

П-321

16/IX-

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13 - 3953



А.В.Демьянов, А.П.Кабаченко, О.П.Логинов,
Н.И.Тарантин, Х.Тырофф

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
ИОННОГО ИСТОЧНИКА МАГНЕТРОННОГО
ТИПА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ СЕПАРАТОРЕ
В ЛИНИИ С ЦИКЛОТРОНОМ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

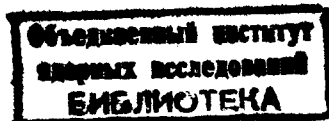
1968

P13 - 3953

А.В.Демьянов, А.П.Кабаченко, О.П.Логинов,
Н.И.Тарантин, Х.Тырофф

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
ИОННОГО ИСТОЧНИКА МАГНЕТРОННОГО
ТИПА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ СЕПАРАТОРЕ
В ЛИНИИ С ЦИКЛОТРОНОМ**

Направлено в АЭ



7132/2 up.

Потребности быстрой идентификации и исследования свойств короткоживущих радиоактивных ядер привели в последнее время к необходимости создания специальных быстродействующих масс-спектрометров и электромагнитных сепараторов изотопов, работающих в линии с ускорителями заряженных частиц или ядерными реакторами (о быстродействующих масс-спектрометрах и сепараторах изотопов см., например, обзоры^{1,2/}). Отличительная особенность установок этого типа состоит в том, что обрабатываемые в ядерных реакциях радиоактивные атомы быстро вводятся в ионный источник непрерывно действующего масс-спектрометра или сепаратора, а регистрация радиоактивного распада сепарированных атомов и измерения характеристик их излучений производится сразу после разделения с помощью счётно-измерительной аппаратуры, установленной внутри приемной камеры. В таких установках условия работы ионного источника существенно иные, чем в случае обычных "вне линий" спектрометров или сепараторов изотопов. Поэтому в связи с созданием в ЛЯР ОИЯИ быстродействующего электромагнитного сепаратора изотопов в линии с циклотроном тяжелых ионов нами были предприняты некоторые исследования одного из типов газоразрядного источника с целью уточнения специфики его работы в режиме, близком к режиму работы "в линии".

2. Работа проводилась с источником магнетронного типа, аналогичным по конструкции источнику^{3/}. На рис. 1 приведен схематический чертеж ионного источника: 1) разрядная камера (графит), одновременно служащая анодом; 2) пустотелый цилиндрический катод (тантал); 3) изоляторы (нитрид бора); 4) токоподводы; 5) тигель печи (графит); 6) нагреватель печи (тантал); 7) загрузочная ложка (графит); 8) выход

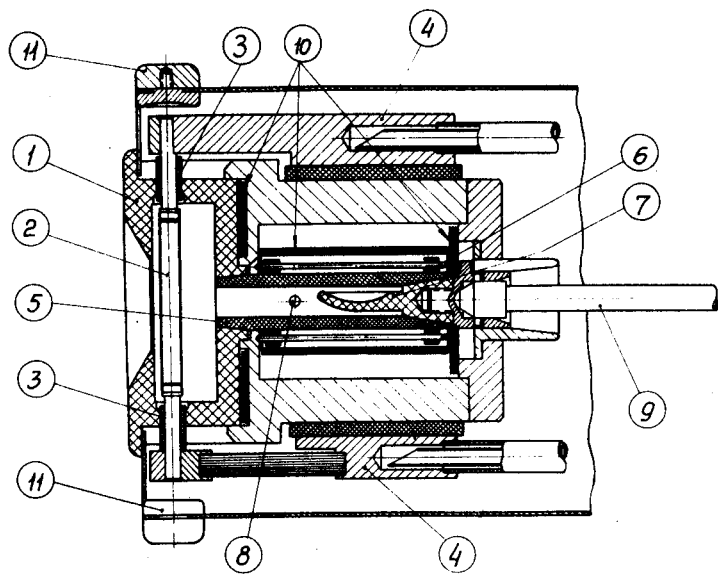


Рис. 1. Схематический чертеж ионного источника.

трубки подачи газа; 9) шток для ввода загрузочной ложки; 10) тепловые экраны; 11) промежуточные полюсные наконечники. Размер эмиссионной щели $30 \times 1,5 \text{ мм}^2$. Диаметр катода и внутренний диаметр камеры 6 и 15 мм соответственно.

Расположение ионного источника и некоторых других элементов в камере электромагнитного сепаратора/4/ показано на рис. 2: 12) ионный источник; 13) шлюз для ввода в ионный источник загрузочной ложки с веществом; 14) окно для наблюдения за вводом; 15) электроды системы ускорения и электростатической фокусировки ионного пучка; 16) электромагнит с разъемным магнитопроводом; 17) съемный фланец.

3. Одна из особенностей работы электромагнитного сепаратора в линии с ускорителем заряженных частиц состоит в том, что количество радиоактивных атомов, образующихся в ядерных реакциях и подлежащих электромагнитной сепарации, очень мало. Поведение в ионном источнике таких малых количеств вещества, измеряемых миллионными долями микрограмма, может существенно отличаться от поведения более весомых количеств. Это, в частности, связано с тем, что разрозненные атомы не образуют единой твердой или жидкой фазы и, например, их испарение не характеризуется соответствующими макрофизико-химическими константами данного вещества: температурой и теплотой парообразования. В этом случае определяющими являются не процессы испарения и конденсации данного вещества, а процессы десорбции и сорбции данных атомов на различных веществах, входящих в конструкцию ионного источника. Поэтому температурный и другие режимы работы ионного источника, оптимальные, например, для обеспечения максимальной эффективности, могут быть различными при работе с макро- или с ультрамикроколичествами одного и того же вещества. Выявлению этого возможного различия и была посвящена первая часть настоящей работы.

4. Электрический разряд в ионном источнике горел на аргоне, к которому в небольшой доле добавлялся ксенон или радиоактивный свинец. В этом случае, как и при работе в линии с ускорителем, параметры газового разряда определялись поступлением главной компоненты питающего газа (аргона) и практически не зависели от примесей. Характерные кривые взаимной связи параметров разряда для используемого в

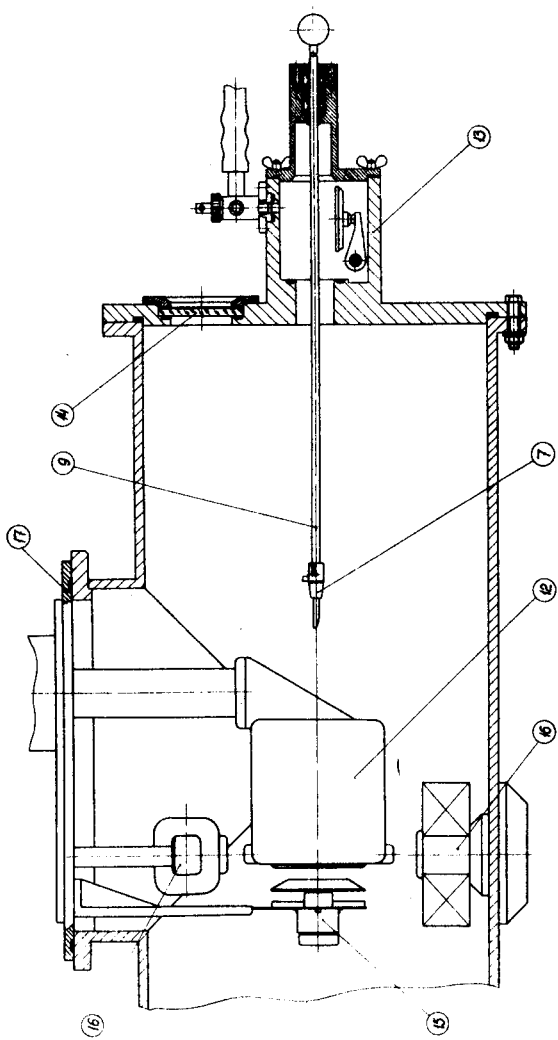


Рис. 2. Схематический чертеж размещения ионного источника и вакуумного шлюза.

опытах источника приведены на рис. 3. Каждая из кривых, построенных по данным, представленным кружками, дает зависимость разрядного тока $I_{\alpha-k}$ от одного из четырех варьируемых непосредственно параметров разряда при фиксированном значении трех остальных. Эти параметры - разность потенциалов между анодом и катодом $V_{\alpha-k}$, ток накала катода I_k , индукция внешнего магнитного поля B и скорость поступления газа в разрядную камеру κ .

Зависимость $I_{\alpha-k}$ от $V_{\alpha-k}$, I_k , B и κ отражает основные закономерности разряда в плазменных ионных источниках с поперечным магнитным полем, наиболее детально исследованные в работе [5]. Ток разряда $I_{\alpha-k}$, представляющий собою в основном ток испускаемых катодом электронов, определяется электронной эмиссией катода и напряженностью электрического поля, отсасывающего эмитируемые электроны. Величина электронной эмиссии, в свою очередь, определяется размерами катода и его температурой, зависящей от I_k , а напряженность отсасывающего поля - величиной и распределением в разрядном промежутке приложенной разности потенциалов $V_{\alpha-k}$. Катодное падение, характеризующее распределение потенциала, зависит, как известно, от заполнения разрядного промежутка плазмой, которое, в конечном итоге, зависит от поступления нейтральных атомов в разряд (κ), потока ($I_{\alpha-k}$), энергии ($V_{\alpha-k}$) и длины траекторий (B) ионизирующих электронов.

Кривые изменения $I_{\alpha-k}$ отражают интенсификацию разряда с ростом $V_{\alpha-k}$, I_k , B и κ вплоть до ограничений, обусловленных или заданной плотностью нейтральных атомов в разрядной камере (рис. 3б), или заданной электронной эмиссией катода (рис. 3г), или ухудшением условий отбора электронов в сильном магнитном поле (рис. 3в).

На тех же рис. 3 кривыми, построенными по данным, представленным треугольниками, дается полный ток ионов I_u , экстрагируемых из ионного источника. Ток ионов измерялся коллектором, расположенным перед магнитным анализатором сепаратора. Пучок экстрагируемых ионов был параллелен в вертикальной плоскости и имел угловую расходимость не более $\pm 5^\circ$ в горизонтальной. Распределение потенциалов на электродах электростатической оптики при этом было следующим: потенциал корпуса ионного источника +40 кВ, стабилизированный до величины $\pm 0,03\%$;

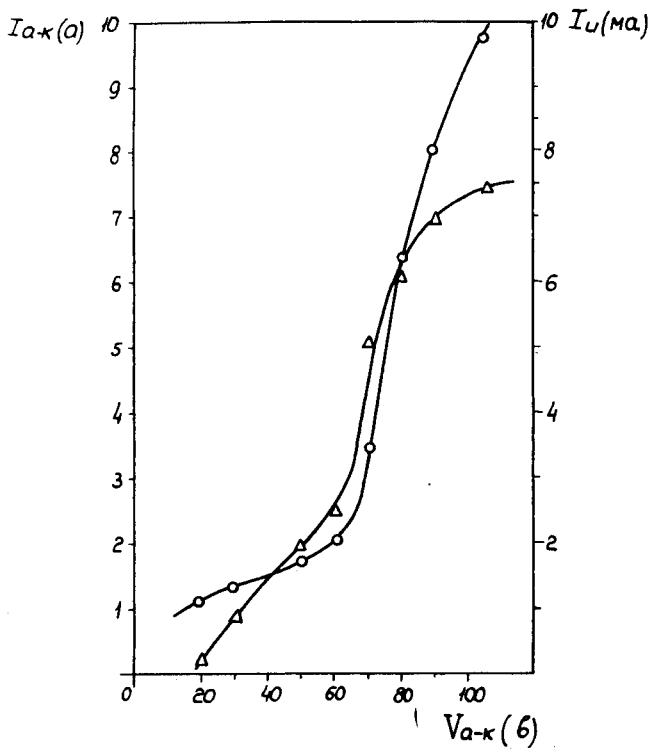


Рис. 3а. Ток разряда I_{a-k} (—○—) и ток экстрагируемых из источника ионов I_u (—△—) в зависимости от разности потенциалов анода и катода. $I_k = 140$ а, $V = 250$ гс, $\kappa = 0,7$ см³/мин.

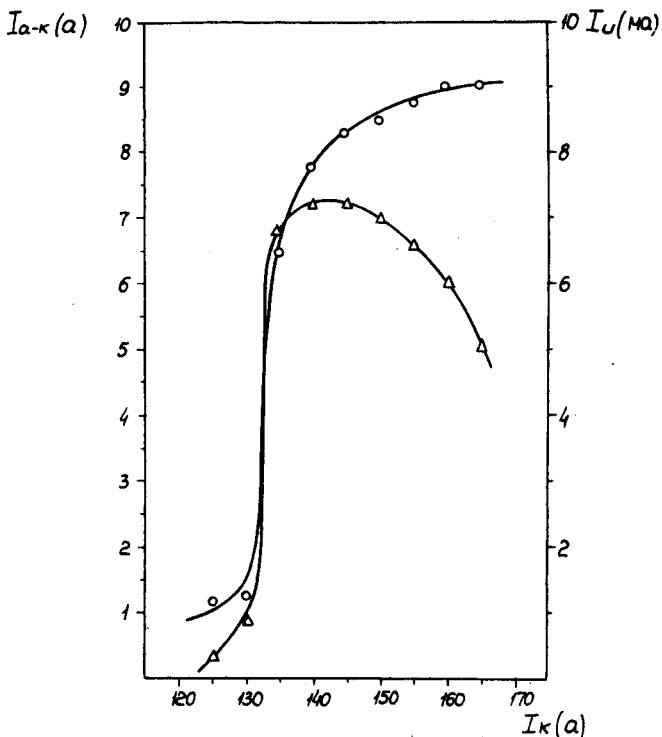


Рис. 36. Ток разряда I_{a-k} (—○—) и ток экстрагируемых из источника ионов I_u (—△—) в зависимости от тока накала катода.

$$V_{a-k} = 90 \text{ в, } V = 250 \text{ гс, } \kappa = 0,7 \text{ см}^3 / \text{мин.}$$

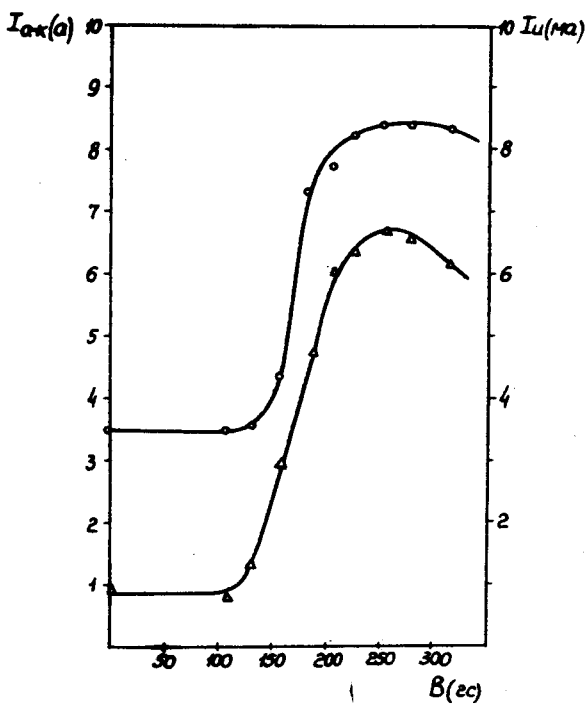


Рис. 3в. Ток разряда $I_{\alpha-\kappa}$ (---) и ток экстрагируемых из источника ионов $I_{и}$ (-Δ-) в зависимости от магнитного поля.
 $V_{\alpha-\kappa} = 90$ в, $I_{\kappa} = 140$ а, $\kappa = 0,7$ см³/мин.

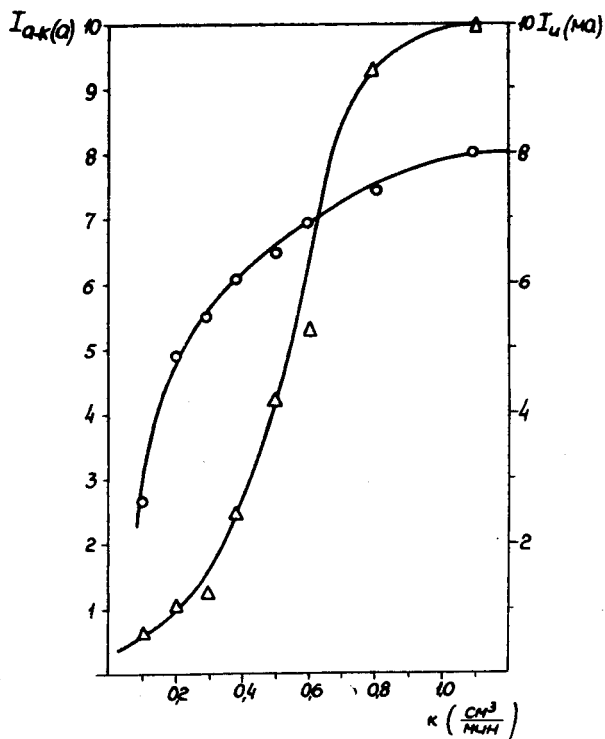


Рис. 3г. Ток разряда I_{a-k} (—○—) и ток экстрагируемых из источника ионов I_u (—△—) в зависимости от скорости поступления газа. $V_{a-k} = 90$ в, $I_k = 140$ а, $B = 250$ гс.

потенциал ближайшего к источнику фокусирующего электрода - 500 в - 2000 в; другой электрод заземлен.

Как видно из рис. 3, ток экстрагируемых из источника ионов I_u не находится в прямой зависимости от тока разряда I_{a-k} . Это особенно заметно на рис. 3б, где с ростом тока разряда ток ионов падает.

Подобные закономерности понятны, поскольку ток ионов, извлекаемых из источника, в случае постоянства внешних условий экстракции определяется непосредственно плотностью и температурой ионов в плазме разряда вблизи эмиссионного отверстия. Изменение параметров разряда приводит к изменению плотности плазмы, причем в нашем случае некоаксиального расположения катода в разрядной камере расширение сектора зоны разряда должно приводить к снижению плотности плазмы в области выходной щели.

Закономерности выхода отдельных компонент ионного пучка исследовались путем регистрации ионного тока после магнитного анализатора. С помощью токового коллектора, установленного на приемнике сепаратора, измерялся ток одnorазрядных ионов изотопов аргона и ксенона, добавленного в количестве 1,0% к аргону, и путем сопоставления величины тока и скорости поступления газа в ионный источник определялся коэффициент использования вещества. Оптимальные значения параметров разряда V_{a-k} , I_k и V выбирались непосредственно по максимальному или наибольшему возможному току однозарядных ионов на коллектор при фиксированном значении k .

Зависимость коэффициента использования вещества от скорости поступления газа дается на рис. 4. На рисунке кружками представлены данные для основной компоненты - аргона; квадратиками - для примеси ксенона. Оптимальные значения V_{a-k} , I_k и V , приблизительно одни и те же для аргона и ксенона: $V_{a-k} = 60-80$ в; $I_k = 140-150$ а, $V = 200-300$ гс. Оптимум k , как видно из рисунка, также приблизительно один и тот же и равен $0,8$ см³/мин. Разница в абсолютных значениях коэффициента использования вещества для аргона и ксенона может быть связана с различием потенциалов ионизации атомов этих двух элементов (для Ar - 15,7 в, для Xe - 12,1 в) и худшими условиями прохождения через камеру сепаратора ионного пучка аргона из-за существенно большей величины ионного тока ($I_{u, Ar} = 5$ ма, $I_{u, Xe} = 50$ мка).

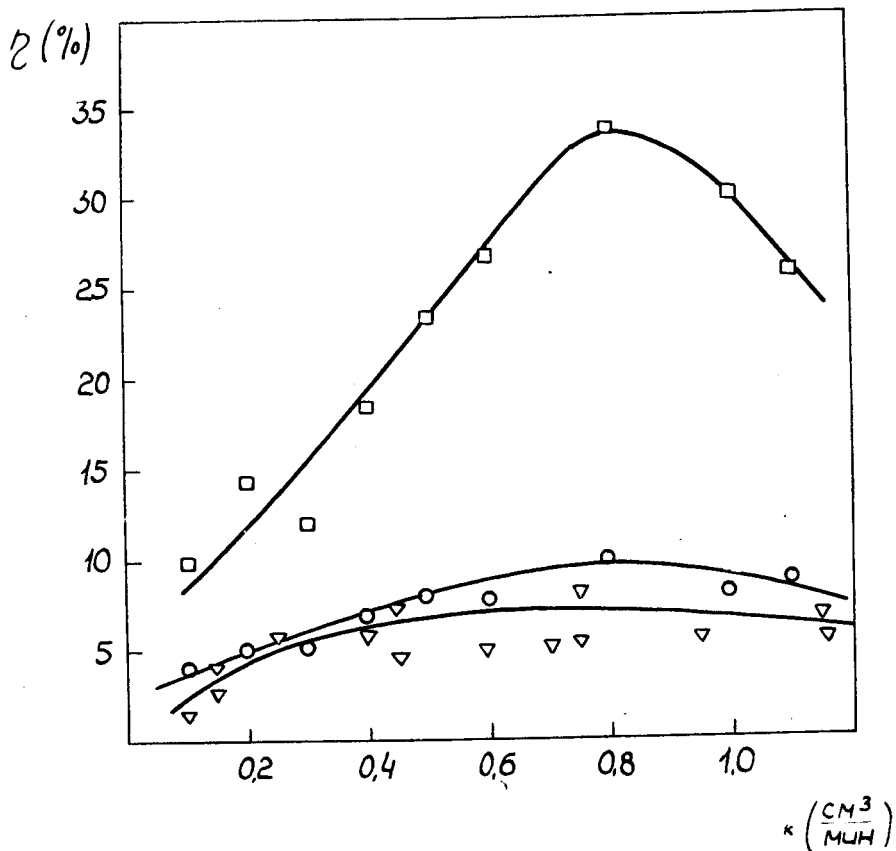


Рис. 4. Коэффициент использования вещества в зависимости от скорости поступления газа в ионный источник: (○) - аргон, (□) - смесь (1,0%) ксенона, (▽) - свинец-212.

В опытах с ультрамалыми примесями использовался радиоактивный свинец ^{212}Pb — продукт распада ^{232}Th . Загрузочная ложка помещалась в эманатор, заполненный гидроокисью тория, и за 20–30 часов на поверхности ложки накапливалось $\approx 10^8$ атомов ($\approx 3.18 \cdot 10^{-13}\text{г}$) радиоактивного свинца. Количество ^{212}Pb определялось с помощью сцинтилляционного счётчика по интенсивности α -излучения продуктов его распада. Ложка с радиоактивным свинцом вводилась в печь ионного источника без нарушения вакуума в объеме, зажигался разряд, ионный источник нагревался до температуры 1000–1300°C и затем в течение 10–15 минут происходило электромагнитное выделение ^{212}Pb .

Определялся коэффициент использования вещества в зависимости от скорости поступления газа. Значения параметров разряда $V_{\alpha-k}$, I_k и B предварительно оптимизировались по току ионов ксенона.

Экспериментальные результаты, полученные для свинца, представлены на рис. 4 треугольниками. Как видно из рисунка, кривая изменения величины коэффициента использования вещества для свинца аналогична кривым для аргона и ксенона. Меньшая величина коэффициента, по-видимому, обусловлена худшей летучестью свинца и его возможной частичной адсорбцией внутри ионного источника. Полной адсорбции таких ультрамалых количеств свинца не наблюдалось.

Отметим, что введение в разряд паров CCl_4 или PbCl_2 с целью образования более летучих хлористых соединений радиоактивного свинца не привело к увеличению выхода ионов ^{212}Pb . Выход ^{212}Pb не увеличивался и тогда, когда вместо аргона в качестве основной компоненты питающего газа использовался или водород, или гелий, или неон.

Полученные результаты показывают, что величина коэффициента использования вещества, определяющая эффективность электромагнитной сепарации, зависит приблизительно одинаковым образом от основных параметров разряда как для основной компоненты питающего газа (Ar , H_2 , He , Ne), так и для малых (Xe) или чрезмерно малых (Pb) примесных компонент. Поэтому при работе сепаратора в режиме "в линии" настройку ионного источника, например, на максимальную эффективность ионизации можно производить (и это практически удобнее), используя газообразные примеси, специально добавленные в газ, питающий ионный источник.

5. Другой важной характеристикой электромагнитного сепаратора является качество фокусировки ионных пучков, обеспечивающее определенную степень сепарации. Размеры фокальных пятен сепарированных ионных пучков зависят как от ионо-оптических характеристик магнитного анализатора и системы электростатической фокусировки, так и от величины и постоянства тока ионного пучка, определяющих величину пространственного заряда пучка, вызывающего дефокусировку. Поэтому настройка ионного источника на максимум разрешения будет, например, различной для пучка ионов основной компоненты силою в несколько миллиампер и пучка ионизованных продуктов реакции крайне малой интенсивности.

Нами производилось сравнение качества фокусировки пучка ионов примеси ($\approx 1\%$) ксенона и радиоактивного свинца ^{212}Pb ($\approx 10^8$ атомов). Режим ионного источника, потенциал фокусирующего электрода, положение приемной плоскости сепаратора подбирались так, чтобы получить минимальную ширину фокальных пятен пучков ионов изотопов ксенона. Ток ионов изотопов ксенона составлял при этом 10–50 мка.

Наблюдение за распределением ионного тока в фокальном пятне производилось с помощью осциллографа. На вертикальную развертку луча осциллографа подавался сигнал с тонкого (0,2 мм) измерительного зонда, укрепленного на приемнике сепаратора, а горизонтальная развертка луча управлялась пилообразным напряжением, которое одновременно модулировало ускоряющее напряжение сепаратора на глубину $\approx 10\%$. Затем в работающий ионный источник при выключенном ускоряющем напряжении вводилась загрузочная ложка с радиоактивным свинцом-212, магнитное поле перестраивалось на массу 212, включалось ускоряющее напряжение и производилась сепарация свинца. Для определения качества фокусировки пучка ионов ^{212}Pb на приемнике сепаратора укреплялась тонкая алюминиевая фольга; эта фольга после окончания сепарации разрезалась на полоски шириной 2,5 мм и α -активность каждой полоски измерялась.

Результаты этих экспериментов представлены на рис. 5 и 6. На рис. 5 дается осциллографическая кривая распределения ионного тока изотопов ксенона. Полуширина пиков составляет 0,25 атомной единицы массы, что отвечает разрешающей способности 500 на уровне 0,5 от макси-

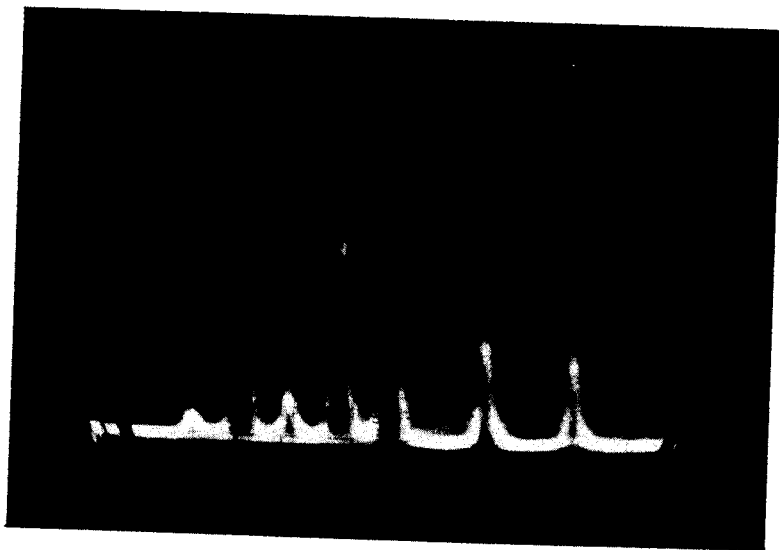


Рис. 5. Распределение тока ионов изотопов ксенона ($^{128}\text{Xe}^+$, $^{129}\text{Xe}^+$, $^{130}\text{Xe}^+$, $^{131}\text{Xe}^+$, $^{132}\text{Xe}^+$, $^{134}\text{Xe}^+$, $^{136}\text{Xe}^+$) на приемной плоскости электромагнитного сепаратора.

ма. На рис. 6 дается относительное распределение ^{212}Pb вдоль плоскости приемника сепаратора, образующей угол 45° с главным лучом. Представленные на рисунке ошибки - статистические ошибки счёта α -частиц. За начало отсчёта расстояния взято положение оси фокального пятна ионного пучка $^+\text{TaO}_2$ ($M = 213$). На рисунке дается также шкала разрешающей способности на различном уровне от максимума, построенная по данным полученного распределения.

Результаты этих опытов показывают, что при настройке режима источника и сепаратора в целом на хорошую фокусировку пучка ионов ксенона, добавленного в количестве 1% в питающий газ - аргон, одновременно обеспечивается фокусировка приблизительно того же качества и пучка ионов свинца ничтожно малой интенсивности.

6. Отмеченные выше особенности работы ионного источника в режиме "в линии" (см. пункт 3) предъявляют новые требования к самой кон-

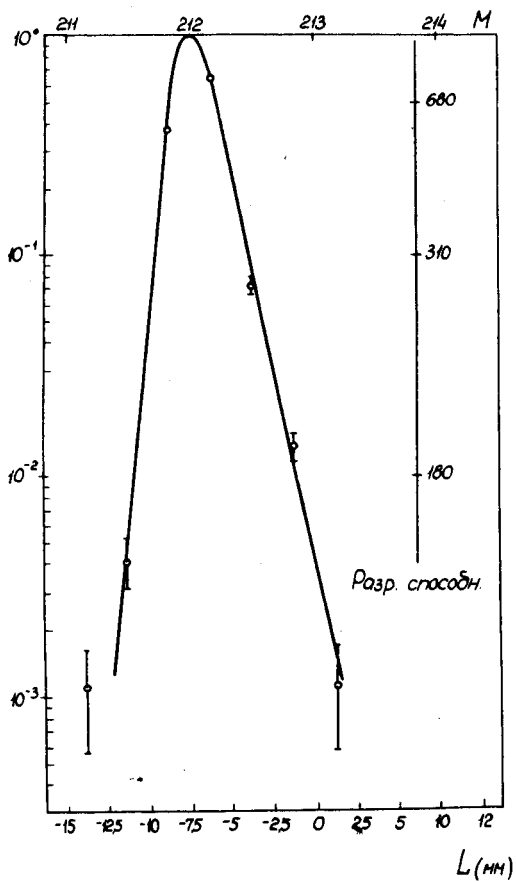


Рис. 6. Распределение ионов ^{212}Po на приемной плоскости электромагнитного сепаратора.

струкции ионного источника. В частности, тот факт, что продукты ядерных реакций поступают в ионный источник в виде разрозненных атомов, а не в виде специальных легколетучих химических соединений, как это практикуется при обычной, "вне линии" электромагнитной сепарации, вызывает необходимость нагрева разрядной камеры источника до высокой температуры для того, чтобы предотвратить адсорбцию. Задача повышения температуры источника упрощается, если источник имеет малые размеры. К тому же большие размеры источника при работе "в линии" в отличие, например, от электромагнитной сепарации граммовых количеств вещества, не вызываются необходимостью. Поэтому в настоящей работе была предпринята попытка изучить влияние размеров разрядной камеры и катода на режим работы магнетронного ионного источника для того, чтобы получить представление о возможностях изменения этих размеров.

Измерялась эффективность ионного источника в зависимости от диаметра катода и внутреннего диаметра разрядной камеры. Исследовались различные возможные комбинации катодов с диаметрами 6,4 и 2 мм и разрядных камер с внутренними диаметрами 20, 15 и 10 мм. Катод располагался в разрядной камере так, что ось катода в любом случае находилась на расстоянии 5 мм от стенки разрядной камеры в месте расположения эмиссионной щели.

Эффективность ионного источника определялась по току ионов примеси ксенона ($\approx 1\%$), измеряемого на приемнике электромагнитного сепаратора. Полученные в этих опытах результаты даются в таблице 1, в которой представлены максимальные значения коэффициента использования вещества (в процентах), полученные для различных комбинаций катода и разрядной камеры - анода при вариации всех четырех параметров разряда.

Таблица 1

$d_a \backslash d_k$	2 мм	4 мм	6 мм
10 мм	10-14	8-12	5-8
15 мм	7-9	11-15	30-35
20 мм	2-4	9-13	12-16

Как видно из таблицы, каждому размеру катода отвечает определенный размер разрядной камеры, при котором обеспечивается наибольшая максимальная эффективность ионизации. Для катода с диаметром 2 мм — это разрядная камера с диаметром 10 мм, для катода с диаметром 4 или 6 мм — разрядная камера с диаметром 15 мм. С увеличением диаметра катода, т.е. с увеличением тока эмиссии, а, следовательно, и тока разряда, максимальная эффективность ионного источника растёт от 10 — 14% для катода с диаметром 2 мм до 30—35% для катода с диаметром 6 мм. Возможно, эффективность ионного источника с большей площадью катода будет выше.

Результаты этих опытов показывают, что уменьшение размеров разрядной камеры ионного источника магнетронного типа и связанное с этим уменьшение размеров катода приводит к снижению эффективности ионизации. С этим нельзя не считаться при выборе конкретных размеров конструкции высокотемпературного ионного источника.

7. Эксперименты с ионным источником магнетронного типа в условиях, приближенных к условиям работы в линии, позволили получить ответы на некоторые специфические для режима в линии вопросы. Это облегчило выбор конструкции и подсказало методику наладки и работы сбыстродействующим ионным источником для электромагнитного сепаратора в линии с циклотроном тяжелых ионов.

Авторы выражают благодарность Е.Д.Воробьеву за обсуждение полученных результатов, а также Н.С. Иванову и Б.Г.Зорину за помощь в проведении экспериментов.

Л и т е р а т у р а

1. G.Anderson. *Arkiv för Fysik* 36, 61, 1967.
2. Г.Н.Флеров, Н.И.Тарантин. *Abhandlungen der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin (Mathem., Phys., Techn.)*, 1, 49, 1967.
3. J.H.Freeman. *Nucl.Instrum. & Meth.* 22, 306, 1963.
4. N.I.Tarantin, A.V.Demyanov, Yu.A.Dyachikhin, A.P.Kabachenko. *Nucl.Instrum. & Meth.* 38, 103, 1965.

Н.И.Тарантин, А.В.Демьянов. ПТЭ, 1, 41, 1966. А.В.Демьянов, Н.И.Тарантин, Ю.А.Дьячихин, А.П.Кабаченко. ПТЭ 2, 28, 1966.

5. I.Chavet, R.Bernas. Nucl.Instrum. & Meth., 51, 77, 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 июня 1968 года.