пластинами до 130 кв (возможно и дальнейшее увеличение), при этом в течение 12 часов не отмечалось разрядов. В дальнейшем выставка необходимого для работы напряжения осуществлялась за 1 - 2,5 часа (в зависимости от величины напряжения), причем в процессе длительных непрерывных измерений (до 24 ч) разряды отсутствовали.

Таким образом, поскольку разгерметизация масс-сепаратора производится редко, и вследствие этого давление в нем обычно не превышает $10^{-2} - 10^{-1}$ мм рт. ст., время подготовки масс-сепаратора к измерениям, включая время на откачку, прогрев аппаратуры и выставку полей, не превышает 2 - 3 часа.

Монитор нейтронного пучка, состоящий из слоя ^{235}U , коллимационной системы и полупроводникового детектора, заключенных в небольшую тонкостенную вакуумную камеру, помещен на выходе канала реактора, вплотную к входному плечу масс-сепаратора, и позволяет привести все измеренные выходы сепарированных продуктов деления к одинаковому интегральному потоку нейтронов.

Использованные для детектирования продуктов деления полупроводниковые кремниевые поверхностно-барьерные детекторы были отобраны по наилучшим параметрам односторонних амплитудных спектров продуктов деления ^{235}U и ^{252}Cf , снятых в режиме "насыщения". Контроль стабильности электронной аппаратуры ведется в процессе измерения по линии, получаемой от генератора со стандартизатором амплитуд импульсов. Калибровка амплитудных спектров по энергиям проведена методом, предложенным Г.Шмиттом, В.Кикером и С.Вильямсом. Отработана также методика детектирования продуктов деления в сепараторе стеклянными твердотельными трековыми детекторами.

В четвертой главе описывается проверка основных характеристик масс-сепаратора и его градуировка α -частицами. Проверка сепарационных и фокусирующих свойств масс-сепаратора была выполнена с помощью спектрометрического α -источника ^{238}Pu , имеющего две основные линии с энергиями $E_1 = 5,498$ Мэв (71,1%) и $E_2 = 5,455$ Мэв (28,7%). Электростатический анализатор обеспечил полное разделение этих линий. Расстояние между линиями и их ширина в пределах погрешностей не отличаются от расчетных значений. Отсюда максимальный разброс по энергиям в пучке ионов с данными M , E и e найден равным $(\Delta E/E)_{\max} = (1,28 \pm 0,05)\%$. В фокусе, за магнитным

анализатором, обе линии E/e сходятся в один узкий пик M/e, что подтвердило выполнение условий двойной фокусировки. Для магнитного анализатора проведена небольшая коррекция фокусного расстояния на основе вычисленных по измеренным данным значений радиуса отклонения $r_{m0} = 173,4$ см по центральной траектории, расстояния эффективной границы от края полюсов магнита $d = 5,66$ см и расстояния изображения от этой границы $l''_{m0} = 215,7$ см. Эти величины близки к расчетным.

Разрешающая способность масс-сепаратора при измерении спектров в масс-спектрометрическом режиме (полупроводниковым детектором со щелью шириной 1,3 мм) найдена равной на 0,1 высоты пика $[(M/e)/\Delta(M/e)]_{0,1} \approx 350$ и на 0,5 высоты пика $[(M/e)/\Delta(M/e)]_{0,5} \approx 710$.

Чтобы увеличить скорость набора данных, а также разрешающую способность масс-сепаратора, он опробован в масс-спектрографическом режиме измерений, то есть проведена регистрация пика α -частиц ядерными фотоэмульсиями в ряде точек Y_m'' вблизи фокальной плоскости на расстояния до 20 мм в обе стороны от центральной траектории $Y_m'' = 0$. Предварительно на основе полученных данных для центральной траектории выполнены расчеты параметров траекторий для частиц, отклоненных в магнитном поле на углы, несколько отличные от центрального угла Φ_{m0} . Полученные в разных местах фотопластинок пики M/e α -частиц показали, что для них на выбранном участке $\Delta Y_m'' = 40$ мм (при $X_m'' = l''_{m0}$) выполняются условия двойной фокусировки. Разрешающая способность найдена при времени экспозиции $t = 60$ мин на пик $[(M/e)/\Delta(M/e)]_{0,5} = 950 - 1050$, увеличиваясь от меньших радиусов к большим. Небольшое отличие от расчетного значения связано в основном с наличием сферической аберрации, которая обусловлена большой величиной высоты линии $\Delta E = 40,2$ мм, и обнаружена при анализе линии по высоте. Дисперсия по массам $\Delta m = 86-88$ см. Коэффициент использования источника (эффективность) масс-сепаратора найден равным $2,6 \cdot 10^{-6}$.

Проведена градуировка масс-сепаратора, т.е. найдены коэффициенты a и b в выражениях (1) и (2), связывающие значения E/e и M/e ионов с величинами V и H^2/V , соответственно (получена зависимость величины b от координаты Y_m'' пучка ионов в плоскости детектирования). Воспроизводимость положения линий M/e и точность измерения этой величины не хуже 0,06%. Интенсивность пиков α -ча-

стиц в разных местах плоскости детектирования в пределах статистических ошибок одинакова, что подтверждает правильность расчетов ширины отверстий диафрагм, предотвращающих рассеивание ионов, и обеспечивает возможность точного измерения выходов ионов по всему детектируемому участку спектра M/e.

Полученное значение разрешающей способности примерно в 5 раз превосходит значение, достигнутое группой Эвальда и Конечного в ДРГ. Оно оказалось вполне достаточным, чтобы ожидать полной сепарации подавляющего числа линий M/e продуктов деления ядер.

В пятой главе рассматриваются спектры продуктов деления ядер ^{235}U тепловыми нейтронами, снятые на масс-сепараторе, методы их расшифровки, а также исследовательские работы, которые могут быть проведены на масс-сепараторе. Полученные спектры позволяют оценить свойства масс-сепаратора и его возможности в исследовании свойств продуктов деления ядер и взаимодействия их с веществом.

Амплитудные спектры продуктов деления с выделенными на электростатическом анализаторе значениями E/e (рис. 4) показали четко разделенные пики, соответствующие определенным значениям зарядов e . Сопоставлением линий с одинаковыми амплитудами для пар таких спектров, снятых при разных значениях отклоняющего напряжения V , определены значения ионных зарядов e пиков спектра и найдены соответствующие им энергии E . Контроль полученных значений E калибровкой полупроводниковых детекторов по методу Шмитта и др. дал хорошо согласующиеся результаты.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА В ИССЛЕДОВАНИЯХ. Из получаемых спектров, подобных приведенным на рис. 4, можно найти распределения продуктов деления ядер по ионным зарядам и по энергиям для данного делящегося вещества и данной его толщины, найти распределения по энергиям продуктов деления с данным зарядом e и установить связь ионных зарядов и энергий продуктов деления. Электростатический анализатор в сочетании с полупроводниковым детектором можно использовать при изучении потерь энергии и перезарядки продуктов деления при прохождении ими тонких слоев различных веществ. Возможно его применение и для анализа состава и энергий легких частиц, испускаемых при делении ядер.

Для определения диапазонов электрического и магнитного полей, при которых продукты деления, прошедшие масс-сепаратор, имеют дос-

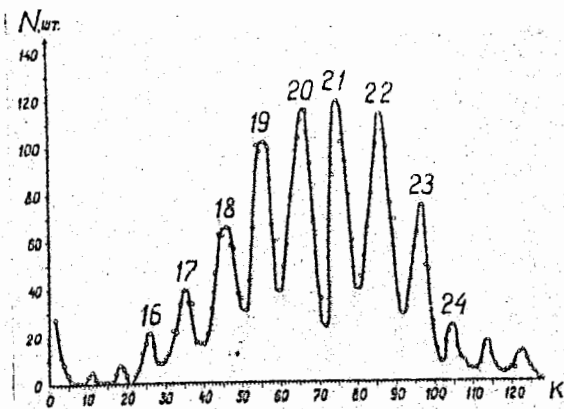


Рис. 4. Амплитудный спектр продуктов деления ядер ^{235}U тепловыми нейтронами, измеренный полупроводниковым детектором, помещенным за электростатическим анализатором. $V = 71,10$ кв, $E/e = 3,268$ Мэв/ e_0 . Числа у пиков - значения ионных зарядов, выраженные через элементарный заряд e_0 .

таточную для регистрации интенсивность, проведен на ЭВМ расчет ожидаемых интенсивностей продуктов деления ядер ^{235}U , характеризующихся определенными значениями массы, энергии и ионного заряда по всему диапазону этих величин, а также соответствующих величин полей V и H . При расчетах исходили из распределений продуктов деления средних масс каждой группы по ионным зарядам (Н.Лассен), контурных диаграмм метода времени пролета с поправками на испускание мгновенных нейтронов и на потери энергии в слое урана, а также характеристик масс-сепаратора.

Измерения спектров M/e продуктов деления в масс-спектрометрическом режиме (полупроводниковым детектором со целью шириной $1,3$ мм, расположенной в фокусе масс-сепаратора) показали, что большинство пиков M/e продуктов деления тяжелой группы хорошо ра-

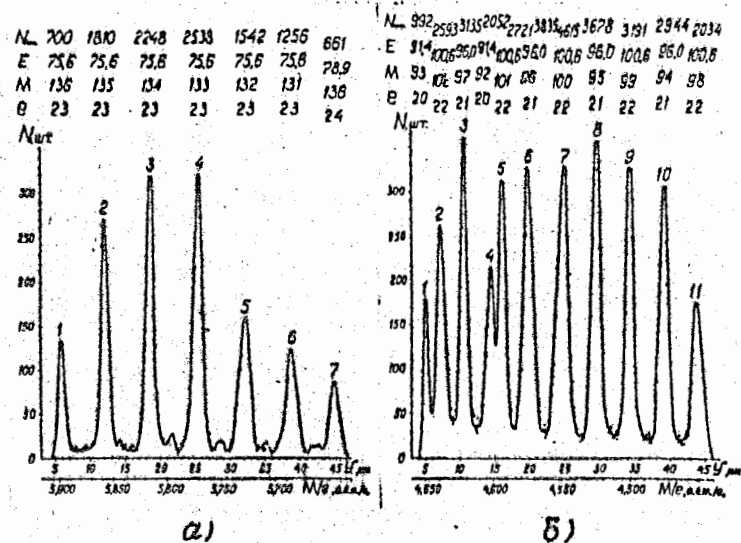


Рис. 5. Участки спектра M/e продуктов деления ядер ^{235}U тепловыми нейтронами, измеренные отдельными трековыми детекторами (участок $\Delta U_m'' = 42,5$ мм при $\alpha_{\text{пл}}'' = 0,110$).
 а) продукты деления тяжелой группы, $V = 71,51$ кв, $E/e = 3,287$ Мэв/ e_0 , $H = 3612,1$ э;
 б) продукты деления легкой группы, $V = 99,46$ кв, $E/e = 4,572$ Мэв/ e_0 , $H = 3780,3$ э.
 $N_{\text{полн.}}$ - полное число треков в пике M/e .
 Числа у пиков - порядковые номера.

зделены при полученной разрешающей способности на $0,1$ высоты пиков $[(M/e)/\Delta(M/e)]_{0,1} \approx 300$. Проводившийся в этих измерениях амплитудный анализ импульсов показал, что большинство линий M/e практически свободны от наложений других линий с близкими значениями M/e , но отличными M и e , и позволил при сравнении полученных амплитудных спектров с пиками амплитудного спектра с соответствующим E/e (рис. 4), для которого уже установлены значения зарядов e , для линии M/e определить заряд θ , а следовательно, и массу

M, и энергию E.

Примененная затем регистрация участка спектра M/e (диапазон его составляет 4,5% от значения M/e в центре пластинки, т.е. 6-15 линий M/e) стеклянными трековыми детекторами позволила увеличить скорость набора данных в 100-200 раз (в зависимости от числа пиков M/e, одновременно регистрируемых на трековом детекторе) и достичь разрешающей способности на 0,5 высоты пиков $[(M/e)/\Delta(M/e)] = 700 - 900$ (разрешение большее для больших радиусов отклонения). Некоторое уменьшение разрешающей способности по сравнению со случаем α -частиц связано в основном с большим разбросом продуктов деления, проходящих в магнитном поле, по скоростям (энергиям) и, отчасти, с увеличенным апертурным углом α'_0 и большим временем измерения. Благодаря высокой разрешающей способности интенсивные пики M/e продуктов деления тяжелой группы полностью отделены друг от друга (рис. 5а). Впервые были получены спектры M/e продуктов деления легкой группы с хорошо разделенными линиями (рис. 5б). Амплитудный анализ линий, проведенный с помощью полупроводникового детектора, показал, что в спектре M/e продуктов деления тяжелой группы почти все линии свободны от наложений (примеси линий с близкими M/e составляют менее 1 - 2%), в спектрах M/e продуктов деления легкой группы существенные наложения наблюдались только в 8% зарегистрированных линий.

Точность определения значений M/e линий найдена равной $\pm 0,06\%$ (по измерениям на разных детекторах). Значения M/e линий совпадают в этих же пределах при измерениях через большие промежутки времени (например, через 0,5 года). Масс-сепаратор позволяет проводить долговременные (до 24 ч) непрерывные измерения спектров M/e без ухудшения разрешающей способности. При этом обеспечивается достаточно высокий набор числа зарегистрированных частиц на линию (до 3000 для продуктов деления тяжелой группы и до 5000 для продуктов деления легкой группы при времени набора около 9 ч и работе реактора на мощности 2 Мвт).

Поскольку при применении трековых детекторов измерение амплитудных спектров линий M/e требует дополнительных затрат значительного времени, нами предложен и применен метод определения ионного заряда по разности значений M/e для линий спектра на одной стеклянной пластинке, отстоящих друг от друга на равных расстояниях в шкале M/e. Метод основан на том, что разность величин

M/e для линий с одним значением заряда E и массами, отличающимися на I а.е.м., обратно пропорциональна величине заряда:

$$\left| \frac{M}{e} - \frac{M \pm I}{e} \right| = \frac{I}{e}. \quad (8)$$

Показано, что точность измерения величины M/e, достигнутая на нашей установке, достаточна для применения этого метода. Значения заряда, найденные этим методом, совпадают со значениями, определенными с помощью амплитудного анализа. Амплитудный анализ необходимо применять лишь в немногих случаях наложения линий M/e, о вероятности чего можно судить, сравнивая экспериментально измеренный спектр M/e с расчетным. Предложенный метод удобен при обработке спектров M/e на ЭВМ.

Таким образом, разработанный масс-сепаратор дает возможность осуществить за время около 1 мсек после акта деления сепарацию в пространстве продуктов деления, характеризующихся определенными значениями массы, энергии и ионного заряда, как тяжелой, так и легкой групп, и с высокой точностью определить эти значения, а также выходы соответствующих продуктов деления.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Полученные характеристики масс-сепаратора незамедленных продуктов деления ядер и измерения на нем спектры продуктов деления показывают, что он может быть применен для проведения большого круга оригинальных исследований.

Поскольку подавляющее большинство линий спектра M/e свободно от наложений, то из измеренных спектров M/e можно получить детальную информацию о распределениях продуктов деления данной массы по энергиям в широком диапазоне масс, о структурных особенностях распределения продуктов деления по массам, о распределениях продуктов деления фиксированных масс по ионным зарядам и скоростям, что дает возможность установить вид зависимости ионного заряда от массы и скорости продуктов деления. Эти работы проводятся в настоящее время для случая деления ядер ^{235}U тепловыми нейтронами.

На масс-сепараторе также может быть проведен широкий круг исследований взаимодействия быстрых многозарядных ионов с определенными значениями массы, энергии и ионного заряда с веществом при вариации этих параметров в широких пределах. Так, в данное время выполняются работы по изучению связи параметров травленных треков в твердотельных трековых детекторах с массой, энергией и зарядом бомбардирующих продуктов деления ядер. Проводится изуче-

ние амплитудного дефекта в полупроводниковых детекторах. Выполнено облучение транзисторов интегральных микросхем. Намечено провести изучение взаимодействия продуктов деления со сцинтилляционными детекторами, потерь энергии продуктов деления при прохождении ими тонких слоев твердых веществ, количества электронов, выбиваемых продуктами деления из твердых веществ.

При увеличении потока нейтронов до 10^{12} нейтр/см².сек на масс-сепараторе станет возможным измерение выходов сепарированных продуктов деления в симметричной области (установление для них связи массы и энергии); измерение длин цепей β -распада, и отсюда - первичных зарядов ядра продуктов деления; изучение рассеяния продуктов деления; изучение распыления веществ продуктами деления; исследование коррелированных изменений энергий (скоростей) и ионных зарядов продуктов деления определенных масс при прохождении через тонкие слои твердых веществ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Впервые в СССР разработан и установлен на горизонтальном канале реактора масс-сепаратор незамедленных продуктов деления ядер, состоящий из последовательно расположенных электростатического и магнитного анализаторов, который обеспечил сепарацию в пространстве продуктов деления, вылетающих из тонкого слоя делящегося вещества, одновременно по массам, энергиям и ионным зарядам за время около 1 мксек после акта деления.

2. Выбор системы масс-сепаратора в виде последовательно расположенных электростатического поля цилиндрического конденсатора и секторного однородного магнитного поля, отклоняющих ионы в противоположные стороны, без промежуточного фокуса между полями, для которых выполняются условия фокусировки первого порядка по углам и скоростям, в согласовании с конструктивными и технологическими возможностями изготовления его узлов и условиями размещения и работы его на горизонтальном канале реактора, обеспечил достижение высокой разрешающей способности масс-сепаратора, равной на 0,5 высоты пиков M/e по участку плоскости детектирования шириной около 40 мм $(M/e)/\Delta(M/e)_{0,5} = 700 - 900$ (выше для больших радиусов отклонения), что в 4,5 - 6 раз превышает разрешающую способность, полученную на масс-сепараторе продуктов деления в ФРГ, и минимальные по сравнению с другими возможными системами поля длину и

поперечные размеры установки. Экспериментально показана применимость ионной оптики Маттауха-Герцога к случаю отклонения ионов на значительно меньшие углы, чем ранее применявшиеся в аналогичных системах поля.

3. Разработанная конструкция масс-сепаратора и его узлов, в частности, разработка дипольного источника регулируемого напряжения на 140 кв с долговременной стабильностью 0,01%, тщательный выбор материалов узлов, обеспечили быструю подготовку масс-сепаратора к измерениям (2-3 ч), возможность проведения длительных непрерывных измерений (до 24 ч), высокую точность и воспроизводимость определяемых значений E/e (центр определяется с точностью $\pm 0,015\%$) и M/e ($\pm 0,06\%$), возможность сепарации продуктов деления по всему диапазону значений M/e и E/e . Расположение электростатического и магнитного анализаторов на перемещаемых по колею с рельсами тележках, снабженных механизмами выставки, позволило легко решить проблему быстрой смены источников делящихся веществ, а также, при необходимости, слоев веществ для торможения продуктов деления, и обеспечило возможность доступа ко всем узлам сепаратора независимо от режима работы реактора, а также удобство и точность юстировочных работ.

4. Проверка ионно-оптических свойств масс-сепаратора с помощью спектрометрического источника α -частиц ^{238}Pu показала их близость к расчетным значениям, а также постоянство калибровочных констант сепаратора во времени. Показана возможность использовать сепаратор в режиме работы как масс-спектрометра, так и масс-спектрографа.

5. Впервые предложенный метод определения ионных зарядов линий спектров M/e продуктов деления по разности значений M/e для равноотстоящих линий, измеряемых отдельным трековым детектором, дал возможность надежно определять значения масс, энергий и ионных зарядов продуктов деления с выделенными на масс-сепараторе значениями E/e и M/e без дополнительных измерений их амплитудных спектров и оказался удобным при обработке спектров на ЭВМ.

6. Благодаря достигнутому высокому значению разрешающей способности сепаратора, помимо спектров M/e продуктов деления тяжелой группы, с широко отделенными пиками, впервые в мировой практике получены спектры M/e продуктов деления легкой группы с четко разделенными линиями. Амплитудным анализом с помощью полупро-

водниковых детекторов показано, что подавляющее большинство пиков M/e практически свободно от наложений пиков близких M/e , но с отличающимися M , E и e . В спектрах M/e продуктов деления легкой группы существенные наложения наблюдаются только в 8% линий.

7. Отсутствие заметных наложений в пиках с данными M , E и e , возможность длительных измерений и использование монитора нейтронного пучка непрерывного действия, состоящего из полупроводникового детектора и слоя ^{235}U , обеспечивает высокую точность определения выходов сепарированных продуктов деления.

8. Из измеренных спектров может быть получена обширная и детальная информация о продуктах деления, связанная как с самим процессом деления ядер, так и с процессами, происходящими в электронной оболочке атома, ядро которого испытывает деление, а также с явлениями, протекающими с продуктами деления при прохождении их через слои веществ.

Массо-сепаратор может быть использован как источник пучков продуктов деления, характеризующихся определенными значениями массы, энергии и ионного заряда, для изучения различных процессов, протекающих при взаимодействии быстрых многозарядных ионов с веществом, а также для измерения длин цепей β -распада продуктов деления и определения по ним первичных зарядов ядра. Возможно его применение и для анализа состава и энергий легких частиц, образующихся при делении ядер.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. У.А.Арифов, А.Д.Беляев, В.И.Коган, В.П.Пикуль, А.М.Усмандияров. "Сепарация осколков деления ядер в электрическом и магнитном полях". Доклады АН СССР, 204, 586(1972); *Sov. Phys. Techn. Phys.*, 17, 485(1972).
2. У.А.Арифов, А.Д.Беляев, В.И.Коган, В.П.Пикуль, Р.В.Тепляков, А.М.Усмандияров. "Электростатический анализатор для сепарации осколков деления". Приборы и техника эксперимента, № 6, 34(1972).
3. У.А.Арифов, А.Д.Беляев, Г.З.Галимов, В.И.Коган, В.П.Пикуль, А.М.Усмандияров. "Двупольный стабилизированный выпрямитель на напряжение от 5 до 70 кВ". Приборы и техника эксперимента, № 3, 157(1973).
4. У.А.Арифов, В.И.Коган. "Учет аббераций при расчете разрешающей способности некоторых масс-спектрометров". Известия АН УэССР,

серия физико-математических наук, № 5, 59(1973).

5. У.А.Арифов, А.Д.Беляев, В.И.Коган, В.П.Пикуль, А.М.Усмандияров. "Монитор тепловых нейтронов". Известия АН УэССР, серия физико-математических наук, № 4, 92(1973).
6. *U.A. Arifov, A.D. Belyaev, V.I. Kogan, V.P. Pikul, A.M. Usmandiarov, V.A. Koslov, N.V. Petrov, "Fission fragments separation according to mass, energy and effective charge in electrical and magnetic fields". Proc. of the 8th Intern. EMIS Conference on low energy ion accelerators and mass separators, Göteborg, 1973, p. 226.*

УзНИИТИ Изд. № 1354/77 Тираж 200 Р 05782 Заказ № 1139