

УСТРОЙСТВО ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ В ПЛАЗМЕ МЕТОДОМ ИОННО-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА

© 2022 г. Е. П. Потанин^{a,b,*}

^a Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”
Россия, 123098, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

^b Всероссийский институт научной и технической информации РАН
Россия, 125315, Москва, ул. Усиевича, 20

*e-mail: potanin45@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.03.2022 г.

После доработки 29.03.2022 г.

Принята к публикации 02.04.2022 г.

Описано устройство для разделения стабильных изотопов на основе ионно-циклотронного резонанса. Основное продольное магнитное поле создается с помощью сверхпроводящей магнитной системы. Источник плазмы, зона селективного нагрева и отборники ионов располагаются в вакуумной камере, размещенной в “теплом” отверстии криостата. Ионизация атомов испаренного вещества в источнике осуществляется с помощью нагрева электронов в поле сверхвысокочастотного излучения. Транспортировка микроволнового излучения в зону ионизации разряда электронно-циклотронного резонанса осуществляется с помощью волновода и зеркала. Селективный нагрев ионов целевого изотопа происходит с помощью высокочастотной антенны. Для нагрева и испарения рабочего вещества (гадолиния или других материалов) впервые предлагается использовать электронный пучок, распространяющийся со стороны, противоположной зоне источника. Испарение осуществляется в тигле из тугоплавкого материала, нагреваемом мощным потоком электронов. Оригинальность конструкции заключается в расположении коллектора нагретых частиц в зоне ослабленного магнитного поля установки. Выполнены оценки характеристик коллектора нагретых ионов, размещенного в зоне уменьшенного поля. Проведено сравнение результатов анализа с экспериментальными данными по разделению изотопов лития.

DOI: 10.31857/S0032816222050081

1. ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение стабильных изотопов в радиационной медицине, атомной промышленности, а также для решения проблем фундаментальной физики требует поддержания ассортимента получаемых изотопов и увеличения их производства. Известен эффективный и гибкий метод газового центрифугирования [1–3], который позволяет получать сравнительно дешевые стабильные изотопы в значительных количествах, но только тех элементов Периодической системы, которые имеют удобные газообразные соединения при комнатной температуре. Таких элементов в природе не более 27.

Разделение ионов различных масс универсальным электромагнитным способом осуществляется в ионном пучке, распространяющемся поперек магнитного поля в вакууме [4, 5]. Вследствие отталкивающего кулоновского взаимодействия между ионами ионный ток на отборные устройства электромагнитного сепаратора невелик, что приводит к ограничению количества получаемо-

го изотопически обогащенного продукта при сравнительно высокой его цене.

В настоящее время имеется проблема получения стабильных изотопов некоторых элементов, которые не имеют летучих газообразных соединений при нормальных условиях и поэтому не могут быть получены центробежным методом, а требуемые количества этих изотопов превышают производительные возможности электромагнитных сепараторов. Эти стабильные изотопы необходимы для нужд ядерной энергетики (¹⁵⁷Gd), медицины (¹⁰²Pd, ²⁰³Tl) и фундаментальной физики (⁴⁸Ca, ¹⁵⁰Nd). Особое место в перечисленном выше ряду занимает изотоп ¹⁵⁷Gd, мировая потребность в котором оценивается в ~1 т в год. Этот изотоп представляет практический интерес благодаря очень высокому сечению поглощения тепловых нейтронов и может быть использован как выгорающая добавка в ядерных реакторах, когда применение естественной смеси изотопов гадолиния ухудшает теплопроводящие свойства сборок. Возникает пробел в промышленных методах по-

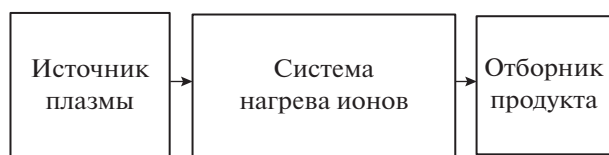


Рис. 1. Основные блоки ИЦР-системы.

лучения стабильных изотопов ряда элементов, требуемых в количествах, составляющих десятки килограммов в год и более. Этот пробел может заполнить плазменный метод разделения, а именно метод ионно-циклотронного резонанса (ИЦР).

Поскольку электростатическое расталкивание ионов пучка за счет кулоновских сил в электромагнитном масс-сепараторе препятствует увеличению производительности разделительного модуля, было высказано предложение использовать для разделения ионов по массам плазму, в которой ионный заряд скомпенсирован электронами [6, 7]. По сравнению с промышленным электромагнитным сепаратором ИЦР-установка должна производить существенно большее количество ценного продукта в силу снятия ограничений на величину перерабатываемого потока вещества, связанных с положительным объемным зарядом ионов.

Основными элементами разделительного ИЦР-устройства являются источник плазмы, система селективного нагрева ионов и отборник продукта (рис. 1).

Для разделения изотопов тугоплавких элементов методом ИЦР известен источник с катодным распылением ионами высокой энергии [8]. К рас-

пыляемой пластине, изготовленной из разделяемого вещества, прикладывают отрицательный электрический потенциал U_{spr} , достаточный для сообщения бомбардирующим пластину ионам такой энергии, чтобы при ударе о пластину выбить с ее поверхности несколько нейтральных атомов (рис. 2). Далее нейтральные атомы ионизируются электронами в зоне разряда электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) вблизи распыляемой пластины. Такой ЭЦР-разряд создают под действием микроволнового (СВЧ) излучения, поступающего по волноводу и отражаемого от зеркала в ЭЦР-зону. Слева внизу на рис. 2 изображен тигель с электрическим нагревателем.

Обычно для организации работы такого источника добавляется буферный инертный газ, чтобы обеспечить необходимое количество бомбардирующих пластину ионов, если образующихся ионов недостаточно для эффективного распыления выбранного тугоплавкого элемента (Gd, W и т.д.). Использование в ИЦР-установке инертного газа вызывает ряд нежелательных побочных эффектов. Из-за столкновений ионов и нейтралов этого газа с ионами разделяемого элемента в зоне ВЧ-антенны уменьшается селективность ИЦР-нагрева. Сам инертный газ не адсорбируется на стенках вакуумной камеры, в результате чего его концентрация может быть значительной во всем объеме разделительной ИЦР-установки.

Более внимательное рассмотрение описанной выше схемы показывает, что существуют серьезные трудности в реализации распылительного механизма, когда требуется получение изотопов гадолиния. Эти трудности связаны со сравнительно невысокой температурой плавления гадо-

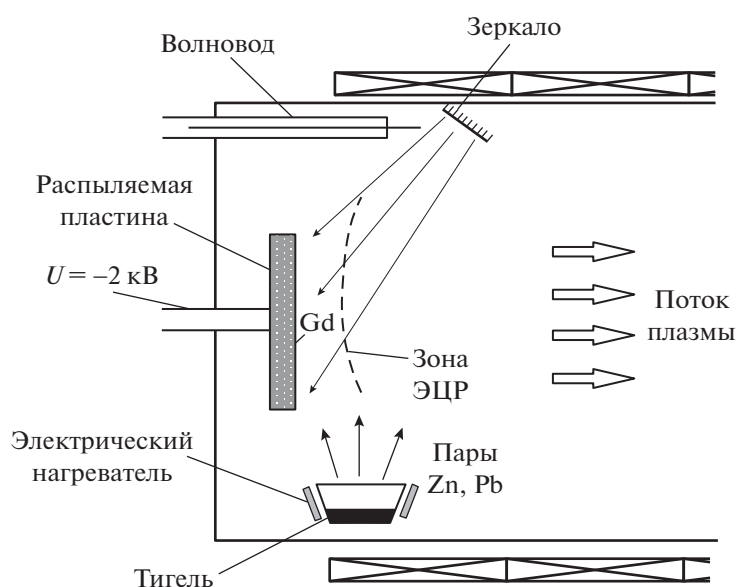


Рис. 2. Схема источника с катодным распылением ионами высокой энергии.

линия (1313°C) и его низкой теплопроводностью. Дело в том, что тепловая мощность, выделяющаяся в катоде при его бомбардировке с целью создания потока расплывшихся атомов на уровне эквивалентного тока 100 А и выше, достигает 100–200 кВт при площади катодной пластины 2000–3000 см². При таких тепловых нагрузках в условиях низкой теплопроводности гадолиния и охлаждения только за счет теплового излучения возникает опасность расплавления пластины (диска). Дополнительное охлаждение может быть осуществлено лишь с тыльной стороны катодной пластины, например, за счет водяного (или другого) охлаждения металлической подложки, к которой крепится распыляемая пластина. К сожалению, создание конструкции, требующей надежного соединения подложки и гадолиниевого диска, выдерживающей высокие напряжения в условиях изгиба диска, вызванного его тепловым расширением, представляет собой трудную инженерную задачу. Однако, даже если бы эту задачу удалось решить, всегда будет существовать серьезная опасность локального проплавления гадолиниевой пластины вследствие трудности поддержания оптимального режима распыления с однородным прогревом пластины со всеми вытекающими отсюда последствиями прорыва охлаждающей жидкости в вакуумную камеру.

В [9] была предложена схема ИЦР-устройства, основанного на получении пара разделяемого элемента с его последующей ионизацией в условиях ЭЦР при испарении из большого контейнера при высокой температуре. Разделительная ИЦР-система для этого ориентирована вертикально, и контейнер, содержащий расплавленный разделяемый элемент, расположен на дне разделительной ИЦР-установки. Пар образуется на поверхности расплава и поднимается, проходя зону ионизации. В такой конструкции зона ЭЦР-нагрева электронов и область ЭЦР-разряда расположены перпендикулярно к потоку нейтралов. Автор работы [9] не описывает способ нагрева контейнера, что является принципиальным вопросом создания реально функционирующего источника паров с достаточно высокой производительностью. В предложенной конструкции источника с ионизацией за счет излучения гиротрона поток не успевших ионизоваться нейтральных атомов поступает через зону ЭЦР-разряда непосредственно в зону расположения зеркал СВЧ-тракта и область ВЧ-нагрева ионов. Это должно приводить к запылению нейтралами элементов линии передачи СВЧ-излучения (и в первую очередь зеркал), а также к тому, что в зону ВЧ-нагрева будет постоянно проникать нейтральная компонента. Последнее весьма нежелательно, поскольку будет приводить к уходу нагретых в ВЧ-зоне целевых ионов из потока в результате резонансной перезарядки на нейтральных атомах. Та-

кие потери существенно снижают коэффициенты использования вещества и степень извлечения ценного изотопа. Соображения о возможности повышения электронной температуры в ЭЦР-разряде за счет повышения мощности СВЧ-излучения для получения более высоких степеней ионизации неубедительны, поскольку в этом случае мы будем иметь значительное количество двухзарядных и даже трехзарядных ионов. Последнее усложнит проблему селективного нагрева и приведет к дополнительным потерям производительности установки.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В настоящей работе подробно описывается горизонтально расположенное ИЦР-устройство для разделения изотопов стабильных элементов (рис. 3). Его основу составляет рабочая камера 1 длиной порядка 6 м, размещенная в “теплом” отверстии криостата 2 [10] с внутренним радиусом около 1 м. Продольное магнитное поле с высокой степенью однородности как по сечению, так и по длине в достаточном большом объеме создается соленоидом 3 на длине порядка 4 м. Предполагается, что однородное магнитное поле возбуждается с помощью сверхпроводящей магнитной системы. В левой части устройства располагается основанный на испарении любого металла в тигле источник плазмы 4. Ионизация атомов испаренного вещества осуществляется с помощью мощных генераторов СВЧ-излучения, к которым в первую очередь относятся клистроны и гиротроны. На рис. 3 показаны системы транспортировки микроволнового излучения в зону ионизации (зона ЭЦР-разряда): волновод 5 и специальное зеркало 6. Селективный нагрев ионов целевого изотопа осуществляется с помощью ВЧ-антенны 7, генерирующей в объеме плазмы переменные электрические поля с частотой, близкой к собственной циклотронной частоте извлекаемого ионного компонента. В результате резонансного циклотронного ускорения целевые ионы приобретают высокую поперечную к магнитному полю энергию, а следовательно, и больший по сравнению с нерезонансными ионами радиус ларморовской орбиты. Цифрами 8 и 9 показаны траектории резонансных и нерезонансных частиц соответственно. Длина зоны нагрева должна составлять несколько метров, чтобы уменьшить времяпролетное уширение линии ИЦР-поглощения энергии.

В данной работе для нагрева и испарения рабочего вещества предлагается использовать электронный пучок. В этом случае нагрев вещества осуществляется в тигле из тугоплавкого материала, нагреваемом мощным электронным пучком 10. Для его создания используются электронные пушки 11. Порт для введения пучка показан в правой нижней части чертежа. Транспортировка пучка

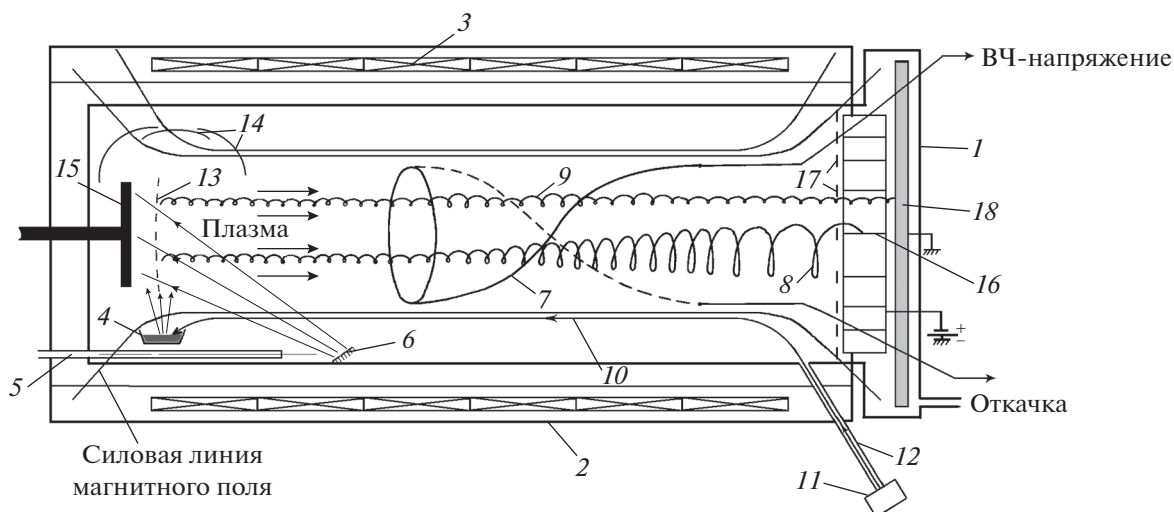


Рис. 3. ИЦР-устройство для разделения изотопов стабильных элементов. 1 – вакуумная рабочая камера; 2 – криостат сверхпроводящей магнитной системы; 3 – соленоид; 4 – тигель; 5 – волновод; 6 – зеркало; 7 – ВЧ-антенна; 8 – траектория целевых ионов; 9 – траектория нерезонансных ионов; 10 – электронный пучок; 11 – электронная пушка; 12 – металлические трубопроводы (полосы); 13 – зона ЭЦР-нагрева; 14 – экраны для сбора нейтралов испаряемого продукта; 15 – электрод (в том числе и гадолиниевый диск); 16 – металлические пластины для отбора целевых ионов; 17 – защитные экраны; 18 – отвальная пластина.

осуществляется вдоль силовых линий магнитного поля. Последние прямолинейны в зоне селективного нагрева и имеют конфигурацию расходящихся линий на торцах системы. На рис. 3 показаны две такие линии, вдоль одной из которых проходит электронный пучок. В нижней части зоны расположения источника, под зоной ЭЦР-разряда в области спадающего магнитного поля, установлен тигель из тугоплавкого материала (например, молибдена, тантала или вольфрама) с твердым гадолинием или другим веществом, изотопы которого разделяются. При этом силовая линия электронного пучка должна проходить через поверхность испарения. Оригинальность конструкции заключается в том, что электронный пучок вводится с правой стороны устройства, противоположной источнику, и распространяется вдоль металлической поверхности вакуумной камеры. Предполагается, что тигель может быть удален и заменен новым с помощью специальной шлюзовой системы. Следует иметь в виду, что Gd является ферромагнитным материалом с точкой Кюри около 30°C , вследствие чего ввод тигля с Gd и размещением его в зоне сильного магнитного поля необходимо осуществлять с подогретым до температуры $100\text{--}200^{\circ}\text{C}$ веществом, потерявшим свои ферромагнитные свойства. Предварительный нагрев тигля с гадолинием может осуществляться с помощью омического подогревателя с бифилярной токопроводящей системой.

Для транспортировки электронных пучков в области, удаленной от металлической поверхности вакуумной камеры, необходимо использовать специальные проводящие трубопроводы или ме-

таллические полосы 12 [11]. Для протекания обратного тока должен быть предусмотрен электрический контакт тигля с трубопроводом или металлической стенкой камеры.

Схема испарения гадолиния или другого тугоплавкого металла, когда пар подается не вдоль направления последующего извлечения ионов, т.е. перпендикулярно магнитному полю, как в [9], а поперек, вдоль зоны ЭЦР-разряда 13 (показана штриховой линией), имеет существенное преимущество. Это преимущество связано с тем, что не успевшие ионизоваться при своем вертикальном распространении атомы испаренного вещества в основном конденсируются в специально приспособленных для этого экранах 14 (показаны в левой верхней части рисунка) вблизи зоны источника плазмы, непосредственно над тиглем, а не распространяются вдоль всей рабочей камеры установки. (В противном случае пары с естественной концентрацией целевого изотопа попадали бы на коллектор, снижая степень разделения.) Этот материал можно периодически собирать с поверхности экранов и снова направлять в систему испарения. В нижней части рабочей камеры, в местах, хорошо защищенных от прямого попадания потока испаряемого материала, размещаются зеркала СВЧ-тракта. На электрод 15 подается отрицательный относительно плазмы потенциал, отталкивающий электроны. В такой схеме источника существенно снижается концентрация нейтральных атомов в области ВЧ-нагрева и исключаются потери, связанные с резонансной перезарядкой ускоренных целевых ионов на нейтральных атомах испаряемого вещества. При плотности мощности

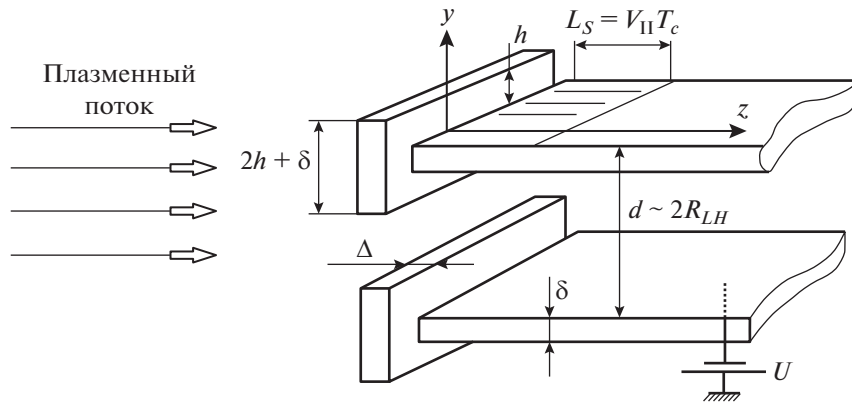


Рис. 4. Схема отборника. h – полувысота переднего экрана, Δ – толщина переднего экрана, d – оптимальное расстояние между отборными пластинами, δ – толщина отборных пластин, V_{II} – средняя скорость продольного ионного потока, T_c – период циклотронного вращения ионов, U – положительный отталкивающий потенциал.

электронного пучка $10\text{--}100\text{ кВТ/см}^2$ скорость испарения различных разделяемых веществ изменяется в диапазоне $2 \cdot 10^{-3}\text{--}2 \cdot 10^{-2}\text{ г/(см}^2 \cdot \text{с)}$.

Самым сложным узлом установки является установленная за зоной нагрева в правой части камеры коллекторная система, состоящая из металлических пластин *16* для отбора целевых ионов, защищенных экранами *17*, и поперечной к потоку отальной пластины *18*.

3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ НАГРЕВА ЦЕЛЕВЫХ ИОНОВ

Для получения высокой изотопической селективности необходимо, чтобы линия циклотронного поглощения энергии целевого “изотопного” иона была разрешена относительно соседних изотопов. Условие селективности может быть представлено в виде

$$\Delta\omega_{1/2} \ll \omega_{c1} - \omega_{c2} \cong \frac{\Delta m}{\bar{m}} \langle \omega_c \rangle, \quad (1)$$

где $\Delta\omega_{1/2}$ – полуширина линии циклотронного поглощения энергии; ω_{c1} и ω_{c2} – циклотронные частоты ионов соседних изотопов; $\langle \omega_c \rangle$ – средняя циклотронная частота, прямо пропорциональная индукции B магнитного поля.

Величина $\Delta\omega_{1/2}$ в обычных режимах не очень высокой плотности плазмы (порядка 10^{12} см^{-3}), когда можно пренебречь столкновительным уширением, определяется в основном доплеровским и времяпролетным уширением. Введем длину зоны нагрева L . Если времяпролетное уширение $\Delta\omega_{1/2}^{\tau}$ можно оценить как $2\pi/\tau$, где $\tau = L/\langle V \rangle$ ($\langle V \rangle$ – средняя продольная скорость ионов в пучке), то доплеровское уширение порядка $\langle V \rangle 2\pi/\lambda$. Если использо-

вать винтовые антенны с длиной волны, равной длине зоны нагрева, доплеровское уширение, как и времяпролетное, уменьшаются с увеличением длины установки.

Однако сильно увеличивать длину устройства нежелательно. Рассмотрим случай выделения изотопа ^{157}Gd , когда необходимо разрешение линий циклотронного поглощения на уровне $\frac{\Delta m}{\bar{m}} \approx 0.006$.

В силу относительной близости циклотронной частоты иона $^{157}\text{Gd}^+$ и циклотронных частот ионов соседних изотопов $^{156}\text{Gd}^+$ и $^{158}\text{Gd}^+$ одним из наиболее эффективных способов достижения высокой селективности является увеличение разности циклотронных частот резонансного и нерезонансных ионов. Для этого, как следует из неравенства (1), необходимо использовать сильные магнитные поля. К сожалению, в сильных магнитных полях осложняется работа коллекторной системы. Для понимания этого явления остановимся более подробно на принципах работы коллектора, изображенного в увеличенном масштабе на рис. 4.

Плоскопараллельные отборные пластины толщиной δ располагаются на некотором оптимальном расстоянии d порядка среднего диаметра ларморовской окружности R_{LH} нагретых частиц. Передние экраны с полувысотой h порядка ларморовского радиуса холодных нецелевых ионов r_{LC} защищают пластины от потока электронов и холодных ионов нецелевого изотопа. Оптимальное расстояние d подбирается из следующих соображений. Увеличение расстояния d между пластинами коллектора свыше величины $2R_{LH}$ будет приводить к уменьшению эффективности извлечения ценного продукта, а уменьшение d ниже величины $2R_{LH}$ – к снижению коэффициента разделения. Ларморовский радиус ионов зависит

от его поперечной к магнитному полю скорости V_{\perp} (а следовательно, энергии W_{\perp}) и магнитной индукции B_z в соответствии со следующей зависимостью: $R_{LH} = mV_{\perp H}/(qB_z)$, где m и q — соответственно масса и заряд иона. Чтобы увеличить степень разделения, на отборные пластины коллектора следует подать положительный отталкивающий потенциал U . Величина потенциала выбирается такой, чтобы, с одной стороны, максимально уменьшить поток холодных ионов на пластины, а с другой — минимально уменьшить поток нагретых целевых ионов. Фактически, эффективный выбор отталкивающего потенциала зависит от величины поперечной энергии нагретых частиц. Использование отталкивающего потенциала увеличивает степень разделения, но снижает полный поток ионов на коллектор и степень извлечения целевого изотопа. Необходимо также учитывать, что энергия ускоренных ионов должна быть ограниченной и не может превышать величину, при которой начинается эффективный процесс самораспыления собираемого целевого вещества (т.е. не более 300–500 эВ).

В сильных магнитных полях ларморовский радиус целевых ионов, при сохранении их поперечной энергии на таком предельно допустимом уровне, снижается и может оказаться слишком малым с точки зрения конструктивной реализации коллекторной системы: при изготовлении коллектора передний экран и пластины должны охлаждаться и не могут иметь малые размеры или быть очень тонкими. Так, например, при разделении изотопов гадолиния в магнитных полях порядка 4 Тл средний ларморовский радиус “нагретых” ионов при их поперечной энергии $W_{\perp} = 200$ эВ составляет всего около $R_{LH} \approx 6$ мм, а высота экрана для холодных ионов (10 эВ) должна составлять около 1 мм. В этих условиях изготовление охлаждаемого водой коллектора представляет довольно сложную конструктивную задачу. По этой причине при больших рабочих магнитных полях в зоне нагрева при сохранении поперечной энергии на уровне, предотвращающем самораспыление, когда необходимо сближать пластины коллектора, чтобы избежать уменьшения коэффициента извлечения ценного изотопа, становится заметной относительная доля нежелательных потерь целевых ионов на передние экраны (изготовление их очень тонкими и с малой высотой представляет трудность) по сравнению с потоками ионов на отборные пластины.

4. ОТБОРНИК В ОБЛАСТИ ОСЛАБЛЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Еще одна трудность, которая может проявиться при отборе продукта в условиях сильных магнитных полей, связана с уменьшением продоль-

ного размера L_S зоны осаждения вещества в силу малого шага спирали ионов: $L_S \approx \langle V_z \rangle T_c$, где T_c — период циклотронного вращения ионов. Величина L_S обратно пропорциональна магнитному полю. Относительно небольшой продольный размер зоны напыления приводит к нежелательным локальным тепловым перегрузкам и невозможности осуществления долговременных наработок продукта без удаления обогащенного вещества с передней кромки отборной пластины. Действительно, поскольку в силу спирального характера траектории ионов основной сбор обогащенного вещества осуществляется на переднюю кромку отборной пластины протяженностью $L_S \approx 1$ см ($T_{\perp 7} = 5$ эВ), через несколько часов работы сепаратора высота напыленного продукта может превысить высоту h переднего экрана и эффективность экрана заметно снизится. Это существенно для изотопов, к которым относится ^{157}Cd , исходная концентрация которого относительно высока (15%). В результате резко уменьшается разделительный эффект во время сбора материала на коллекторе из-за снижения эффективной высоты экрана.

К сожалению, этим не ограничиваются проблемы отбора в сильных полях, одна из которых связана с конечной толщиной Δ переднего экрана. Во-первых, часть горячих ионов будет концентрироваться на обращенной вверх поверхности экрана, что уменьшает коэффициент извлечения целевого изотопа. Во-вторых, в процессе работы толщина напыленного на эту поверхность продукта будет увеличиваться, препятствуя нормальной работе разделительной установки.

Для снижения нежелательных эффектов, связанных с отмеченными выше обстоятельствами, и повышения эффективности работы устройства предложено [12, 13] размещать коллектор в области уменьшенного магнитного поля. При пролете нагретых ионов через зону спадающего поля происходит преобразование поперечной энергии W_{\perp} ионов в продольную W_{\parallel} в силу закона сохранения адиабатического инварианта. Это приводит к тому, что траектории центров ларморовских окружностей ионов становятся более пологими. Последнее способствует “размазыванию” извлекаемого вещества по длине пластины в продольном направлении. По этой причине снимаются трудности, связанные как с быстрым ростом толщины напыленного вещества, так и с локальными тепловыми перегрузками. Кроме того, поперечно “нагретые” в ВЧ-зоне ионы приобретают в этом процессе существенно более высокую продольную энергию, чем “холодная” составляющая. Это выражается в том, что шаг спирали винтовой траектории горячих ионов становится существенно больше соответствующей величины для холод-

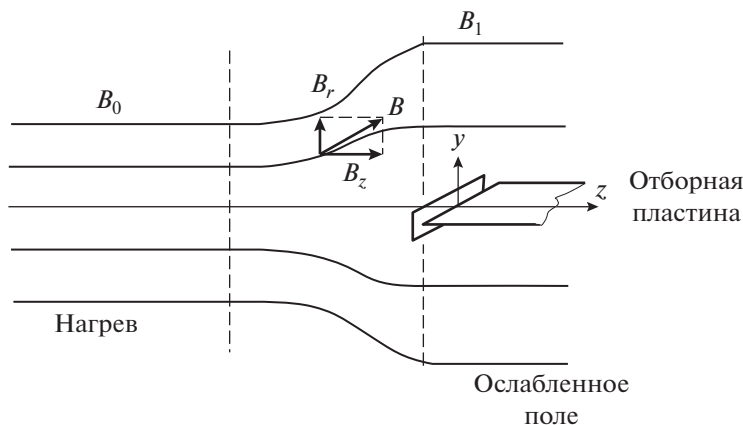


Рис. 5. Схема расположения коллектора в зоне ослабленного магнитного поля. B_0 – магнитная индукция в зоне нагрева ионов; B_r и B_z – радиальная и осевая компоненты магнитной индукции в переходной области; B_1 – магнитная индукция в зоне отборника.

ных ионов. Последнее способствует преимущественному осаждению нецелевой “холодной” составляющей в начале отборной пластины, а “горячей” – на значительно большем протяжении, что приводит к дополнительному продольному разделению на отборной пластине. Это обстоятельство позволяет при расположении плоского коллектора в зоне ослабленного магнитного поля оптимизировать полувысоту h переднего экрана и использовать его как средство ограничения электронного тока при подаче положительного отталкивающего потенциала U на отборную пластину. Последнее будет способствовать увеличению коэффициента извлечения ценного изотопа.

Поместим отборник в виде плоских пластин сразу за зоной спадающего магнитного поля в область ослабленного однородного поля. Пусть ось y – поперечная к плоскости пластин координата. Схема расположения отборника (рис. 5) условно показана без изображения толщин элементов. На рисунке B_0 – индукция основного поля, в котором происходит циклотронный нагрев, B_1 – индукция ослабленного поля. Проанализируем результаты расчетов потоков ионов на коллектор, выполненные применительно к экспериментальной установке [13], с помощью которой получены данные по напылению ионов лития при расположении отборника в зоне спадающего магнитного поля. В этих экспериментах коллектор располагался в зоне слабонеоднородного поля с магнитной индукцией порядка B_1 , так что величина “пробочного отношения” $B_0/B_1 \cong 1.2$. На рис. 6 показаны расчетные зависимости от координаты z безразмерных потоков ионов ${}^6\text{Li}$ для различных полувысот h переднего экрана. При этом оцененные начальные поперечные и продольные энергии ионов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ равны:

$$W_{\perp 0}^6 = 40 \text{ эВ}, W_{\parallel 0}^6 \approx 10 \text{ эВ}, W_{\perp 0}^7 \approx 5 \text{ эВ}, W_{\parallel 0}^7 = 10 \text{ эВ}.$$

На рис. 6 штриховой линией также показана зависимость потока при $h = 0$ в случае, когда коллектор размещен в зоне основного однородного магнитного поля ИЦР-установки ($B_0/B_1 = 1$). Влияние переднего экрана в случае $B_0/B_1 \cong 1.2$ для указанных величин полувысот h на потоки ионов не столь значительно в большей части поверхности отборной пластины, исключая область непо-

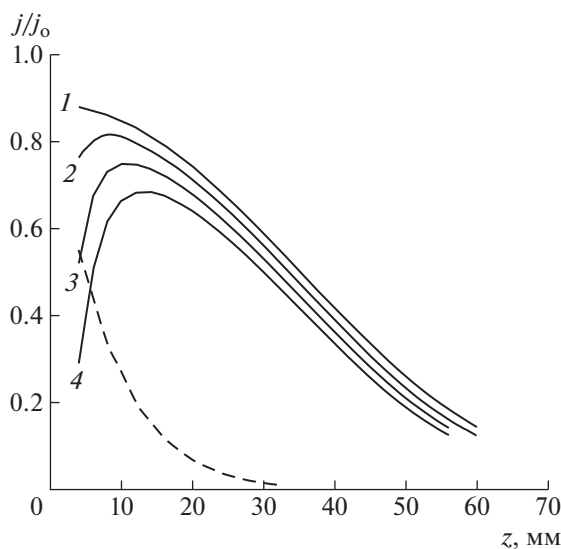


Рис. 6. Зависимость безразмерных потоков ионов ${}^6\text{Li}$ на коллектор от продольной координаты z для различных полувысот переднего экрана h , мм: 0 (1), 1 (2), 2 (3), 3 (4). Штриховой кривой показана зависимость потока при $h = 0$ в случае, когда коллектор размещен в зоне основного однородного магнитного поля ИЦР-установки.

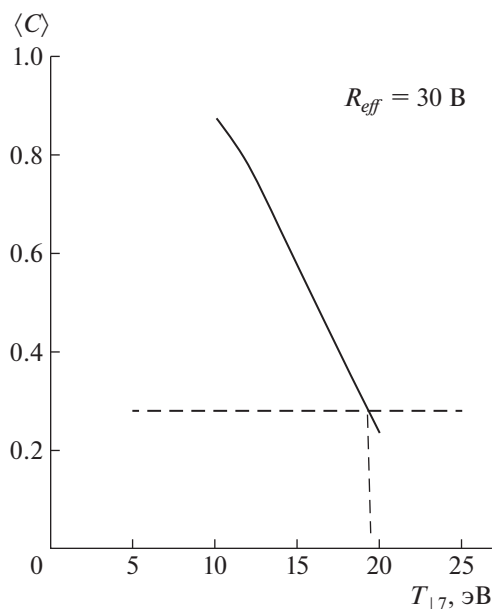


Рис. 7. Зависимость средней концентрации изотопа ${}^6\text{Li}$ от поперечной температуры $T_{\perp 7}$.

средственно за экраном. Сравнение кривой $I(h=0)$ со штриховой кривой (для обычного расположения коллектора в зоне однородного поля) показывает заметное преимущество предлагаемого расположения коллектора в уменьшенном поле при “пробочном отношении” $B_0/B_1 \cong 1.2$. Согласно полученным результатам, расположение коллектора в зоне ослабленного магнитного поля существенно увеличивает степень разделения. Кроме того, перекачка поперечной энергии ионов в продольную позволяет расширить область выделения продукта на пластинах коллектора. Последнее должно существенно уменьшить локальные тепловые перегрузки коллектора.

По оценкам [13], учитывающим только доплеровское и времяпролетное уширения, эффективная температура ${}^7\text{Li}$ должна составлять около 5 эВ. Используя это значение, можно определить среднюю концентрацию $\langle C \rangle$ выделяемого изотопа по длине коллектора. В эксперименте, действительно, наблюдается увеличение концентрации с ростом координаты z . Однако величина этого эффекта оказывается меньше расчетной. Если принять, что эффективный потенциал коллектора на 10 В ниже величины U , средняя на длине около 30 мм измеренная концентрация выделяемого изотопа при эффективном потенциале коллектора 30 В составит $\langle C \rangle_{\text{exp}} \approx 0.28$, тогда как расчет дает для концентрации величину порядка $\langle C \rangle \approx 0.9$. Наиболее вероятная причина расхождения может быть связана с неточностью оценки нагрева нецелевого иона ($T_{\perp 7} \approx 5$ эВ). На рис. 7 показана рас-

четная зависимость средней на длине 30 мм концентрации $\langle C \rangle$ от температуры нецелевого изотопа ${}^7\text{Li}$ при эффективном потенциале коллектора $U_e = 30$ В. Как видно, совпадение экспериментальных и расчетных результатов имеет место при средней поперечной энергии нецелевого изотопа около 20 эВ.

Как уже отмечалось выше, в области ослабленного однородного магнитного поля процесс сбора нагретых целевых ионов с помощью системы плоскопараллельных пластин может оказаться более эффективным, чем при расположении коллектора в зоне основного магнитного поля, совпадающего по величине с рабочим полем в области нагрева ионов. Это позволяет отделить нагретый компонент от холодных нецелевых составляющих изотопной смеси в пространстве вдоль по длине коллектора. Зона однородного ослабленного поля может быть создана с помощью изменения конструкции сверхпроводящей магнитной системы и дополнительных токовых обмоток.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена конструкция основанной на ИЦР-нагреве целевых ионов плазменной разделительной установки, в которой основные и наиболее дорогостоящие структурные элементы — это сверхпроводящая магнитная система, гиротроны, ВЧ-генератор, электронные пушки и вакуумное оборудование. Эти узлы в настоящее время являются достаточно разработанными и испытанными устройствами. Последнее является существенным аргументом в пользу применения для разделения изотопов гадолиния и некоторых стабильных изотопов в промышленных масштабах именно плазменного метода.

Наиболее выгодно получать в больших количествах на основе ИЦР-метода такие стабильные изотопы, как: ${}^{48}\text{Ca}$, ${}^{102}\text{Pd}$, ${}^{150}\text{Nd}$, ${}^{157}\text{Gd}$ и ${}^{203}\text{Tl}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Official website of the Production Association Electrochemical Plant, the town of Zelenogorsk, Siberia, Russia. <http://www.ecp.ru>
2. Sosnin L.J., Suvorov I.A., Tcheltsov I.A., Rudnev A.I. // Nucl. Instrum. and Methods. Phys. Res. 1993. V. A334. P. 41. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(93\)90526-N](https://doi.org/10.1016/0168-9002(93)90526-N)
3. Потанин Е.П., Соснин Л.Ю., Чельцов А.Н. // Атомная энергия. 2019. V. 127. № 3. С. 140. <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00603-9>
4. Кашеев Н.А., Дергачев В.А. Электромагнитное разделение изотопов и изотопный анализ. М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Кабанов И.А. // Перспективные материалы. Специальный выпуск. 2011. Т. 10. С. 86.

6. Dawson J.M., Kim H.C., Arnush D., Fried B.D., Gould R.W., Heflinger L., O'Kennel C.F., Romesser T.E., Stenzel R.L., Wong A.Y., and Wuerker R.F. // Phys. Rev. Lett. 1976. V. 37. P. 1531.
7. Dawson J.M. Patent USA 4.059. 1977. С. 761.
8. Romesser T.E., Vanek V., Tang T. // IEEE Int. Conf. Plasma Sei. Abstracts. 1983. P. 71.
9. Louvet P. US Patent № 5.422. 1995. P. 481.
10. Карчевский А.И., Потанин Е.П. Патент РФ № 2217223 // Оpubл. 27.11.2003. Бюл. № 33.
11. Беломытцев С.Я. Физика сильноточных пучков заряженных частиц: учебное пособие / Под ред. С.Я. Беломытцева, И.В. Пегель. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008.
12. Долголенко Д.А., Карчевский А.И., Лазько В.С., Муромкин Ю.А., Пашковский В.Г. // Доклад на 2-й Всероссийской научной конференции "Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул". Звенигород, 29 сентября–3 октября 1997, С. 94.
13. Карчевский А.И., Потанин Е.П. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 1. С. 96.