

С 344.70

8/11-70

41

ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 4763



В.П. Афанасьев, А.Т. Василенко, И.И. Громова,
Ж.Т. Желев, В.В. Кузнецов, М.Я. Кузнецова,
Д. Мончка, Ю. Поморски, В.И. Райко,
А.В. Ревенко, В.М. Сороко, В.А. Уткин

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МАСС-СЕПАРАТОР
ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

1969

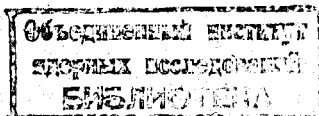
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

62370
серия 810

13 - 4763

В.П. Афанасьев, А.Т. Василенко, И.И. Громова,
Ж.Т. Желев, В.В. Кузнецов, М.Я. Кузнецова,
Д. Мончка, Ю. Поморски, В.И. Райко,
А.В. Ревенко, В.М. Сороко, В.А.Уткин

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МАСС-СЕПАРАТОР
ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ



I. Введение

На протяжении ряда лет в Лаборатории ядерных проблем ведутся исследования свойств ядер методами ядерной спектроскопии. Для этих исследований используются радиоактивные ядра, получающиеся при облучении различных мишеней протонами высоких энергий на синхротроне ЛЯП ОИЯИ. Даже при очень хороших химических методах разделения радиоактивных элементов проведение спектроскопических исследований и интерпретация полученных результатов значительно затруднены из-за присутствия большого числа изотопов в каждом выделенном элементе. Очевидно, что необходимым дополнением к химическому разделению по элементам является последующее разделение радиоактивных продуктов по массам с помощью масс-сепаратора.

Электромагнитный масс-сепаратор лабораторного типа построен в Отделе ядерной спектроскопии и радиохимии в 1968 году. В настоящей статье приводится описание конструкции, ионно-оптические характеристики и результаты первых опытов по разделению стабильных изотопов ксенона и неодима.

II. Магнитный анализатор

В описываемом масс-сепараторе ионный пучок анализируется и фокусируется в магните секторного типа с плоскопараллельным зазором. Магнитный анализатор выполнен на основе электромагнита СП-57 А-1 промышленного производства^{1/} и по своим характеристикам является копией анализатора масс-сепаратора ЛЯР^{2,3/}.

Расстояние между полюсами магнита $h = 79$ мм. Радиус кривизны $R_0 = 700$ мм, угол поворота Φ главного луча $= 90^\circ$. Расстояние от эффективной границы магнитного поля до ионного источника $l_1 = 1,86 \cdot R_0 = 130$ см, а от эффективной границы до фокальной плоскости $l_2 = 1,16 \cdot R_0 = 81$ см. Угол входа луча в магнитный анализатор $\epsilon_1 = 0^\circ$, а угол выхода луча из анализатора $\epsilon_2 = 45^\circ$. При этом коэффициент увеличения в горизонтальной плоскости G и дисперсия D , согласно расчёту^{2/}, должны быть $G = -1,1$; $D = 11,6$ мм на 1% изменения массы.

Для того чтобы исключить угловые aberrации второго порядка в точке фокуса, в анализаторе масс используются круговые границы магнита^{4,5/}. Линейный спад рассеянного магнитного поля обеспечивается экранами (7) и (8) у входной и выходной границ полюсных наконечников (9) (рис. 1).

Распределение вертикальной составляющей напряженности рассеянного поля в медианной плоскости прибора измерялось по эффекту Холла магнитометром ИМИ-3. Полученное распределение напряженности магнитного поля вдоль радиусов кривизны полюсных наконечников приведено на рис. 2. Из рисунка видно, что спад напряженности магнитного поля в зазоре между полюсным наконечником и экраном практически линейный. Протяженность спада поля составляет 89 мм, расстояние от полюсного наконечника до эффективной границы ≈ 27 мм.

Измерения топографии однородного магнитного поля между полюсными наконечниками проводились с помощью ядерного магнитометра^{6/}. При измерениях напряженности магнитного поля в медианной плоскости магнита использовался пантограф от чертежного механизма Кульмана с прикрепленным к нему на длинном держателе датчиком магнитной индукции. Положение датчика внутри разделительной камеры, находящейся в магнитном поле масс-сепаратора, определялось методом копирования с помощью координатной сетки, размещенной на горизонтальной доске вместе с пантографом. Координаты сетки соответствовали положению датчика внутри камеры, которое определялось с точностью ± 2 мм. Отклонение напряженности магнитного поля от среднего значения в направлении хода главного луча показано на рис. 3.

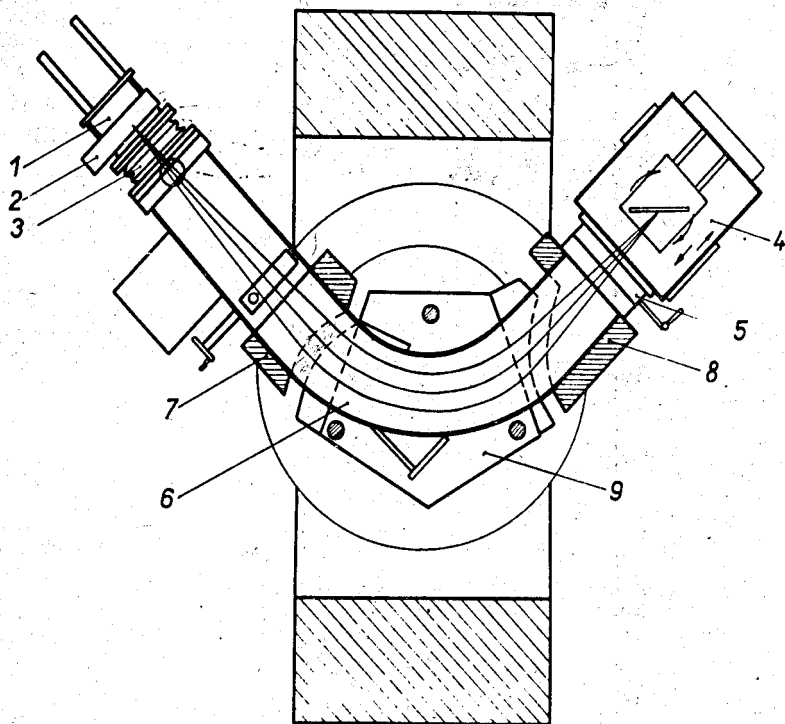


Рис. 1. Схематический чертеж масс-сепаратора. 1 - камера ионного источника; 2 - ярмо магнита ионного источника; 3 - изолятор; 4 - приемная камера; 5 - шибер; 6 - разделительная камера; 7 - экран у входа в магнит; 8 - экран выхода; 9 - полюсной наконечник.

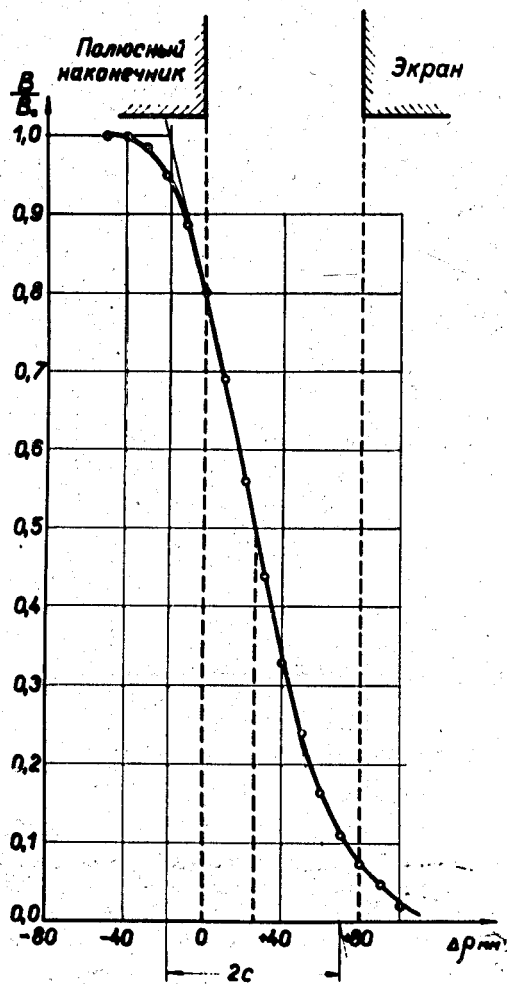


Рис. 2. Распределение вертикальной составляющей напряженности магнитного поля в медианной плоскости в области границ масс-сепаратора. $B_0 = 6000$ гс; $2C = 89$ мм. Средняя пунктирная линия указывает эффективную границу магнитного поля.

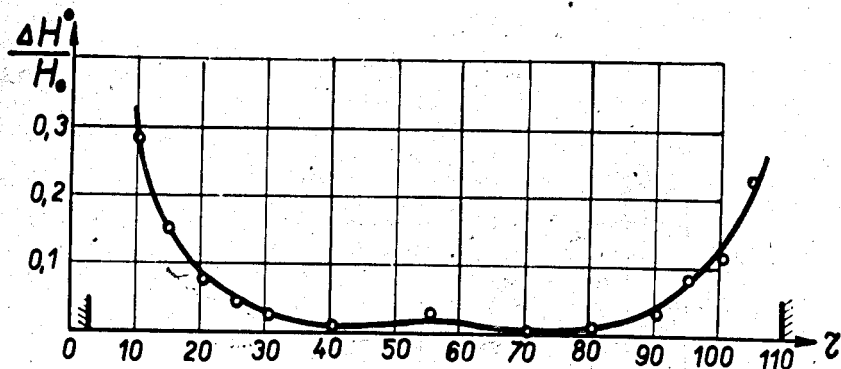


Рис. 3. Отклонение напряженности магнитного поля от среднего значения 6000 гс в направлении главного луча.

III. Вакуумная система

Вакуумная система схематически изображена на рис. 4. Откачке подлежат разделительная камера (1), камера приемного устройства (2), камеры ионного источника (3) и патрубков (4), соединяющий ионный источник с разделительной камерой. Откачиваемый объем приблизительно равен $0,25 \text{ м}^3$. Давление в рабочем объеме до начала разделения должно быть не выше $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст. для обеспечения нормальных условий прохождения ионного пучка. Это достигается путем откачки системы двумя диффузионными паромасляными насосами типа Н-5Т и Н-2Т. Оба насоса от вакуумного объема отделяются шиберами (7 и 8) и снабжены ловушками (9 и 10), охлаждаемыми жидким азотом. В качестве форвакуумных насосов используются два механических вакуумных насоса (11 и 12) типа ВН-1МГ. Один из этих насосов (12) служит форвакуумным для диффузионных насосов (5 и 6). Второй (11) откачивает систему начиная с атмосферного давления. Возможность вести откачку сразу двумя насосами значительно уменьшает время, необходимое для получения рабочего давления в системе. Фактически затрачивается только время до начала работы диффузионного насоса. Преимущества параллельной системы форвакуумной

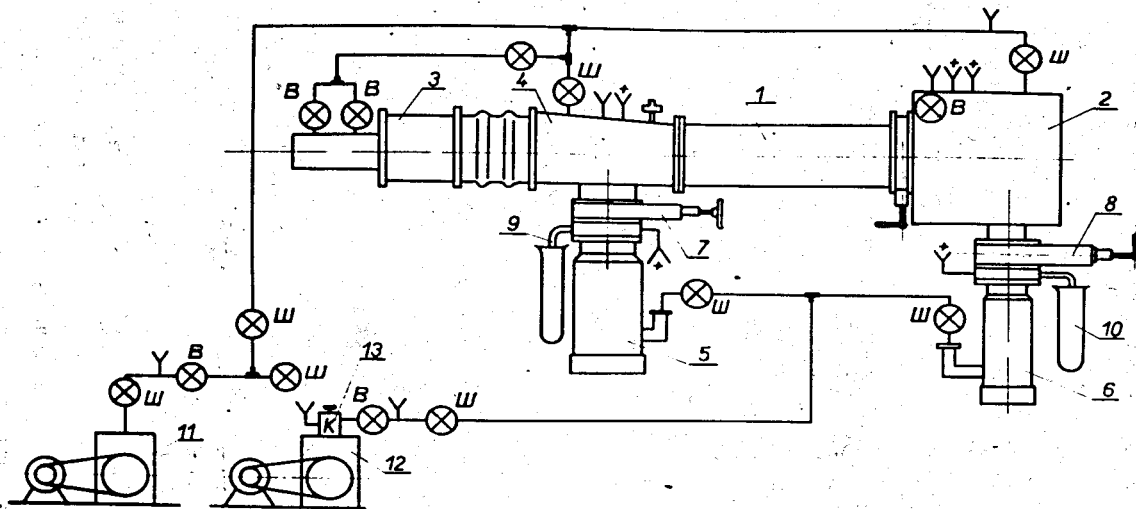


Рис. 4. Вакуумная система.

откачки еще более очевидны при неизбежных случаях напуска воздуха в откачиваемый объем. На форвакуумном насосе (12) установлен электромагнитный клапан (13), препятствующий попаданию воздуха в работающие диффузионные насосы при аварийном отключении электропитания форвакуумного насоса. Контроль за откачкой системы ведется с помощью термометрических (ЛТ-2) и манометрических (ЛМ) ламп. Показания ламп, расположенных около ионного источника, у насосов и на приемной камере, выводятся на пульт управления сепаратора, что позволяет во время разделения наблюдать за давлением в рабочем объеме.

IV. Ионный источник

Выбор типа и конструкции ионного источника сделан с учетом того, что основным назначением масс-сепаратора является получение радиоактивных препаратов для спектроскопических исследований.

Прототипом данного ионного источника послужил ионный источник ¹⁷¹, используемый в Орсе для разделения радиоактивных изотопов, который позволяет быстро изменять условия работы, что необходимо для разделения радиоактивных изотопов с различными свойствами. По типу данный ионный источник относится к плазменным разрядным источникам с боковой экстракцией ионов. Схематический чертёж ионного источника представлен на рис. 5.

Источник снабжен двумя взаимозаменяемыми разрядными камерами: одна со съёмной выходной щелью, другая - более герметичная - с постоянной выходной щелью. Разрядная камера (1), изготовленная из графита, является анодом. Кроме щелевого отверстия (2) в ней имеется два отверстия диаметром 10 мм в задней стенке, через которые пары испаряемого вещества попадают в разрядную камеру. Сверху через изолятор из окиси алюминия (3) вставляется катод (4), изготовленный из вольфрамовой проволоки ϕ 2,5 мм в виде шпильки. Закругленный конец катода сфрезеровывается таким образом, чтобы сечение этой части катода было равно 1 мм^2 . Изолятор катода снизу защищается от напыления танталовым экраном. Разрядная камера по внешней стороне боковых стенок имеет нагреватель (5), выполненный из вольфрамовой проволоки ϕ 0,6 мм, проходящей в ка-

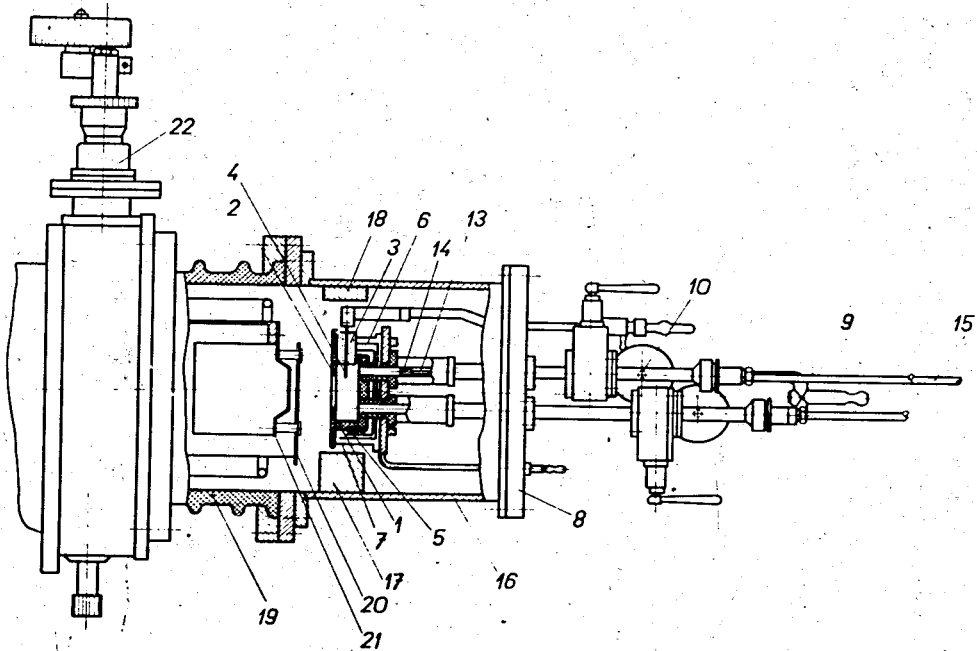


Рис. 5. Ионный источник.

пиллярных трубочках из окиси алюминия. Сверху на камеру надевается три тепловых экрана (6), изготовленных из молибденовой жести. Вместе с тепловыми экранами разрядная камера вставляется в кожух (7), который имеет четыре боковых стенки, изготовленные из нержавеющей стали толщиной 1 мм; задняя стенка представляет собой медную пластинку, охлаждаемую проточной дистиллированной водой. К задней стенке кожуха прикрепляется фрезерованный цилиндр, с помощью которого разрядная камера устанавливается на входном фланце (8). Во фланце имеется два сквозных отверстия, через которые в ионный источник вводятся вещества, подлежащие разделению. Наличие двух систем ввода обеспечивает возможность разделения сравнительно короткоживущих радиоактивных изотопов, благодаря тому, что короткоживущий изотоп может быть введен в ионный источник, уже работающий на маркирующем веществе. Система ввода состоит из держателя образцов (9), вакуумного шлюза (10) и кварцевой трубки (11), по которой образец продвигается в печь (12) для испарения. Печь выполнена из графитового цилиндра и двух молибденовых экранов. Нагреватель печи изготовлен из вольфрамовой проволоки ϕ 0,6 мм, проходящей в капиллярных трубках из окиси алюминия.

Держатель образцов представляет собой трубку из нержавеющей стали с внутренним ϕ 4 мм. На одном конце трубки приварена пружинящая цапга из молибдена (13), в которую вставляется ампула (14) из кварца или другого материала с веществом, подлежащим разделению. Другой конец трубки (15) присоединяется резиновым шлангом к системе напуска газа. Из этой системы в ионный источник может быть подан либо инертный газ ксенон, либо пары CCl_4 для хлорирования твердых образцов во время разделения. Количество газа или пара, поступающего в ионный источник, регулируется игольчатым вентилем. Игольчатый вентиль снабжен электроприводом, что позволяет регулировать количество газа с пульта управления масс-сепаратора.

Собранный на фланце (8) ионный источник вставляется в вакуумный кожух (16). Снаружи вплотную к стенкам кожуха установлено ярмо магнита ионного источника. Для уменьшения зазора между полюсами внутри кожуха укреплены стальные бруски (17 и 18), служащие продолжением

магнитопровода. Кожух ионного источника, который находится под напряжением до 50 кв, присоединяется к отсеку электронной оптики через изолятор (19), изготовленный из ситала.

Экстракция ионного пучка осуществляется ионно-оптической системой, состоящей из двух электродов. На электрод (20), расположенный перед щелью ионного источника, подается напряжение, величина которого может изменяться от 0 до - 20 кв. Второй электрод (21) заземлен. Оба электрода укреплены на пластинке, которая может перемещаться в трех направлениях относительно щели ионного источника. Перемещение ионно-оптической линзы осуществляется снаружи, без нарушения вакуума, при помощи механизма (22).

V. Приемное устройство

Сбор разделенных изотопов производится на коллектор приемной камеры, изготовленной из нержавеющей стали. От разделительной камеры она отделена шибером, что позволяет производить смену коллектора, не нарушая вакуума в основной системе. На верхней и двух боковых сторонах приемной камеры имеются окна из органического стекла, через которые можно визуально наблюдать спектр масс. Задняя стенка приемной камеры съемная, может перемещаться по направляющим. На ней укреплен подвижный столик, на котором монтируется коллектор, цилиндры Фарадея, игольчатые электроды стабилизирующего устройства, сканер. Коллектор представляет собой пластину из нержавеющей стали, к которой рамкой прижимается фольга. Коллектор можно перемещать вдоль центральной траектории на ± 40 мм от среднего положения, поворачивать относительно вертикальной оси в пределах 70° и опускать вниз за защитный экран. Все эти перемещения можно производить как вручную, так и при помощи электродвигателей без нарушения вакуума в приемной камере.

VI. Система электропитания

Система электропитания масс-сепаратора представлена в виде блок-схемы на рис. 6.

Питание электрических цепей масс-сепаратора осуществляется от двух мотор-генераторов. Один из них питает стабилизированным током магнит анализатора. Стабилизатор типа БТ-4М поддерживает ток в цепи нагрузки с точностью до 0,03%. Стабилизация питания ионного источника и ионно-оптической системы осуществляется по первичной цепи, для чего применяется второй мотор-генератор со стабилизатором, собранным на базе стойки БТ-4М, обеспечивающим стабилизацию напряжения с точностью до 0,5%. В системе питания ионного источника и ионно-оптической системы применяются четыре выпрямителя, собранные по мостовой схеме на полупроводниковых вентилях типа ВК-2. Печи I и II нагреваются переменным током. Так как весь ионный источник находится под ускоряющим напряжением (до 50 кв), то низковольтное питание осуществляется с помощью разделительных трансформаторов. По этой же причине приборы, включенные во вторичную цепь, смонтированы на отдельном щите, укрепленном на изоляторах над пультом масс-сепаратора. В первичную обмотку разделительных трансформаторов включены вариаторы напряжения типа РНО-50, расположенные в пульте масс-сепаратора. С их помощью производится регулировка параметров питания всех узлов ионного источника и ионно-оптической системы. Источником высокого напряжения служит выпрямитель ВС-50-50 (напряжение 50 кв при токе 50 ма). Последующая стабилизация с точностью 10^{-4} осуществляется с помощью стабилизатора компенсационного типа с отрицательной обратной связью. Отрицательное напряжение на первый электрод ионно-оптической системы подается с выпрямителя ВС-20-10 (напряжение 20 кв при токе 10 ма). Величина напряжения также регулируется с пульта управления масс-сепаратора. Для контроля формы и положения линий масс на коллекторе используется генератор пилообразного напряжения, осуществляющий модуляцию ускоряющего напряжения. В результате модуляции ионный пучок сканируется с частотой ≈ 50 гц относительно щели шириной 1 мм в цилиндре Фарадея. Спектр масс наблюдается на экране осциллографа, вмонтированного в пульт уп-

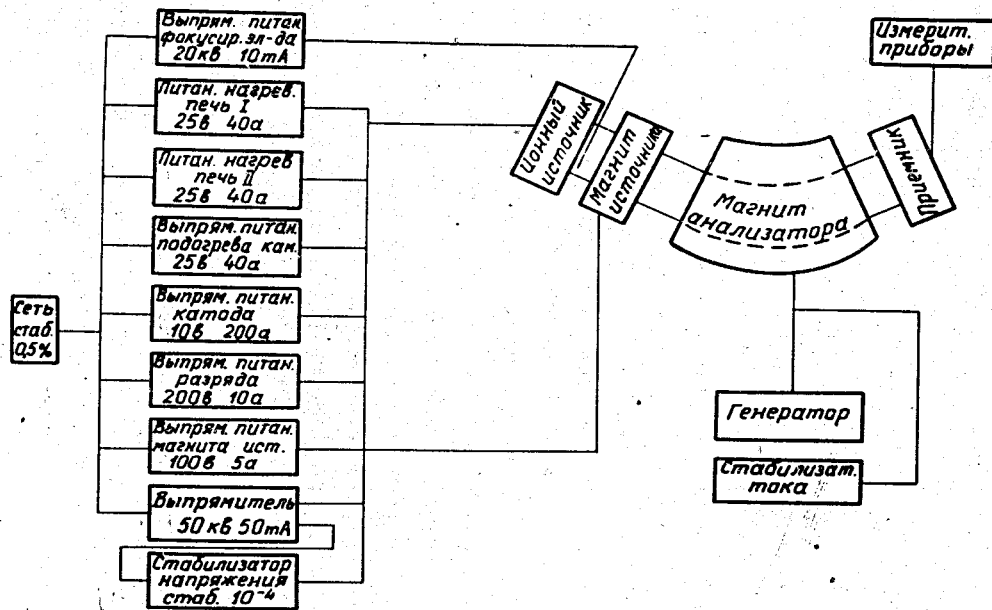


Рис. 6. Блок-схема электропитания.

равления масс-сепаратора. Предусмотрен контроль за положением пучка на коллекторе с помощью компенсационной схемы. Линия реперной массы ограничивается с двух сторон игольчатыми электродами. В соответствии с выбранным соотношением ионных токов, приходящихся на электроды, электронная схема автоматически изменяет ускоряющее напряжение, поддерживая неизменным положение ионного пучка.

VI. Предварительные результаты

Для исследования характеристик масс-сепаратора в качестве рабочего вещества был использован ксенон. На рис. 7 представлена осциллограмма спектра масс ксенона, полученного на описываемой установке. Разрешающая способность, как видно из рисунка, не менее 900. Эффективность разделения ксенона $\approx 5\%$. Эффективность разделения неодима колеблется от 0,8 до 2%.

С помощью зондов, расположенных перед входом в магнитный анализатор, производилось измерение расходимости ионного пучка в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При измерениях специальных мер по подавлению вторичных электронов не принималось. Типичные кривые горизонтальной расходимости приведены на рис. 8. Как видно из рисунка, горизонтальная расходимость ионного пучка существенно меняется с изменением расстояния d между щелью ионного источника и линзой. Подобное же изменение горизонтальной расходимости наблюдается и при изменении величины тока ионов I^+ , вытягиваемых из ионного источника, рис. 9. Изменяя параметры d и I^+ , можно менять угловую расходимость пучка в горизонтальной плоскости в широких пределах и поддерживать ее меньше 6° , что, согласно расчёту, необходимо для хорошей фокусировки. Кроме того, эти кривые позволяют выбрать условия вывода пучка и режим работы ионного источника. Незначительное влияние на горизонтальную расходимость пучка оказывает фокусирующее напряжение. Как видно из рис. 10, с увеличением U_ϕ расходимость уменьшается. Необходимое распределение ионного пучка в вертикальной плоскости было получено после установки двух горизонтальных пластин выше и ниже выходной щели. Кривая, характеризующая распределение ионного пучка в вертикальной плоскости, приведена на рис. 11.

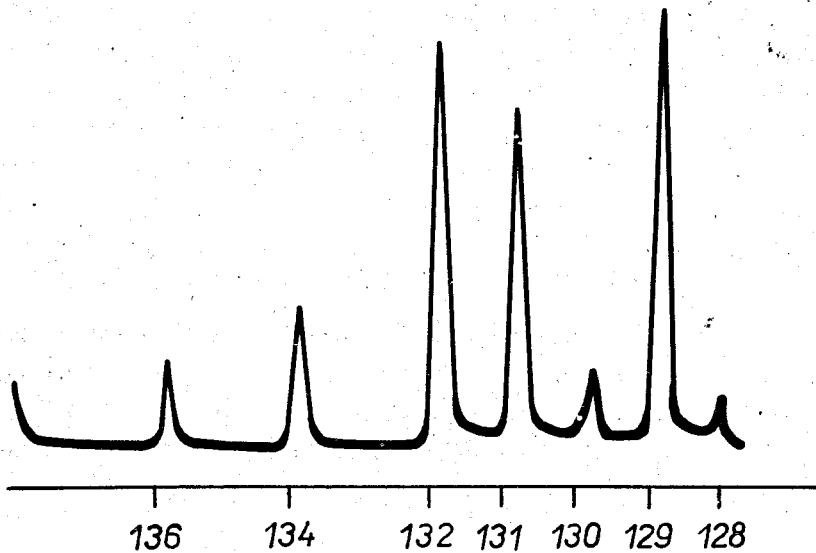


Рис. 7. Спектр масс ксенона.

Начато разделение радиоактивных изотопов. Были выделены моноизотопы тербия, празеодима, диспрозия, неодима и лантана. По интенсивным линиям γ -спектров изотопов установлено, что примесь соседней массы не превышает 3%. На рис. 12 приведены участки спектров гамма-лучей разделенных изотопов ^{151}Tb и ^{152}Tb .

В заключение мы пользуемся случаем выразить признательность члену-корреспонденту АН СССР В.П.Джелепову, профессору К.Э.Александрю и доктору физико-математических наук К.Я.Громову за постоянный интерес и поддержку при создании масс-сепаратора.

Мы благодарны сотрудникам Лаборатории ядерных реакций, возглавляемой академиком Г.Н.Флеровым, Н.И.Тарантину, В.А.Чугрееву, Ю.А.Дьячичину, А.В.Демьянову, А.П.Кабаченко, В.В.Кораблинову, Н.С.Иванову и О.П.Логинову за консультации и полезные советы.

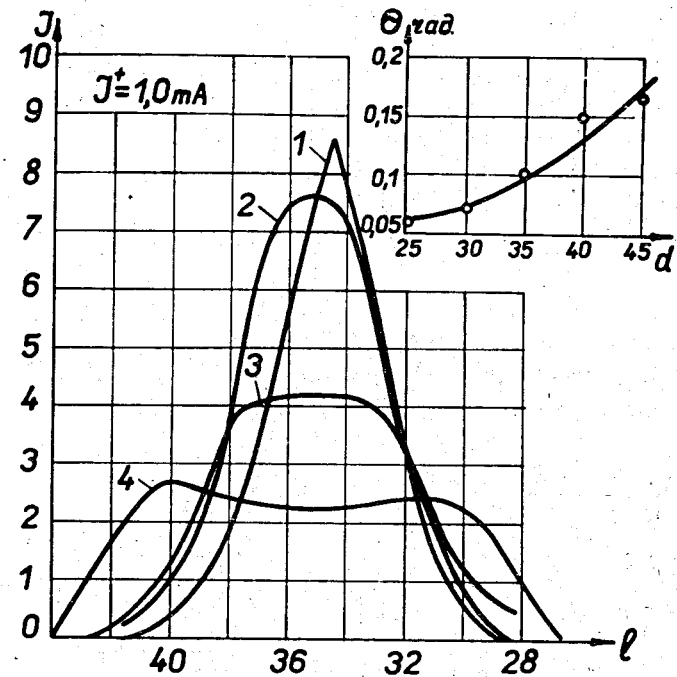


Рис. 8. Зависимость расходимости ионного пучка в горизонтальной плоскости от расстояния между плоскостью выходной щели и линзой, 1 - при $d = 25$; 2 - при $d = 30$; 3 - при $d = 35$; 4 - при $d = 45$.

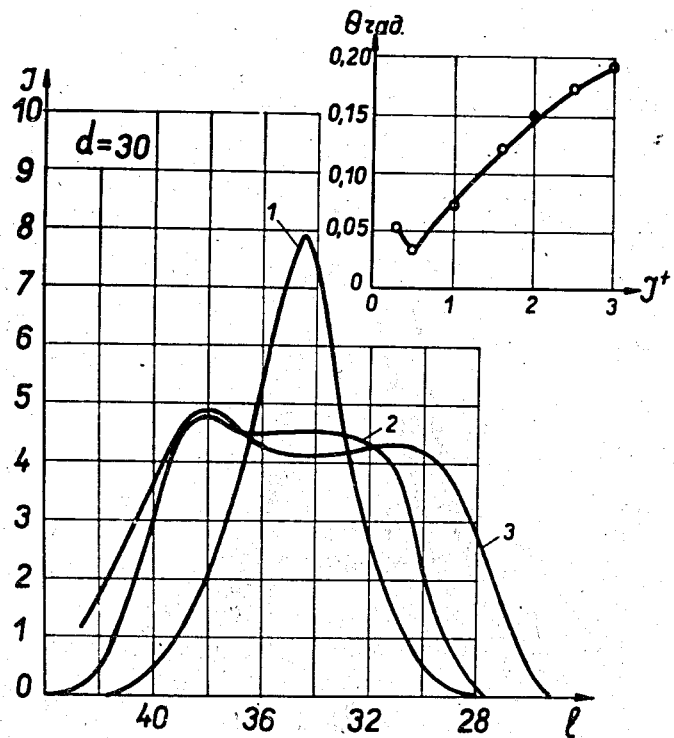


Рис. 9. Зависимость расходимости ионного пучка в горизонтальной плоскости от силы тока ионов, вытягиваемых из ионного источника. 1 - при $I^+ = 0,3$; 2 - при $I^+ = 1,6$; 3 - при $I^+ = 3,0$ мка.

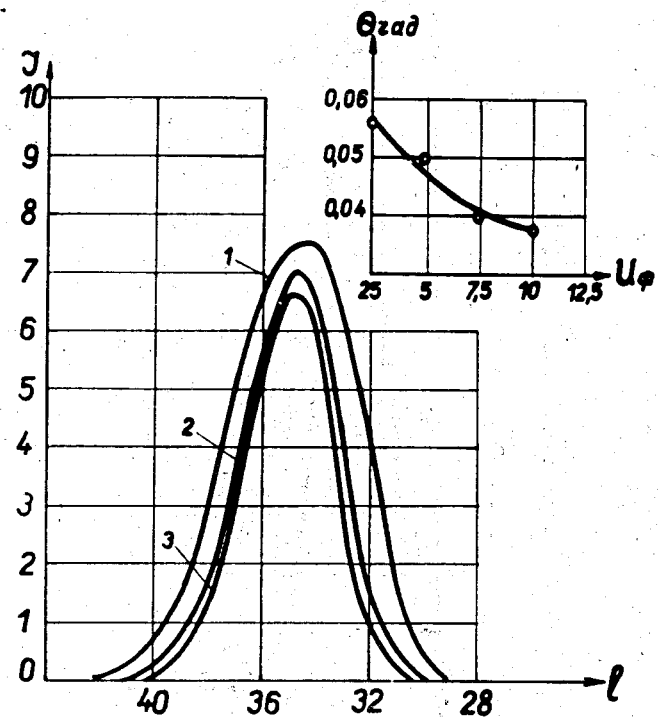


Рис. 10. Зависимость расходимости ионного пучка в горизонтальной плоскости от величины фокусирующего напряжения. 1 - при $U_\phi = 2,5$ кв; 2 - при $U_\phi = 7,5$ кв; 3 - при $U_\phi = 10$ кв.

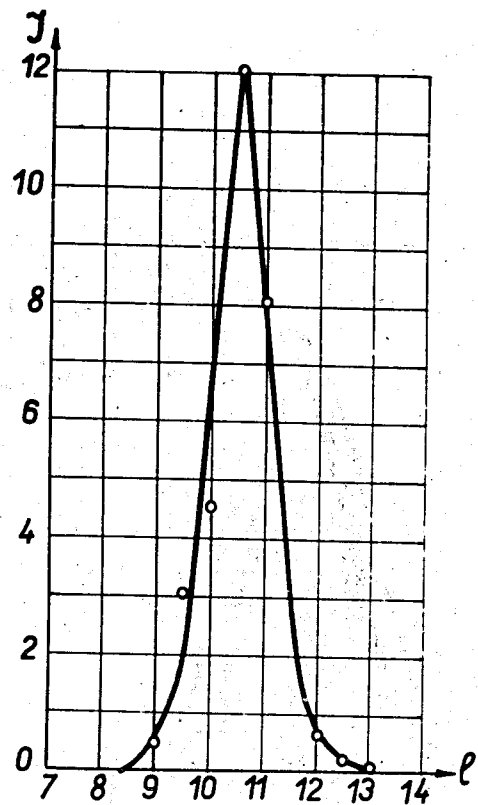


Рис. 11. Расходимость ионного пучка в вертикальной плоскости.

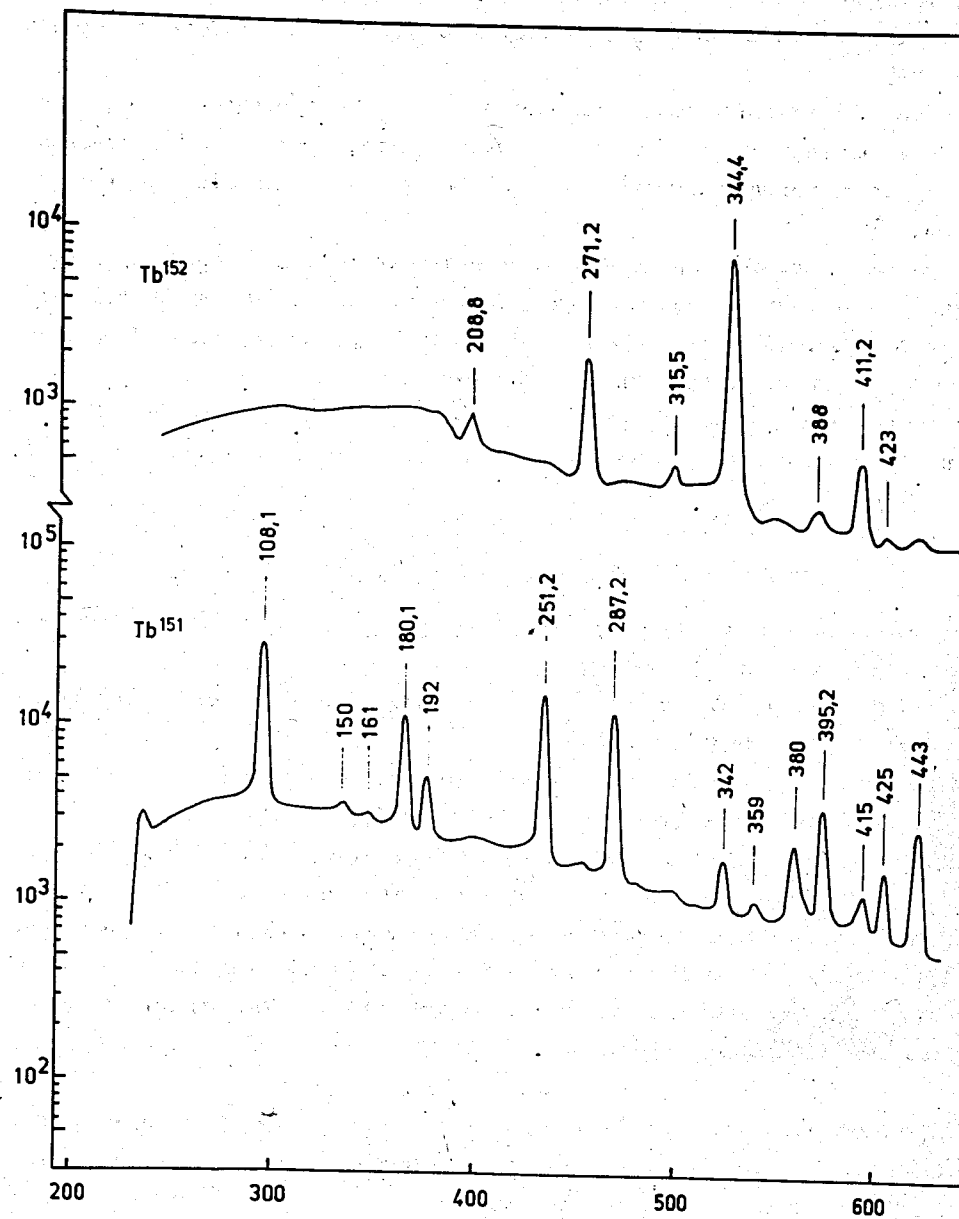


Рис. 12. Участки спектров гамма-лучей ¹⁵¹Tb и ¹⁵²Tb.

Авторы благодарны В.Г.Чумину, Н.А.Лебедеву, Х.Тырроффу, В.М.Щупко-Ситникову, П.Шошеву, Н.И.Фролову и Б.Корнееву за советы и помощь в работе.

Мы благодарны всем сотрудникам ЭММ, руководимым К.А.Байчером, принимавшим участие в изготовлении механических узлов масс-сепаратора. Особенно признательны мы В.П.Токарскому, В.Власову и Н.И.Семенову.

Авторы приносят благодарность начальнику ЭТО А.И.Смирнову и сотрудникам этого отдела В.И.Смирнову, В.В.Ахманову, Ф.Е.Гугнину, Б.В.Дегтяреву, Н.В.Дегтяреву, Н.П.Чистякову и В.Ф.Мишину за разработку, монтаж и наладку системы электропитания масс-сепаратора.

Мы благодарны В.Д.Плужникову, В.А.Быстрову, Г.Илиеву и В.С.Горбачеву за выполнение механических работ при сооружении масс-сепаратора.

Л и т е р а т у р а

1. *Электрофизическая аппаратура промышленного изготовления. Справочник.* М., Госатомиздат, 1963 г.
2. Н.И.Тарантин, А.В.Демьянов. *Расчёт магнитного анализатора масс-сепаратора.* ПТЭ, 1966 №1 41-45.
3. А.В.Демьянов, Н.И.Тарантин. *Описание электромагнитного масс-сепаратора и его характеристики.* ПТЭ, 1966, №2, 28.
4. Н.Г.Афанасьев, А.В.Высоцкая, В.А.Гольдштейн. ПТЭ, 1963, №5, 29.
5. Н.Т.Афанасьев, А.В.Высоцкая, В.А.Гольдштейн. ПТЭ, 1963, №5, 34.
6. Ю.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич. *Измерительная техника, 1968, №2, 56.*
7. J.L.Sarrony, J.Camplan, J.S.Dionisio. *Ion sources for fast electromagnetic separations of radioisotopes and their application to nuclear physics. Nucl.Instr. and Methods 1965, 38, 29.*
8. I.Chavet. *Etude de la production des ions et de la formation du faisceau dans un separateur electromagnetique d'isotopes. Theses 1965 Centre d'Orsay.*

Рукопись поступила в издательский отдел

10 ноября 1969 года.