

ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАЗДЕЛЕНИЮ ИЗОТОПОВ ЛИТИЯ В ПЛАЗМЕ МЕТОДОМ ИОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА

© 2019 г. Д. А. Долголенко^{а,*}, Ю. А. Муромкин^{а,**}, В. Г. Пашковский^{а,***}

^а Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Физико-техническое отделение
Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

*e-mail: dolgolenko_da@nrcki.ru

**e-mail: muromkin_ya@nrcki.ru

***e-mail: vasya_p62@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019 г.

После доработки 19.04.2019 г.

Принята к публикации 21.05.2019 г.

Дано описание экспериментальной установки, созданной для разделения изотопов лития в плазме методом ионного циклотронного резонанса (и.ц.р.), и в ней достижимы высокие значения коэффициента разделения изотопов лития – $\alpha > 50$. Подробно описаны источник литиевой плазмы, схема циклотронного нагрева ионов, коллекторы лития, обогащенного и обедненного изотопом ${}^6\text{Li}$, а также применявшиеся способы измерения параметров литиевой плазмы и разделительных характеристик установки. Отмечено использование “тени”, полосы без осадка лития, от коллектора обогащенного лития на коллекторе обедненного лития для диагностики вращения плазменного столба. Кратко представлены проекты и.ц.р.-установок, предназначенных для разделения изотопов других химических элементов, которые разрабатывались с участием авторов данной статьи.

DOI: 10.1134/S0032816219060065

1. ВВЕДЕНИЕ

Метод разделения изотопов в плазме с использованием изотопически селективного ионного циклотронного резонанса (и.ц.р.) был предложен в США Доусоном (Dawson) и др. [1]. Описанные опыты были проведены на установках лабораторного масштаба, однако через небольшой промежуток времени в США приступили к созданию предпрототипа промышленной установки для разделения изотопов урана этим методом. Известно, что в начале 1980-х опыты с ураном были проведены. Публикаций с описанием этих опытов не было. Кратко описаны эксперименты по разделению изотопов стабильных химических элементов на предпрототипе [2–5]. Некоторую информацию о постановке экспериментов можно найти в патентной заявке [6] фирмы TRW (Incorporated Thompson-Ramo-Wooldridge), где выполнялись эксперименты. В середине 1980-х эксперименты по и.ц.р.-разделению были начаты во Франции в Центре исследований в Сакле. Перечни экспериментальных работ по и.ц.р.-методу разделения изотопов в плазме приведены, в частности, в статьях [7, 8].

Эксперименты по разделению изотопов лития в плазме с использованием ионного циклотронного резонанса были начаты в Москве в Институ-

те атомной энергии им. И.В. Курчатова (ИАЭ) в конце 1980-х [9]. К этому времени в лаборатории Отделения молекулярной физики ИАЭ, руководимой А.И. Карчевским, были проведены эксперименты по разделению изотопов в плазменных центрифугах и газовых разрядах. Достигнутые результаты уступали полученным с применением и.ц.р.-метода разделения. Это обстоятельство и определило смену направления исследований в лаборатории.

Предварительно были проведены модельные эксперименты с использованием смеси ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ [10], показавшие применимость имеющейся в лаборатории техники для и.ц.р.-разделения изотопов легких химических элементов. Основные результаты экспериментов опубликованы в статьях [11–13]. Часть результатов опубликована в докладах на конференциях. Ссылки на эти доклады приведены ниже при рассмотрении конкретных вопросов.

2. СХЕМА УСТАНОВКИ

Для создания установки было использовано оборудование стационарной плазменной центрифуги [14]. В опытах с циклотронным нагревом плазмы требуется ввести высокочастотные поля в

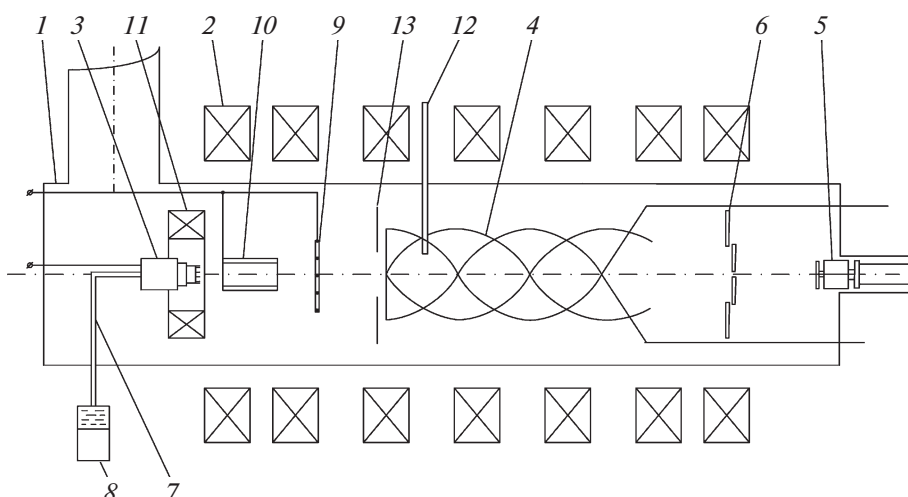


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – вакуумная камера; 2 – катушки магнита; 3 – катод источника литиевой плазмы; 4 – винтовая антенна; 5 – отборник проб лития; 6 – приемник плазменного потока; 7 – трубка для подачи жидкого лития; 8 – поршневое устройство; 9 – сетчатый анод; 10 – цилиндрический анод; 11 – внутренняя катушка магнита; 12 – электрический зонд; 13 – диафрагма.

вакуумную камеру и для этого необходимо выбрать один из двух вариантов конструкции: либо проводить опыты в металлической вакуумной камере с разрезами, располагая в.ч.-антенну снаружи, либо ввести антенну внутрь сплошной металлической камеры, расположив проводники антенны на удалении от стенок. Был выбран второй вариант. Заметим, что доступные диэлектрические вакуумные камеры, например алундовые, позволяющие извне вводить высокочастотные электромагнитные поля, для работы с литием не пригодны из-за его химической активности.

Схема установки представлена на рис. 1. Диаметр проходного отверстия в водоохлаждаемой вакуумной камере 1 составлял 0.45 м, длина камеры – 1.7 м. Магнит плазменной центрифуги [14], состоявший из шести 48-витковых катушек, изготовленных из медной трубки квадратного сечения $10 \times 10 \text{ мм}^2$ с круглым отверстием $\varnothing 5 \text{ мм}$ для водяного охлаждения, был дополнен одной такой же катушкой, и катушки 2 были расставлены так, что создавали в приосевой области $\varnothing 0.2 \text{ м}$ установки достаточно однородной индукции магнитного поля ($\Delta B/B < 1\%$) на длине 0.8 м. Максимальная индукция однородного магнитного поля составляла 0.3 Тл.

Выбору источника литиевой плазмы (3, 7–11) способствовали работы [15, 16], посвященные разделению изотопов лития в холловском ускорителе. Разделительные эффекты, наблюдавшиеся в этих работах, не были значительными (см. [15]), однако в них были представлены действующие конструкции источника литиевой плазмы. Одна деталь источника [16] – катод в виде вольфрамовой трубки, заполненной отрезками воль-

фрамовой проволоки, – уже применялась в работе [14] при возбуждении сильноточного стационарного разряда в инертных газах.

Для нагрева ионов была выбрана винтовая антенна с вращающимся и бегущим магнитным полем [17], создающая в приосевой области однородные азимутальные и радиальные электрические поля. Использовались волновая (λ) и полуволновая антенны ($\lambda/2$) с закруткой в один оборот и пол-оборота соответственно (λ – длина волны тока в антенне). Движение ионов в электромагнитных полях, создаваемых такими антеннами, описано, в частности, в [18]. На рис. 1 представлена винтовая волновая антенна 4. Антенну составляли два скрученных вокруг оси витка, каждый из которых был включен в отдельный колебательный контур (предложение В.С. Лазько). Два усилителя, мощностью 2 кВт каждый, с помощью трансформаторов поддерживали колебания тока в контурах (частота f до 660 кГц, амплитуда тока в антенне I_A до 150 А). Колебания были сдвинуты по фазе на $\pi/2$ таким образом, чтобы направление вращения поля в антенне совпадало с направлением циклотронного вращения ионов в постоянном продольном магнитном поле.

Коллекторы лития (5), обогащенного и обедненного изотопом ${}^6\text{Li}$, далее будут показаны в деталях. На рис. 1 следует обратить внимание на водоохлаждаемый приемник плазменного потока 6 с открываемым отверстием. Приемник защищал коллекторы от попадания на них лития до установления необходимых параметров разделительного процесса. Через отверстие коллектор вдвигался к месту отбора пробы лития. Отбор осуществлялся либо у края антенны в области с



Рис. 2. Внешний вид установки.

однородным постоянным магнитным полем, либо отступя от края в спадающем магнитном поле. Последний вариант отбора, возможно, более эффективен (сравнение вариантов отбора проводилось в работе [12]). На рис. 2 показан внешний вид установки.

3. ИСТОЧНИК ЛИТИЕВОЙ ПЛАЗМЫ

3.1. Конструкция источника

Стационарную работу источника обеспечивала непрерывная подача жидкого лития в катод.



Рис. 3. Катод источника литиевой плазмы.

Расплавленный литий подавался по нагреваемой током трубке 7 (рис. 1) из нержавеющей стали с помощью поршневой системы подачи 8. Трубка герметично присоединялась к входу внутреннего канала в молибденовом корпусе катода. На выходе из корпуса канал расширялся до $\varnothing 31$ мм. В этом расширении осесимметрично, с сохранением проходного отверстия, на винтах закреплялся молибденовый диск $\varnothing 26$ мм. Кольцевой зазор на выходе набивался отрезками вольфрамовой проволоки $\varnothing 1$ мм. На рис. 3 показан внешний вид катода. Катод был изготовлен из молибденовой цилиндрической заготовки. Внутри он имел графитовый подогреватель мощностью 2.5 кВт. При таком подогреве жидкий литий во внутреннем канале испарялся. Пары выходили из катода через зазоры между отрезками вольфрамовой проволоки, создавая среду для разряда.

В опытах по и.ц.р.-разделению изотопов лития пришлось отказаться от использования устройства как холловского ускорителя [16], поскольку электрический потенциал катода передавался через плазменный столб на коллекторы лития, что влияло на условия отбора ионов. В связи с этим на расстоянии ≈ 200 мм от катода был установлен второй анод – сетка из вольфрамовой проволоки $\varnothing 2$ мм (9 на рис. 1), и источником литиевой плазмы являлся дуговой разряд вдоль магнитного поля между катодом и сетчатым анодом (неофициальное название установки – “Сирень” – происходит от цвета литиевой плазмы). Литиевая плазма выходила за сетчатый анод (геометрическая прозрачность 0.65) и распространялась вдоль магнитного поля в зону циклотронного нагрева ионов. Температура сетки в период разряда обычно превышала 1000°C . Для поджига разряда при напряжении 100 В требовалась подача жидкого лития в катод в количестве $> 10^{-2}$ г/с. После поджига подачу лития снижали на порядок.

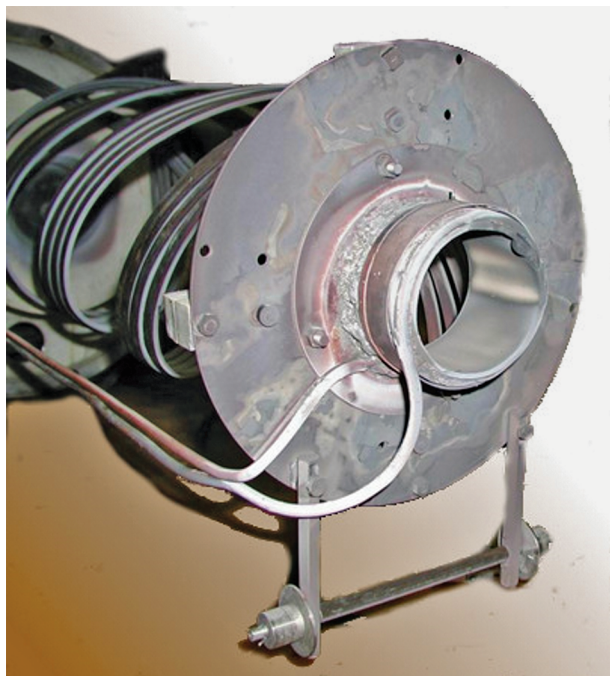


Рис. 4. Антенна для циклотронного нагрева ионов лития в плазме в сборке с защитной диафрагмой и водоохлаждаемым тубусом.

В электрической цепи источника оставался и вольфрамовый анод 10 холловского ускорителя (\varnothing 60, длина 100 мм). При наличии внешнего продольного магнитного поля на него отщеплялась лишь незначительная часть разрядного тока. Для стабилизации разряда в цепь катода ставилось балластное водоохлаждаемое сопротивление 0.3 Ом, изготовленное из нихромовой ленты толщиной 0.2 мм и шириной 2 см. Стационарное напряжение на разряде в источнике при подаче лития в количестве 10^{-3} г/с составляло 20–30 В при токе разряда $I_d = 75$ А.

Эксперименты по разделению изотопов в основном проводились при подаче лития $(1-3) \cdot 10^{-3}$ г/с. Магнитная катушка 11 холловского ускорителя включалась с целью увеличения сечения плазменной струи в зоне циклотронного нагрева. При включении катушки магнитную индукцию в области катода можно было увеличить до 0.5–0.6 Тл.

Измерения показали [19, 20], что на пролетном расстоянии до зоны циклотронного нагрева ионов (область внутри антенны) плазменный поток полностью освобождается от нейтрального компонента.

3.2. Параметры литиевой плазмы, создаваемой источником

Информация о параметрах литиевой плазмы получена с помощью двойных и одиночных элект-

рических зондов (12 на рис. 1), а также многосеточных электростатических анализаторов ионных энергий типа описанных в [21]. Для диагностики и.ц.р.-нагрева в ионизированном газе анализаторы применялись в работе [10]. Основное препятствие для контактных измерений в металлической плазме – образование проводящих осадков на изоляторах, установленных во вводимых в плазму устройствах. Чтобы избежать образования осадков лития, изоляторы устанавливались в конце углублений и лабиринтов.

Оценки плотности потока литиевой плазмы можно было грубо контролировать по массе литиевого осадка на водоохлаждаемой заслонке отверстия в приемнике плазменного потока (6 на рис. 1). При подаче жидкого лития в катод $\sim 10^{-3}$ г/с и токе разряда $I_d = 75$ А плотность плазмы на оси плазменного шнура составляла $\sim 10^{12}$ см $^{-3}$, а энергия ионов 5–10 эВ. В среднем по циклу работы около одной трети лития ионизировалось и переносилось на приемник плазменного потока [20].

4. ЦИКЛОТРОННЫЙ НАГРЕВ ИОНОВ

4.1. Генерация электромагнитных в.ч.-колебаний в плазме

В вакуумной камере располагается в.ч.-антенна, остальные элементы в.ч. колебательной цепи расположены снаружи. Колебания тока в антенне поддерживаются с помощью двух мощных усилителей. В течение эксперимента частота колебаний оставалась постоянной, настройка на циклотронный резонанс проводилась изменением внешнего магнитного поля. Индикацию настройки на резонанс выбранного изотопного иона обеспечивал сигнал с приемника ионов в электростатическом анализаторе. Элементы в.ч.-цепи и индикатор настройки на циклотронный резонанс подробно представлены далее в этом разделе.

4.2. Винтовая антенна

Выбор винтовой антенны для опытов с циклотронным нагревом ионов был связан, прежде всего, с возможностью нагревать ионы по всему сечению плазменного шнура. Традиционно винтовые антенны используются при ионном циклотронном нагреве в расчете на компенсацию объемных зарядов, создаваемых нагретыми ионами, с помощью токов электронов вдоль постоянного магнитного поля [4]. Внешний вид волновой антенны (λ -антенны) показан на рис. 4. Витки антенны были образованы четырьмя параллельными медными трубками 10×4 мм с внутренним отверстием 8×2 мм, используемым для водяного охлаждения. Длина антенны – 65 см, диаметр – 20 см.

При амплитуде тока в контурах λ -антенны $I_A = 100$ А амплитуда компонент в.ч. магнитного поля

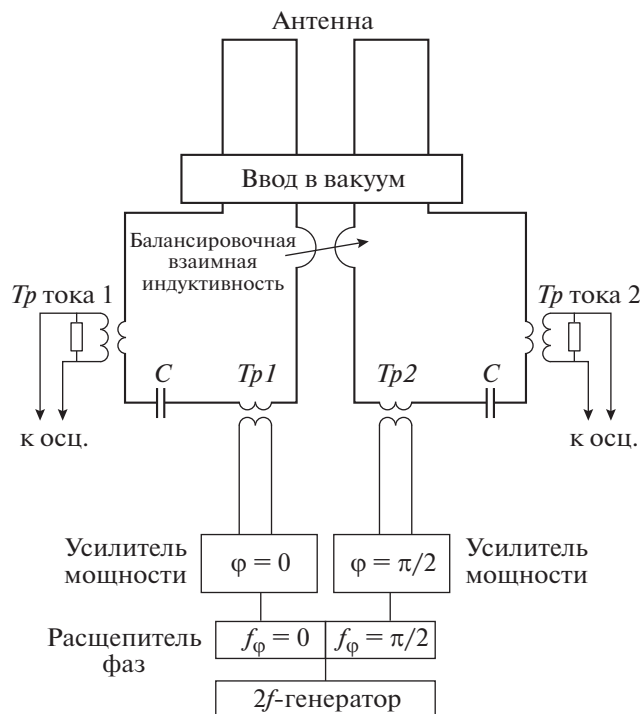


Рис. 5. Электрическая схема возбуждения электромагнитных полей в зоне нагрева ионов.

в литиевой плазме составляла $B_r \approx B_\phi \approx (3-4) \cdot 10^{-4}$ Тл [22]. Напряженность радиального электрического поля, создаваемого антенной в приосевой области в вакууме, $E_r \sim 50$ В/м. Как показали измерения, в плазме поперечное электрическое поле усиливается [23]. Этот эффект предсказан в [6], его расчет выполнен в работе [24].

Во всех опытах от потока нейтралов антенну защищала ниобеивая диафрагма (13 на рис. 1, а также на рис. 4). В некоторых экспериментах с той же целью дополнительно устанавливался водоохлаждаемый тубус (рис. 4).

4.3. В.ч.-цепь и.ц.р.-нагрева

Прямоугольный сигнал задающего генератора, работающего на удвоенной рабочей частоте $2f$, поступал на цифровой расщепитель фаз, создающий два сигнала частотой f , сдвинутые друг относительно друга по фазе на $\pm\pi/2$ (в зависимости от выбранного направления вращения поля). Сигналы поступали на входы двух идентичных трансistorных усилителей мощности. Последние через в.ч.-фидеры и трансформаторы были соединены с соответствующими антенными контурами. Каждый усилитель мог передавать в антенный контур до 2 кВт в.ч.-мощности. Электрическая схема в.ч.-цепи представлена на рис. 5.

Усилители в.ч.-мощности работают на согласованную омическую нагрузку (в нашем случае

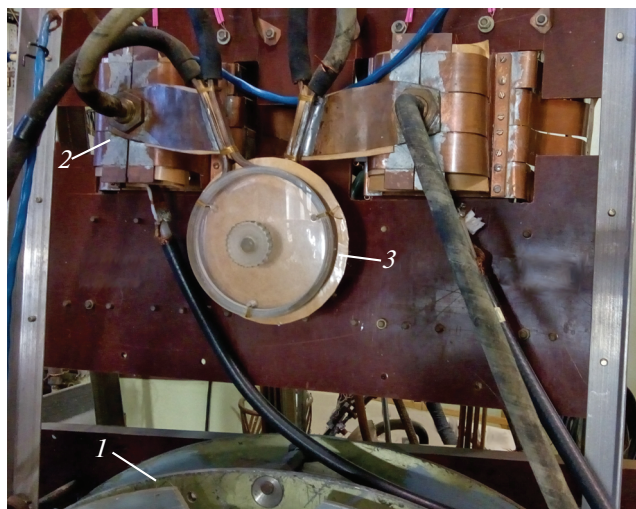


Рис. 6. Внешний вид согласующих трансформаторов и балансировочной взаимной индуктивности. 1 – катушка магнита установки; 2 – согласующий трансформатор; 3 – взаимная индуктивность.

50 Ом). Для передачи в.ч.-мощности, как правило, используют коаксиальные кабели с таким же характеристическим импедансом (50 Ом). На конце такой передающей линии также должна стоять активная нагрузка (50 Ом). В нашем случае антенна является высокоомной индуктивной нагрузкой с малой активной компонентой. Для согласования импеданса такой нагрузки с активным сопротивлением 50 Ом применялся согласующий в.ч.-трансформатор на тороидальном ферритовом сердечнике ($Tr1$ и $Tr2$).

В.ч.-кабель нагружался на первичную обмотку трансформатора, имеющую, как правило, 4–5 витков. Вторичная обмотка (один виток) нагружалась на последовательный колебательный контур, состоящий из индуктивности антенной рамки и нескольких параллельных конденсаторов К15У-1 (рис. 2). Емкость конденсаторов подбиралась на последовательный резонанс с индуктивностью антенны на заданной частоте (преимущественно 655–658 кГц). В этом случае реактивная компонента импеданса антенны исчезала, а активная компонента трансформировалась до уровня, близкого к 50 Ом. Необходимо отметить, что для нормальной работы в.ч.-системы частота резонанса обоих плеч антенны должна быть одинакова, поэтому резонансные частоты плеч подстраивались на одну частоту.

Особенностью двухконтурной спиральной антенны является значительная взаимная индуктивность между ее плечами. Это приводит к тому, что при возбуждении антенны напряжениями со сдвигом фаз 90° сдвиг фаз токов плеч антенны оказывается отличным от 90° . Чтобы преодолеть этот эффект, была применена искусственная от-

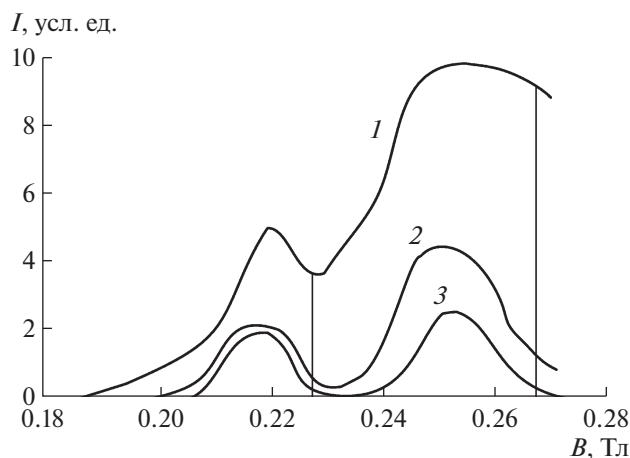


Рис. 7. Сигналы электростатического анализатора ионного тока в режиме циклотронного нагрева ионов ($f = 580$ кГц) в зависимости от внешнего магнитного поля [26]. Задерживающий потенциал на приемнике ионов $V_r = 60$ В (1), 130 В (2), 160 В (3). Вертикальными линиями отмечены значения резонансных магнитных полей для ионов ${}^6\text{Li}^+$ и ${}^7\text{Li}^+$ с нулевой продольной скоростью.

рицательная взаимная индуктивность, состоящая из двух витков с токами от различных плеч. Эти витки отстояли друг от друга на регулируемом расстоянии. Внешний вид согласующих трансформаторов и взаимного балансировочного индуктора показан на рис. 6. Развязка взаимной индуктивности плеч антенны с помощью регулируемой компенсаторной взаимной индуктивности позволяла поддерживать сдвиг фаз токов 90° при начальном сдвиге фаз напряжений 90° во всех режимах работы установки.

В.ч.-токи в плечах антенны измерялись с помощью трансформаторов тока (рис. 5), выполненных также на ферритовых кольцах. Коэффициент трансформации составлял, как правило, 1:100. Вторичная обмотка трансформатора тока (100 витков) нагружалась на низкоомное низкоиндуктивное сопротивление (1–2 Ом). Сигнал с трансформаторов токов обоих плеч подавался на двухлучевой осциллограф, где регистрировались амплитуды и фазы токов антенны.

4.4. Диагностика ионного циклотронного резонанса в плазме

Для настройки процесса циклотронного нагрева ионов в экспериментах использовался многосеточный анализатор поперечных энергий, пригодный для работы в литиевой плазме [9, 11]. Циклотронная частота иона с нулевой продольной скоростью $\omega_{ci} = eB/M_i$, где e – заряд иона, M_i – его масса, B – индукция магнитного поля (в

практических целях удобна формула $\omega_{ci} \approx (Z/A) \cdot 10^4 H$, где Z – кратность заряда иона, A , а.е.м. – его масса; H , Э – напряженность магнитного поля). Настройка на резонанс при заданной частоте в.ч.-колебаний ω_{ci} проводилась путем изменения внешнего магнитного поля. Резонансное магнитное поле для нагрева ионов вследствие эффекта Доплера не совпадает с величиной $B = \omega_{ci}M_i/e$. Кроме того, величина резонансного поля зависит от направления продольного распространения волны тока в антенне [25] (следствие ее направленности [17]). Ориентиром для выбора магнитного поля, при котором следует отбирать пробы обогащенного лития, служило положение резонансной кривой в сигнале анализатора [11, 26]. В качестве примера на рис. 7 приведены резонансные кривые, полученные при частоте нагревающего поля $f = 580$ кГц. Опыт показал, что максимальное обогащение лития изотопом ${}^6\text{Li}$ наблюдается в полях, меньших резонансного на 0.01–0.02 Тл. Энергия нагретых ионов лития, измеренная с помощью многосеточного анализатора поперечных энергий, составляла 100–200 эВ.

5. СПОСОБЫ СБОРА ОБОГАЩЕННОГО ЛИТИЯ

5.1. Физические основы достижения изотопической селективности в отборе ионов на коллектор

Достижение изотопической селективности в отборе лития из плазменного потока в и.ц.р.-методе разделения обусловлено селективным нагревом ионов – изотопов. Следовало ожидать, что в плазме с двухтемпературными ионами осадок вещества на поверхность, расположенную параллельно скорости потока, будет обогащен нагретым компонентом: у нагретых частиц больший ларморовский радиус $\rho_L = M_i v_{i\perp} / eB$, где $v_{i\perp}$ – скорость движения иона поперек магнитного поля. Вследствие этого нагретые ионы будут собраны на коллектор из слоя большей толщины (в практических целях удобна формула $\rho_L, \text{ см} \approx 143 \sqrt{W_{\perp} A} / ZH$, где W_{\perp} , эВ – энергия движения иона поперек магнитного поля). Опыт полностью подтверждает это предположение. Дальнейшее повышение селективности (на порядок) достигается приложением к коллектору положительного, отталкивающего ионы, электрического потенциала V_r . При этом, однако, уменьшается количество собранного вещества.

Прообразом коллектора нагретых ионов стал измеритель величины поперечных к магнитному полю ионных энергий [27] (альтернатива многосеточному анализатору [21]). Конструкция отборника в и.ц.р.-методе разделения изотопов впервые представлена в патентной заявке [6]. Однако эту конструкцию рационально использовать

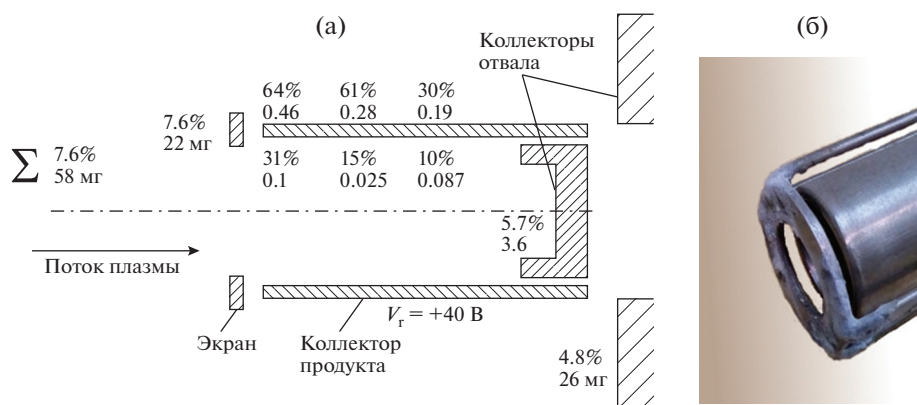


Рис. 8. Схема отборника с коллектором обогащенного лития в виде полого цилиндра (а), где приведены результаты одного из экспериментов: количество лития в осадке (мг) и процентное содержание изотопа ${}^6\text{Li}$ в нем, под знаком Σ указано полное количество собранного лития и среднее содержание изотопа ${}^6\text{Li}$; б – вид входа в отборник.

только в плазменных столбах большого диаметра (0.3–0.5 м), так что представленные далее цилиндрические конструкции, применявшиеся в потоке литиевой плазмы \varnothing 5–6 см, существенно отличаются от нее. Были проведены сравнительные эксперименты и с плоским коллектором (см. ниже), который можно рассматривать как элемент конструкции, описанной в [6].

5.2. Измерения изотопного состава и массы проб лития

В одном отношении работа с литием более проста, чем работа с другими металлами: литий взаимодействует с водой. Для определения изотопного состава лития водные растворы литиевых проб анализировались на масс-спектрометре МИ1201, изготовленном на Сумском приборостроительном заводе “Электрон” (Украина). Этот прибор оборудован камерой для поверхностной ионизации атомов на накаливаемых вольфрамовых полосках. В камеру одновременно помещается 11 проб. Точность определения концентрации изотопов лития в пробах составляла $\pm 3\%$ отн. Количество лития в пробах определялось путем титрования в 0.01 н. растворе H_2SO_4 с точностью $\pm 10\%$. Для измерения малых количеств лития использовался атомный эмиссионный спектрометр с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES, Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer, Perkin-Elmer Corporation).

Проверкой этих измерений служили вычисления концентрации изотопа ${}^6\text{Li}$ при суммировании всех проб, взятых в данном эксперименте с коллекторов обогащенного и обедненного лития. Ее значение должно быть близким к концентрации ${}^6\text{Li}$ в потоке питания. На последующих рисунках (рис. 8–рис. 10) вычисленная величина указана под знаком Σ . В большинстве экспериментов использовал-

ся литий со следующей исходной концентрацией изотопов: ${}^6\text{Li}$ (7.5%), ${}^7\text{Li}$ (92.5%).

По результатам измерений изотопного состава проб лития рассчитывался коэффициент разделения $\alpha = c(1 - c_0)/c_0(1 - c)$, где c – концентрация изотопа ${}^6\text{Li}$ в пробе, c_0 – его концентрация в начальном потоке (питании). В промышленных методах разделения величину α рассчитывают относительно концентрации выделяемого изотопа в отвале, так что мы занижали величину α . Малые раздельные эффекты, $\alpha < 2$, также характеризуют коэффициентом обогащения $\epsilon = (\alpha - 1) \cdot 100\%$.

5.3. Цилиндрические коллекторы

При работе с литием все элементы коллектора должны охлаждаться: литий – легко испаряемый металл [28]. Именно необходимость охлаждения элементов отборника затрудняла создание “идеальной” конструкции (“идеальной” в отношении полноты сбора нагретых ионов). На рис. 8а представлена схема полого цилиндрического коллектора, применявшегося в [29]. На схеме приведены результаты одного из экспериментов по отбору лития, обогащенного и обедненного изотопом ${}^6\text{Li}$. Время отбора составляло 3 мин (таким оно было и во всех описанных опытах). На рис. 8б показан вид торца этого отборника, поясняющий схему. Основным элементом отборника служит водоохлаждаемый полый цилиндр из нержавеющей стали \varnothing 32 × 25 мм – коллектор обогащенного лития (по принятой разделительной терминологии – коллектор продукта, collector of product).

Как показывает опыт, тепловые нагрузки на коллектор продукта ($> 1 \text{ Вт/см}^2$) связаны в большей степени не с ионным, а с электронным током. Поток электронов достигает коллектора несмотря на наличие экрана (рис. 8а). В этой конструкции экраном служит водоохлаждаемое кольцо размером \varnothing 38 ×

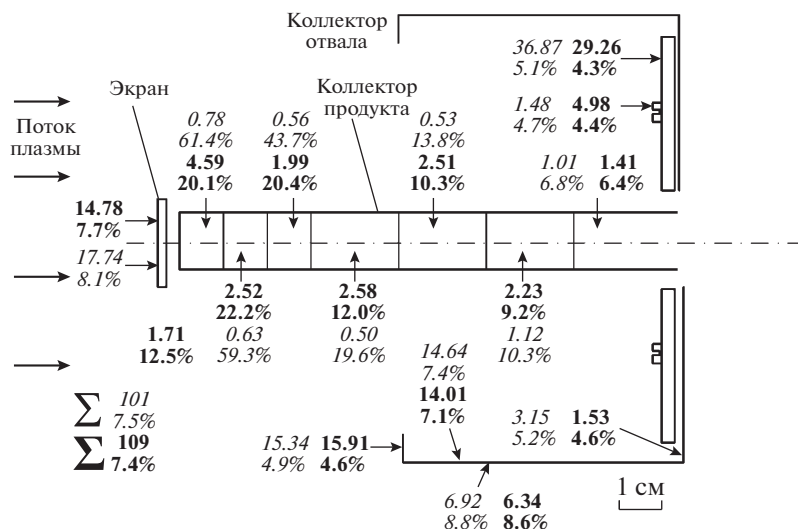


Рис. 9. Схема отборника с коллектором обогащенного лития в виде сплошного цилиндра, где приведены результаты одного из экспериментов [23]: масса осадков (мг) и содержание ⁶Li (%). Для удобства записи результатов на схеме диаметр коллектора отвала увеличен вдвое. Результаты отбора при V_r = 0 В выделены полужирным шрифтом, при V_r = +60 В – курсивом.

× 21 мм и толщиной 4 мм. Экран предназначен для защиты коллектора от прямого попадания потока плазмы с еще не разделенными нагретыми и холодными ионами. В данной конструкции экран удерживают трубки водяного охлаждения (рис. 8б). Достаточно высокий экран способствует увеличению коэффициента разделения α. При высоте экрана на h > ρ_{Lc} (ρ_{Lc} – ларморовский радиус холодного иона – изотопа ⁷Li⁺) количество холодных ионов, поступающих на коллектор продукта, должно существенно уменьшиться. В этой конструкции использовались два коллектора лития, обедненного изотопом ⁶Li (рис. 8а), – коллекторы отвала, waste collectors, по принятой терминологии.

Конструкция коллектора продукта в виде сплошного цилиндра Ø 16 мм представлена на рис. 9. Такой коллектор позволял добиться высоких концентраций ⁶Li – до 83% (α ≈ 60) [12], но при низком коэффициенте извлечения целевого изотопа: γ < 0.1. Коэффициент извлечения γ рассчитывался как отношение количества целевого изотопа (⁶Li) m_c, собранного на коллектор, к количеству этого изотопа m_f, переносимого плазменным потоком за время отбора: γ = m_c(⁶Li)/m_f(⁶Li). Осадок вещества на экране, имеющий концентрацию изотопов, близкую к концентрации в питании, фактически исключается из разделяемого потока. Усиление постоянного магнитного поля в установке и, следовательно, уменьшение ларморовских радиусов ионов позволили бы использовать экраны с меньшей площадью и несколько уменьшить потери разделяемого потока. Данная конструкция применялась во многих экспериментах, в частности в [12]. В некоторых опы-

тах было заметно возрастание количества осадка на трубке коллектора перед отвалом, связанное с распылением осадка на отвале. В связи с этим в дальнейших экспериментах применялась более сложная конструкция приемника отвала, состоящая из трех коаксиальных цилиндров. Эта конструкция представлена на рис. 10. В экспериментах, описанных в данной статье, удобнее было использовать коллектор продукта в виде сплошного цилиндра. Для практических же целей, если увеличить диаметр плазменной струи на 2–3 см, то однозначно следует применить коллектор продукта в виде полого цилиндра. Возможные варианты цилиндрических коллекторов предложены в [30].

5.4. Плоский коллектор

На рис. 10а приведены результаты одного из экспериментов с плоским коллектором продукта. Отдельно показана форма экрана перед коллектором. Этот эксперимент проведен при меньшем разрядном токе I_d в источнике плазмы (I_d = 40 А), когда, в отличие от результатов работы [13], сохраняется поперечная неоднородность осаждения лития и при V_r = + 20 В. Вид отборника с плоским коллектором на рис. 10б поясняет конструкцию. Данный коллектор применялся в экспериментах, выполненных в работе [13]. Экран и коллекторы обогащенного и обедненного лития были изготовлены из меди, и они охлаждались за счет теплоотдачи на осевую трубку, имевшую водяное охлаждение.

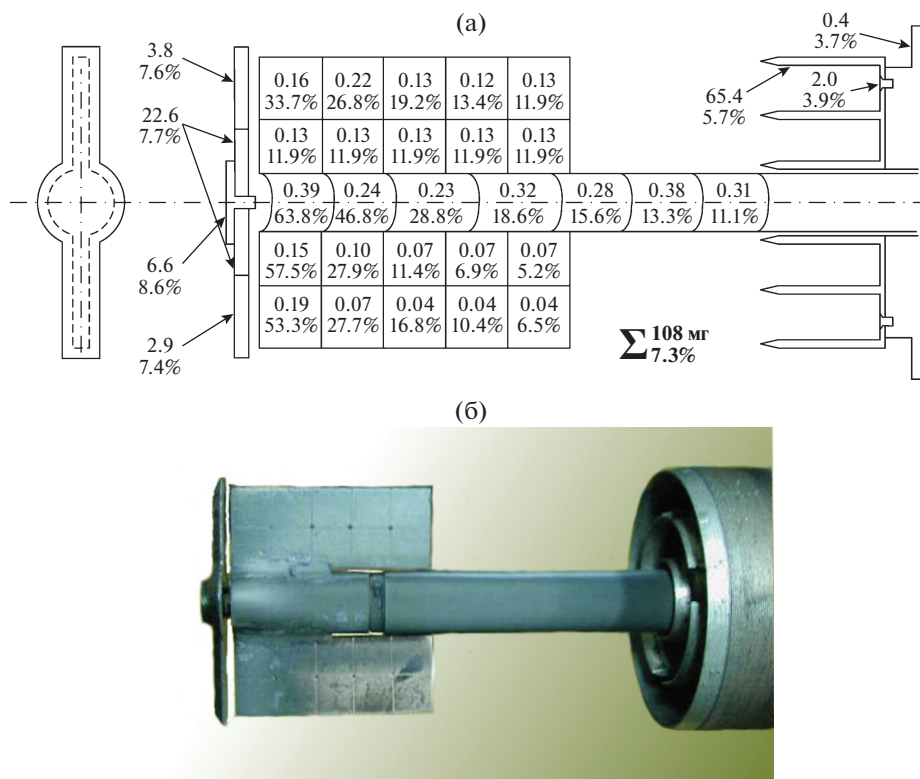


Рис. 10. а – распределение осадка (масса в мг) и концентрации изотопа ${}^6\text{Li}$ (в %) по поверхности плоского отборника, осадки с обеих сторон пластин суммированы, $V_r = +20$ В (слева показана форма экрана перед коллектором продукта); б – отборник с плоским коллектором обогащенного лития после одного из экспериментов (для наглядности пластина коллектора продукта повернута по часовой стрелке на $\pi/2$).

5.5. Диагностика вращения плазменного столба

Вращающееся поперечное магнитное поле, наложенное на плазменный столб, находящийся в постоянном продольном магнитном поле, способно возбудить стационарные азимутальные электрические токи (current drive) и, при соответствующем выборе направления вращения поля, уменьшить или даже изменить направление поля внутри плазменного столба (Блевин (Blevin) и Тонеман (Thoneman) [31]). Этот эффект определил одно из направлений управляемого термоядерного синтеза, представленное установками Ротамак (Rotamak [32]).

В недавней работе Ракса (Rax) и Гуру (Gueroult) [33] предлагается использовать комбинацию постоянного и вращающегося магнитных полей с целью центрифужного разделения в замагниченной плазме ионов по массам (имеются в виду изотопы и компоненты отработавшего ядерного топлива). Авторы подчеркнули, что для этого необходимо возбудить вращение всего плазменного столба (ионов и электронов), так что азимутальный ток (цель current drive) в этих условиях может отсутствовать. В известных экспериментах с наложением вращающегося магнитного поля на замагниченный плазменный шнур условия для эффективного вращения ионного компонента пока

четко не определены. В качестве возможного механизма для возбуждения азимутального движения ионного компонента рассматриваются электрон-ионные соударения (электронный “ветер”). Можно предположить, что реализации вращения ионного компонента будет способствовать недавняя теоретическая работа [34].

Опыты с плоским коллектором позволяют диагностировать вращение ионного компонента плазмы. На рис. 11 представлена “тень” от коллектора обогащенного лития на коллекторе отвала в отсутствие вращающегося магнитного поля, свидетельствующая об отсутствии вращения шнура плазмы, создаваемого источником плазмы.

На представленной ранее фотографии плоского коллектора обогащенного лития (рис. 10б) заметна “тень” от коллектора обогащенного лития на трубке – держателе коллектора. Фотография свидетельствует об отсутствии вращения шнура плазмы во вращающемся в.ч.-поле.

На основе наблюдений за “тенью” в [13] был сделан вывод о том, что в условиях проведенных экспериментов с литиевой плазмой в антенне длиной ~ 100 см вращающееся магнитное поле $((3-4) \cdot 10^{-4}$ Тл, $f = 500-700$ кГц на частоте, равной ионной циклотронной частоте), селективно



Рис. 11. “Тень” на коллекторе обедненного лития от коллектора обогащенного при выключенном циклотронном нагреве. *I* – места без осадка лития.

нагревающее ионы ${}^6\text{Li}^+$ в постоянном магнитном поле ≤ 0.25 Тл, не успевают за время пролета привести ионный компонент плазмы с плотностью $n_e \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ в быстрое вращение по азимуту ($f < 5$ кГц). Это было дополнительным результатом в исследованиях и.ц.р.-метода разделения. Данное наблюдение позволяет исключить этот небольшой диапазон параметров из поисков эффекта вращения ионов в замагниченной плазме под действием вращающегося магнитного поля.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная установка “Сирень” позволила получить ряд оригинальных экспериментальных результатов, в частности была показана зависимость изотопической селективности циклотронного нагрева ионов от величины постоянного магнитного поля, в котором производится нагрев. Оригинальным в техническом отношении было использование в качестве источника литиевой плазмы разряда постоянного тока. В большинстве других экспериментов по и.ц.р.-разделению изотопов источником плазмы служил сверхвысокочастотный э.ц.р.-разряд (разряд в условиях электронного циклотронного резонанса).

В экспериментах с литием были достигнуты относительно высокие концентрации изотопа ${}^6\text{Li}$: 80–90%. При этом, однако, оказывался низким коэффициент извлечения изотопа ${}^6\text{Li}$ из плазменного потока: $\gamma < 0.1$. К сожалению, не удалось найти способ существенно повысить его ве-

личину. Слабое магнитное поле в установке ($B < 0.3$ Тл) не позволяло перейти к разделению изотопов более тяжелых элементов и ограничивало возможности для опытов с целью повышения коэффициента извлечения. Поэтому вместе с продолжением экспериментов, с учетом собственного опыта и результатов опубликованных работ других авторов, разрабатывались проекты новой установки. Первоначально это был проект универсальной установки, предназначенной для разделения изотопов всех элементов—металлов и полупроводников. Разработка проекта поддерживалась Международным научно-техническим центром (МНТЦ-ISTC), руководителями проекта # 830 [35] являлись А.И. Карчевский и В.Е. Кейлин. Под руководством В.Е. Кейлина, возглавлявшего в РНЦ “Курчатовский институт” Отдел сверхпроводящих магнитных систем, разрабатывалась конструкция сверхпроводящего соленоида универсальной установки с полем до 4 Тл. Для создания установки требовалась значительная финансовая сумма – 300–500 млн рублей. Целесообразность создания установки обосновывалась, прежде всего, возможностью выделения на ней десятков килограммов изотопа ${}^{157}\text{Gd}$ в год. Природный гадолиний используется в качестве выгорающей добавки в энергетических ядерных реакторах. Замена природного гадолиния на обогащенный изотопом ${}^{157}\text{Gd}$ улучшила бы экономические показатели и повысила безопасность работы реакторов. Специалисты в области ядерной энергетики не поддерживали проект из-за высокой проектной цены обогащенного гадолиния.

В дальнейшем при поддержке РФФИ был разработан эскизный проект разделительной и.ц.р.-установки для выделения нейтронно-избыточного изотопа ${}^{48}\text{Ca}$ [36–40]. Этот изотоп в граммовых количествах используется в фундаментальных исследованиях в области ядерной физики. Более широкому применению этого изотопа в ядерной физике препятствует высокая цена выделения: его получают на электромагнитных разделительных установках. Использование в качестве сырья в электромагнитных сепараторах продукта и.ц.р.-установок – кальция, обогащенного изотопом ${}^{48}\text{Ca}$ в десятки раз, позволило бы резко увеличить выделение ${}^{48}\text{Ca}$ на электромагнитных установках. По оценке конструкторов [36, 37], производительность такой и.ц.р.-установки может составить ~ 1 г/сутки кальция, обогащенного изотопом ${}^{48}\text{Ca}$ до 20%. Добавим, что в проекте [36–40] также планируется создание сверхпроводящего соленоида, но меньших размеров и с меньшим магнитным полем – до 2.5 Тл. Однако и этот менее затратный проект пока не реализован. Таким образом, опыт по разделению изотопов лития и.ц.р.-методом не был дополнен в лаборатории опытом разделения изотопов других элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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., Wuerker R.F. // Phys. Rev. Lett. 1976. V. 37. P. 1547.
2. Moffa P., Cheshire D., Flanders B., Myer R., Robinette W., Thomson J., Young S. // IEEE Int. Conf. Record Abstracts. IEEE Int. Conf. Plasma Sci. 1983. P. 69.
3. Mussetto M., Romesser T.E., Dixon D., Strawitch C., Tang J. // IEEE Int. Conf. Record Abstracts. IEEE Int. Conf. Plasma Sci. 1983. P. 70.
4. Myer R., Moffa P., Thomson J. // IEEE Int. Conf. Record Abstracts. IEEE Int. Conf. Plasma Sci. 1983. P. 70.
5. Romesser T.E., Vanek V., Tang J., Dixon D., Bayless J., Mussetto M., Strawitch C., Higgins L. // IEEE Int. Conf. Record Abstracts. IEEE Int. Conf. Plasma Sci. 1983. P. 71.
6. Romesser T.E., Lazar N.H., McVey B.D., Arnush D., Heflinger L.O. Patent Cooperation Treaty (International Application) WO 84/02803. 19.07.84.
7. Долголенко Д.А., Муромкин Ю.А. // УФН. 2009. Т. 179. № 4. С. 369.
<https://doi.org/10.3367/UFNe.0179.200904c.0369>
8. Muromkin Yu.A. // J. Energy and Power Engineering. 2013. V. 7. P. 306.
9. Карчевский А.И., Лазько В.С., Муромкин Ю.А., Мячиков А.И., Пашковский В.Г., Устинов А.Л., Чепкасов А.В. Препринт ИАЭ-5239/7. М., 1990.
10. Муромкин Ю.А., Пашковский В.Г. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 6. С. 737.
11. Карчевский А.И., Лазько В.С., Муромкин Ю.А., Мячиков А.И., Пашковский В.Г., Устинов А.Л., Чепкасов А.В. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. С. 411.
12. Горшунов Н.М., Долголенко Д.А., Зотин Г.Е., Карчевский А.И., Лазько В.С., Муромкин Ю.А., Пашковский В.Г., Пешков А.Т. // Прикладная физика. 2001. № 3. С. 34.
13. Бабичев А.П., Горшунов Н.М., Долголенко Д.А., Зотин Г.Е., Карчевский А.И., Лазько В.С., Муромкин Ю.А., Пашковский В.Г., Пешков А.Т. // Физика плазмы. 2014. Т. 40. С. 864.
14. Белорусов А.В., Горбунова Е.Ф., Карчевский А.И., Муромкин Ю.А., Мячиков А.И., Устинов А.Л. // ЖТФ. 1985. Т. 55. С. 919.
15. Roehling D.J., Fradkin D.B. US Patent 3,845,300. 29.10.74.
16. Лесков Л.В., Михалёв В.Г., Огородников С.Н., Степанов В.А. // III Всес. конф. по плазменным ускорителям: Тезисы докладов. Минск: ИФ АН БССР, 1976. С. 216.
17. Knox S.O., Paoloni F.J., Kristiansen M. // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. P. 2516.
18. Лазько В.С. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. Вып. 5. С. 523.
19. Бабичев А.П., Горшунов Н.М., Долголенко Д.А., Зотин Г.Е., Карчевский А.И., Лазько В.С., Муромкин Ю.А., Пашковский В.Г., Пешков А.Т. // Сборник докладов VII Всероссийской (Международной) научной конференции “Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул”. М.: ЦНИИАтоминформ, 2002. С. 208.
20. Пашковский В.Г. // Сборник докладов VII Всероссийской (Международной) научной конференции “Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул”. М.: ЦНИИАтоминформ, 2002. С. 214.
21. Лобиков Е.А., Настюха А.И. // ЖТФ. 1962. Т. 32. С. 1223.
22. Compant La Fontaine A., Pashkovsky V.G. // Phys. Plasmas. 1995. V. 2. № 12. P. 4641.
<https://doi.org/10.1063/1.870955>
23. Dolgolenko D.A., Gorshunov N.M., Karchevsky A.I., Lazko V.S., Muromkin Yu.A., Pashkovsky V.G., Peshkov A.T., Zotin G.E. // Proc. 7th Workshop “Separation phenomena in liquids and gases”. MEPhI, Moscow. 2000. P. 157.
24. Тимофеев А.В. // УФН. 2006. Т. 176. № 11. С. 1227.
25. Dolgolenko D.A., Karchevsky A.I., Lazko V.S., Muromkin Yu.A., Pashkovsky V.G., Ustinov A.L. // Proc. 4th Workshop “Separation phenomena in liquids and gases”. Tsinghua University, Beijing, P.R. China. 1994. P. 93.
26. Karchevsky A.I., Lazko V.S., Muromkin Yu.A., Pashkovsky V.G., Ustinov A.L., Dolgolenko D.A. // Comptes rendus des Journees sur les Isotopes Stables. Saclay, France, 24–25 Novembre 1993. P. 343.
27. Motley R.W., Kawabe T. // Phys. Fluids. 1971. V. 14. P. 1019.
28. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. С. 200.
29. Dolgolenko D.A., Karchevsky A.I., Lazko V.S., Muromkin Yu.A., Pashkovsky V.G., Ustinov A.L. // Comptes rendus des Journees sur les Isotopes Stables. Saclay, France, 24–25 Novembre 1993. P. 348.
30. Горшунов Н.М., Долголенко Д.А., Зотин Г.Е., Лазько В.С., Муромкин Ю.А., Пашковский В.Г., Пешков А.Т. Патент на изобретение № 2278725 РФ // Опул. 27.01.2006. Бюл. № 3.
31. Blevin H.A., Thoneman P.C. // Nucl. Fusion. 1962. Suppl. Part 1. P. 55.
32. Jones I.R. // Phys. Plasmas. 1999. V. 6. P. 1950.
<https://doi.org/10.1063/1.873452>
33. Rax J.-M., Gueroult R. // J. Plasma Phys. 2016. V. 82. P. 595820504-1.
<https://doi.org/10.1017/S0022377816000878>
34. Rax J.-M., Kolmes E.J., Ochs I.E., Fisch N.J., Gueroult R. // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. P. 012303-1.
<https://doi.org/10.1063/1.5064520>
35. <http://www.istc.int/en/projects>
36. Горшунов Н.М., Долголенко Д.А., Муромкин Ю.А., Потанин Е.П., Устинов А.Л. // ПТЭ. 2011. № 1. С. 105.
37. Горшунов Н.М., Лазько В.С., Муромкин Ю.А., Потанин Е.П., Устинов А.Л. // Перспективные материалы. 2011. Спец. вып. 10. С. 72.
38. Анашкин О.П., Динисилов А.С., Кейлин В.Е., Ковалёв И.А., Наумов А.В., Щербаков В.И. // Перспективные материалы. 2011. Спец. вып. 10. С. 116.
39. Горшунов Н.М., Долголенко Д.А., Муромкин Ю.А., Пешков А.Т., Потанин Е.П., Устинов А.Л. // Перспективные материалы. 2013. Спец. вып. 14. С. 116.
40. Анашкин О.П., Динисилов А.С., Кейлин В.Е., Ковалёв И.А., Муромкин Ю.А., Наумов А.В., Щербаков В.И. // Перспективные материалы. 2013. Спец. вып. 14. С. 151.