

**КОНВЕРТАЦИЯ КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЕЩЕСТВА
В ПОТОК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ЗАДАЧ
ПЛАЗМЕННОЙ МАСС-СЕПАРАЦИИ С ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМОЙ**© 2023 г. Н. Н. Антонов^{а,*}, Г. Д. Лизякин^а, С. Б. Ветрова^а, А. Д. Мельников^а^а Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, Россия

*e-mail: antonovnickola@gmail.com

Поступила в редакцию 31.10.2022 г.

После доработки 30.11.2022 г.

Принята к публикации 26.12.2022 г.

Концепция плазменной масс-сепарации с потенциальной ямой предполагает создание специализированных источников плазмы, отвечающих ряду требований. В качестве основных можно выделить следующие: высокая степень ионизации плазменного потока, однократная ионизация, возможность работы со сложной смесью оксидов и металлов в качестве рабочего вещества, высокая производительность (до 1 кг/ч), кинетическая энергия на уровне нескольких десятков электрон-вольт. Одним из возможных применений этой концепции является разделение компонентов отработавшего ядерного топлива по группам масс. Преобразование конденсированного вещества в поток низкотемпературной плазмы и его дальнейшая инжекция в камеру сепарации является начальным этапом процесса и во многом определяет эффективность технологии. В данной работе представлены результаты исследований энергетического распределения ионов свинца в плазменной струе источника, созданного на основе несамостоятельного дугового разряда с горячим катодом в магнитном поле. Проанализировано влияние этого распределения на процесс разделения.

Ключевые слова: плазменная сепарация, источники плазмы, поток низкотемпературной плазмы, энергетическое распределение, многосеточный анализатор, плазменная струя

DOI: 10.31857/S0367292123600188, EDN: VFBNZ

1. ВВЕДЕНИЕ

Концепция плазменной масс-сепарации является перспективным методом переработки материалов [1]. Метод основан на преобразовании смеси конденсированных элементов в поток низкотемпературной плазмы и дальнейшем их разделении в скрещенных полях $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, формируемых в плазме. В рамках этого подхода траектория частицы определяется отношением заряда к массе при прочих равных параметрах. Развитие этой концепции и ее основные этапы предполагают необходимость проведения исследований в таких областях как превращение вещества в поток плазмы с определенными параметрами [2, 3], формирование электрического поля в плазме (плазменная среда необходима для компенсации объемного заряда) [4], сбор разделенных веществ на коллекторы и изучение механизмов осаждения при кинетической энергии частиц до 100 эВ. Одной из возможных схем для реализации этого метода может выступать плазменная сепарация с потенциальной ямой и инжекцией рабочего вещества вдоль силовых линий магнитного поля [5].

Одними из основных факторов, влияющими на эффективность процесса, являются исходные динамические характеристики заряженных частиц, направление их инжекции и координата инжекции. Энергетическое распределение сепарируемых ионов и направление инжекции существенно влияют на масштаб сепарации [6, 7]. При инжекции потока поперек силовых линий магнитного поля распределение заряженных частиц по энергии напрямую влияет на эффективность разделения, как в классических магнитных сепараторах. Инжекция разделяемого потока вдоль силовых линий магнитного поля позволяет избавиться от данного влияния, однако энергетическое распределение частиц при инжекции вдоль силовых линий магнитного поля не перестает терять свою важность. Значение средней энергии фактически определяет размер камеры сепарации вдоль оси симметрии установки (размер коллектора по оси z) и влияет на эффективность осаждения материалов на подложку коллектора. Присутствие высокоэнергетических частиц может привести к распылению ранее собранного вещества.

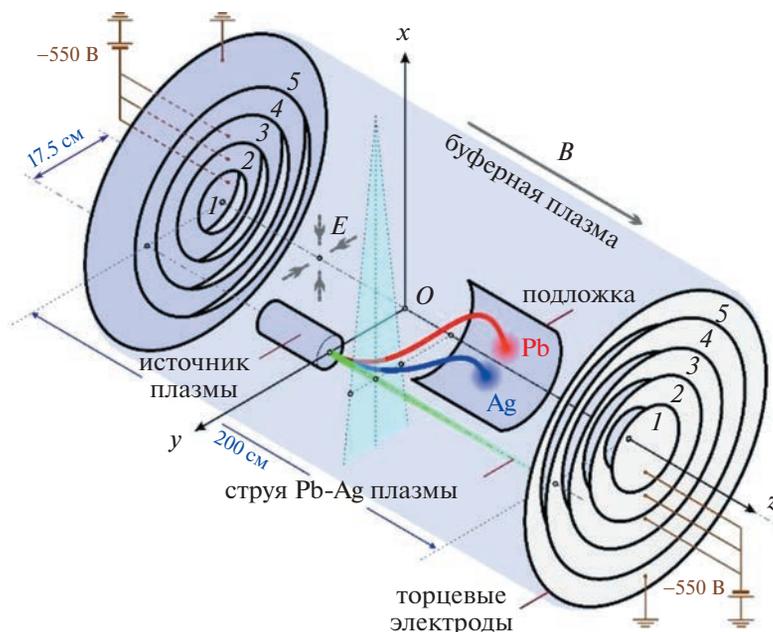


Рис. 1. Схема плазменного масс-сепаратора.

Основной целью данной работы является изучение энергетического распределения ионов плазмы разделяемых веществ и определение его влияния на процесс сепарации. На данном этапе в качестве источника плазмы используется несамостоятельный дуговой разряд с горячим катодом и независимой инъекцией паров рабочего вещества в разрядный промежуток. В качестве метода диагностики использовался многосеточный анализатор [8]. Этот метод был неоднократно апробирован и все механизмы, источники ошибок, а также многие аспекты работы данного типа зондовой диагностики достаточно изучены [9].

2. КОНЦЕПЦИЯ ПЛАЗМЕННОЙ МАСС-СЕПАРАЦИИ С ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМОЙ

Принципиальная схема работы плазменного масс-сепаратора с потенциальной ямой представлена на рис. 1. Ключевыми элементами являются источник плазмы, буферная плазма для компенсации пространственного заряда и система формирования распределения потенциала (торцевые электроды, инициирующие отражательный разряд), подложка для сбора разделяемых веществ. Как видно из рис. 1, на заряженные частицы, инжектируемые вдоль силовых линий магнитного поля, не действуют силы вдоль оси z . Поэтому координаты размещения подложки и ее размеры вдоль оси z зависят от энергетического распределения частиц и среднего значения кинетической энергии. Частицы под действием радиального электрического поля увлекаются в направлении оси симметрии экспериментальной

установки. Наличие аксиального магнитного поля приводит к тому, что траектория заряженной частицы является эпитрохоидой. Характеристики эпитрохоид для частиц с разной атомной массой геометрически различны, что позволяет обеспечить разделение плазменных потоков на основе отношения заряда к массе. В рамках концепции используется часть эпитрохоиды до первого разворота, траектория частицы прерывается подложкой системы коллекторов.

Отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) представляет собой возможную смесь веществ, разделение которых актуально в настоящее время [10]. На данном этапе развития концепции в качестве модельных веществ используются серебро и свинец, моделирующие соответственно легкую и тяжелую компоненты ОЯТ. Характерное время массового разделения (время движения заряженной частицы от анода источника плазмы к подложке коллектора) для ионов с нулевой начальной радиальной скоростью при величине радиального электрического поля 15 В/см и индукции магнитного поля 1400 Гс для Pb составляет 44 мкс (время движения до подложки для Ag 30 мкс) [5].

Типичным результатом эксперимента по плазменной масс-сепарации является массовое распределение осажденного на подложке вещества. Подложка состоит из металлических квадратных элементов размером $20 \text{ на } 20 \text{ мм}$. Подложка расположена вдоль дуги окружности и прерывает траекторию заряженной частицы, которая движется вдоль эпитрохоиды. Характерные траектории частиц с различным отношением заряда к массе и расположением подложки показаны на

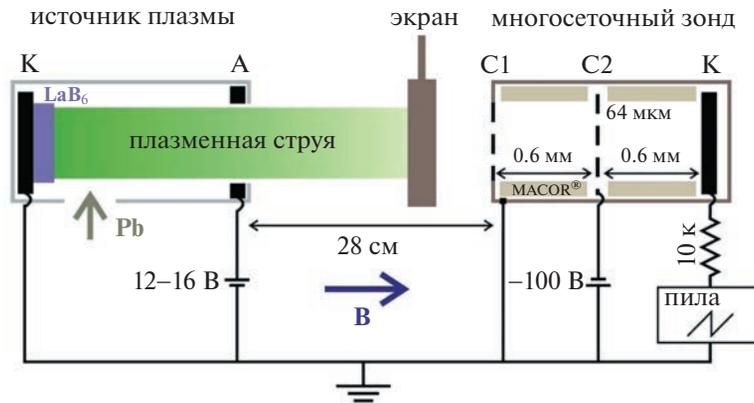


Рис. 2. Схема экспериментального модуля.

рис. 1. Разделение подложки на элементы позволяет проводить EDS-анализ осаждаемой пленки и определять элементный состав. Эта процедура позволяет сделать выводы об эффективности процесса разделения элементов [5, 11]. Как отмечалось ранее, в первом приближении силы, действующие на частицы вдоль оси симметрии, отсутствуют, и распределение массы на подложке по координате z должно определяться энергетическим распределением ионов в плазменной струе в точке инжекции. Это определяет актуальность изучения энергетического распределения ионов. Таким образом, можно провести сравнение между распределением массы на подложке, полученным экспериментально, и расчетным, основанным на распределении ионов по энергии и характерном времени разделения. Расчет начальной скорости частицы основан на значении кинетической энергии. Для иона свинца при энергии 20 эВ (скорость 4.3 км/с), радиальном электрическом поле 15 В/см и индукции магнитного поля 1400 Гс (время пролета 44 мкс) частица осаждается на подложку на расстоянии 19 см от координаты впрыска вдоль оси z .

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 2 представлена схема эксперимента с многосеточным анализатором и источником плазмы. Смесь рабочих веществ помещается в молибденовый тигель. Тигель нагревается до 1000–1450°C индукционным методом. Вещество в виде пара распространяется в разрядный промежуток и ионизируется. Генерируемая плазма инжектируется в камеру сепарации вдоль силовых линий магнитного поля через полость в аноде.

Диагностика параметров источника плазмы проводилась следующими методами: двойной зонд Ленгмюра использовался для определения плотности плазмы, одиночный плоский зонд диаметром 40 мм использовался для измерения

тока насыщения ионов в плазменной струе диаметром 20 мм, многосеточный анализатор использовался для изучения энергетического распределения ионов, спектральная диагностика оптического излучения применялась для контроля состава плазмы в потоке при экспериментах по разделению смеси. Ток ионного насыщения одиночного плоского зонда, установленного на выходе источника, характеризует производительность плазменного источника. На этом этапе получен показатель производительности 20 г/ч при использовании свинца в качестве рабочего вещества, что соответствует ионному току 2.6 А при токе разряда 120 А. При этих параметрах вольтамперная характеристика разряда является растущей (рис. 3). Концентрация плазмы в струе составляет около 10^{12} см⁻³. В этой серии опытов индукция магнитного поля была около 1400 Гс.

Угол наклона ВАХ-источника плазмы (рис. 3) зависит от таких параметров, как температура тигля (давление рабочего вещества в разрядном

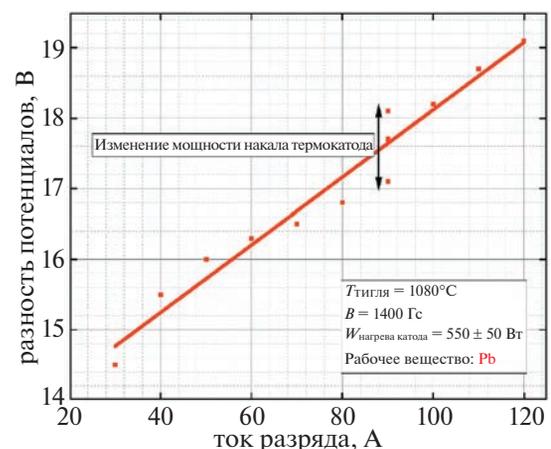


Рис. 3. Вольтамперная характеристика источника плазмы.

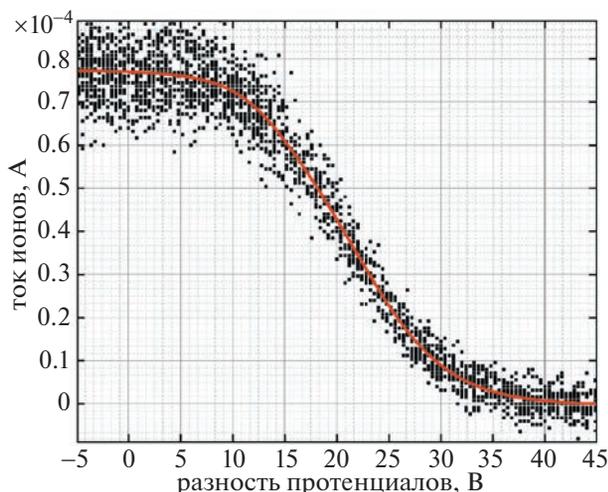


Рис. 4. Типичная вольтамперная характеристика многосеточного анализатора.

промежутке) и температура горячего катода (количество испускаемых электронов термоэмиссии). Влияние изменения мощности нагрева горячего катода LaB_6 (550 ± 50 Вт) на напряжение разряда при фиксированной температуре тигля показано на рис. 3.

На данном этапе изучался поток свинцовой плазмы. В ходе экспериментов многосеточный анализатор устанавливался (на расстоянии 28 см от анода) вдоль направления распространения плазменной струи соосно оси симметрии электродной системы источника плазмы (рис. 2). В рамках этих исследований использовалась схема с двумя сетками и коллектором. Масог® использовался в качестве диэлектрика. Первая сетка и корпус зонда принимали потенциал земли, как и катод источника плазмы. Основной задачей входной сетки являлась минимизация влияния второй (отражающей сетки) на струю плазмы. Потенциал отражающей сетки -100 В. На коллектор подавался пилообразный анализирующий сигнал с амплитудой до 110 В. Следует отметить, что такой подход позволяет измерять полную энергию, т.е. сумму кинетической и потенциальной энергии относительно потенциала земли. Ток разряда источника плазмы в эксперименте составлял 60 А. Типичная вольтамперная характеристика коллектора зонда представлена на рис. 4.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Типичный энергетический спектр (сумма кинетической и потенциальной энергий) показан на рис. 5. Ширина на полувысоте около 20 эВ. Наиболее вероятная полная энергия частиц принимает значение около 15 эВ. Для разделения кинетической и потенциальной частей энергии не-

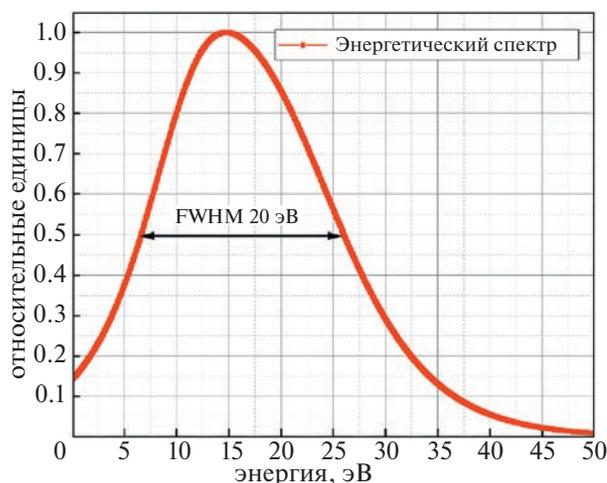


Рис. 5. Энергетическое распределение ионов в плазменной струе.

обходимо измерить потенциал плазмы. Одним из методов измерения в следующих сериях экспериментов может выступить эмиссионный зонд [12].

На рис. 6 показан результат сравнения нормированного распределения массы на подложке коллектора вдоль оси z после эксперимента по плазменной сепарации [5] и результат расчета координат, в которых инжектируемые вдоль оси z в камеру сепарации из источника ионы с энергетическим распределением осаждаются на подложку коллектора в случае отсутствия дополнительных факторов, которые могли бы повлиять на траекторию частиц. Расчет основан на полученном распределении ионов по энергии в прианодной области источника плазмы и проводился следующим образом. Каждая точка энергетического спектра была пересчитана в скорость исходя из того, что рабочим веществом является свинец (атомная масса свинца 207.2 а.е.м.). Далее, исходя из отсутствия сил, действующих на заряженные частицы вдоль оси z , эта скорость была умножена на характерное время масс-сепарации (44 мкс для свинца). Таким образом, распределение было переведено в координатное пространство. Следующим шагом была нормализация полученного распределения к единице. Фактически эта методика использовалась для получения z -координат осаждения частиц разной энергии на подложку.

Как видно, отношение нормированной экспериментальной полуширины на полувысоте к расчетной равно 2.1. Следует отметить, что эта оценка сделана на основе предположения об отсутствии углового распределения скоростей ионов в точке инжекции.

На уширение массового распределения могут влиять следующие механизмы и параметры: искажение радиального электрического поля в об-

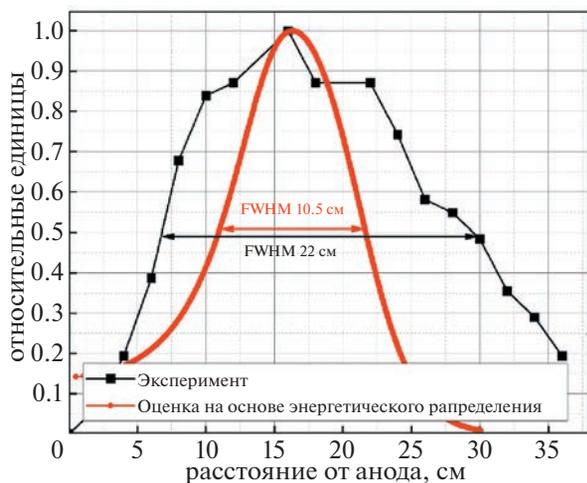


Рис. 6. Сравнение распределений.

ласти инжекции (этот эффект был продемонстрирован в [5, 13]), флуктуации радиального и аксиального распределения потенциала плазмы, недостаточная компенсация пространственного заряда при радиальной инжекции ионов из плазменной струи, столкновения с ионами буферного разряда.

Количественное влияние каждого из этих аспектов на уширение распределения массы на подложке вдоль оси z на данном этапе определить затруднительно. Однако такое наглядное представление экспериментальных данных (рис. 6) позволяет определить суммарную эффективность извлечения ионов из плазменной струи и транспорта частиц в буферном разряде сепаратора (аппаратную функцию системы). В рамках дальнейших исследований будет определено количественное влияние каждого из представленных механизмов на процесс разделения частиц.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты измерения энергетических распределений ионов свинца в потоке низкотемпературной плазмы несамостоятельного дугового разряда в магнитном поле. Наиболее вероятная полная энергия частиц принимает значение около 15 эВ при ширине на полувысоте около 20 эВ.

Анализ полученных энергетических спектров и массовых распределений на подложке в процессе сепарации может позволить сделать вывод об эффективности извлечения и транспорта частиц в буферном разряде. При дальнейшем увеличе-

нии производительности плазменного источника разделяемых смесей такой анализ позволит установить эффективность компенсации объемного заряда сепарируемых ионов плазмой буферного отражательного разряда. Анализ эффективности компенсации объемного заряда является одним из ключевых аспектов концепции плазменной масс-сепарации.

Часть работы, посвященная изучению энергетических спектров ионов, поддержана грантом Президента Российской Федерации (МК-5652.2021.1.2).

Часть работы, посвященная плазменной масс-сепарации, выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание № 075-01129-23-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zweben S.J., Gueroult R., Fisch N.J. // Phys. Plasmas. 2018. V. 25. P. 90901.
2. Usmanov R.A., Amirov R.Kh., Gavrikov A.V., Lizjakin G.D., Melnikov A.D., Polistchook V.P., Samoylov I.S., Smirnov V.P., Vorona N.A., Yartsev I.M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. V. 29. P. 015004.
3. Usmanov R.A., Amirov R.Kh., Gavrikov A.V., Lizjakin G.D., Polistchook V.P., Samoylov I.S., Smirnov V.P., Vorona N.A., Yartsev I.M. // Phys. Plasmas. 2018. V. 25. P. 063524.
4. Lizjakin G., Oiler A., Gavrikov A., Antonov N., Smirnov V. // J. Plasma Phys. 2021. V. 87. P. 905870414
5. Lizjakin G.D., Antonov N.N., Smirnov V.S., Timirkhanov R.A., Oiler A.P., Usmanov R.A., Melnikov A.D., Vorona N.A., Kislenco S.A., Gavrikov A.V., Smirnov V.P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2021. V. 54. P. 414005.
6. Smirnov V.S., Egorov R.O., Kislenco S.A., Antonov N.N., Smirnov V.P., Gavrikov A.V. // Phys. Plasmas. 2020. V. 27. P. 113503.
7. Dolgolenko D.A. Muromkin Y.A. // Phys.-Usp. 2017. V. 60. P. 994.
8. Rafalsky D., Dudin S., Aanesland A. // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 053302.
9. Simpson J.A. // Rev. Sci. Instrum. 1961. V. 32. P. 1283.
10. Zhil'tsov V.A., Kulygin V.M., Semashko N.N., Skovoroda A.A., Smirnov V.P., Timofeev A.V., Kudryavtsev E.G., Rachkov V.I., Orlov V.V. // Atomic Energy. 2006. V. 101. P. 755.
11. Usmanov R.A., Antonov N.N., Gavrikov A.V., Lizjakin G.D., Melnikov A.D., Oiler A.P., Smirnov V.P., Timirkhanov R.A., Volkov L.S., Vorona N.A. // Plasma Sci. Technol. 2022. V. 24. P. 085504.
12. Murzaev Y., Lizjakin G., Gavrikov A., Timirkhanov R., Smirnov V. // Plasma Sci. Technol. 2019. V. 21. P. 45401.
13. Antonov N., Lizjakin G., Usmanov R., Gavrikov A., Vorona N., Smirnov V. // Phys. Plasmas. 2018. V. 25. P. 123506.