

Диагностика распределения токов разделяемых пучков на приемниках вещества плазменного сепаратора

Р. А. Усманов, Н. Н. Антонов, Р. А. Тимирханов, А. П. Ойлер и
М. А. Валинуров

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

E-mail: usmanov.r@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 21 ноября 2024 г.

Аннотация. Предложен метод диагностики результатов процесса плазменной сепарации веществ на основе измерения ионных токов. Описаны электрическая схема, принцип работы и процедура калибровки. С помощью предложенного метода измерены распределения токов ионов модельной смеси свинца и серебра в эксперименте по плазменной сепарации. При помощи измерения химического состава осажденных пленок показано, что метод состоятелен. Оценены чувствительность и разрешение метода. <https://doi.org/10.33849/2024408>

1. ВВЕДЕНИЕ

Сегодня одним из наиболее актуальных направлений развития ядерной энергетики Российской Федерации является создание и промышленная реализация замкнутого ядерного топливного цикла на базе реакторов на быстрых нейтронах [1]. Среди потенциально применимых методов переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) для этой задачи рассматривается плазменный подход, обладающий рядом преимуществ перед химическими [2]. В его основе лежит метод плазменной сепарации веществ, который активно развивается в настоящее время [3].

Метод плазменной сепарации подразумевает перевод смеси конденсированного вещества в плазменный поток и его последующее разделение в электрическом и магнитном полях по группам масс. Под разделением понимается разведение траекторий ионов в пространстве на два потока (тяжелых и легких) и их последующее осаждение на коллекторах. Именно разделение на два потока оказывается привлекательным для целей переработки ОЯТ как технологии гражданского назначения, так как в массовом распределении составляющих топлива между актиноидами и продуктами распада другие элементы отсутствуют (существует массовая щель в диапазоне $m = 160\text{--}230$ а.е.м.) Для достижения относительно высокой производительности разделения, оно производится в присутствии буферной плазмы, компенсирующей объемный заряд.

При разработке метода плазменной сепарации необходимо решать не только задачи производительно-го перевода тугоплавкого конденсированного вещества в плазменный поток [4], формирования необходимых распределений электрического и магнитного полей [5] и эффективного улавливания разделяемых потоков, но также и вопросы диагностики самого процесса, позволяющие обнаружить факт достижения результата разделения.

Среди множества существующих методов диагностики, применяющихся в задачах физики низкотемпературной плазмы и выходящих за ее пределы, можно выделить несколько перспективных для диагностики результата разделения. Одним из них является оптический метод [6], основанный на выделении в составе излучения плазмы спектральных линий разделяемых компонент и визуализации положения пучков путем сбо-

ра излучения в области сепарации в веерной геометрии. Также применяется компонентный анализ продуктов осаждения на коллекторах, который может показать распределение содержания того или иного сепарируемого элемента и определить коэффициент очистки [7]. Недостатком данного метода, так же как и взвешивания коллекторов, является трудность его реализации в реальном времени. Привлекательным способом непрерывного анализа является диагностика с помощью электрических зондов [8]. Несмотря на то, что токи зондов не чувствительны к сорту ионов в плазменном потоке, ими возможно измерять со значительным временным разрешением распределение зарядов вблизи коллекторов. Подобные измерения успешно применяются в схемах плазменного разделения веществ [9].

В данной работе описывается метод диагностики результатов процесса плазменного разделения, основанный на измерении ионных токов насыщения набора плоских зондов. Приведены описание системы зондов и измерительные схемы. Представлены результаты тестирования метода в эксперименте по плазменной сепарации бинарной смеси свинца ($m_{Pb} = 207$ а.е.м.) и серебра ($m_{Ag} = 108$ а.е.м.), моделирующих динамику движения компонентов ОЯТ в процессе плазменного разделения.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ

Для измерения распределения ионных токов использовался набор из шестнадцати плоских зондов, которые располагались на коллекторе, принимающем разделяемые потоки веществ в процессе плазменной сепарации. Для независимого измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) зондов, они должны быть электрически изолированы друг от друга и от принимающего коллектора. Схема плоского зонда и его изоляции приведена на рисунке 1. Зонд имел форму квадрата со стороной 18 мм, к центру которого приварена металлическая шпилька. Толщина зонда составляла 1 мм. Зонд изолировался от коллектора изоляционными шайбами из фторопласта, шпилька оборачивалась пленкой из каптона [10]. К шпильке прикручивался провод, ведущий к измерительной цепи.

Для определения ионных токов достаточно измерять только ионные ветви ВАХ. Схема их измерения представлена на рисунке 2. Последовательно зонду в цепи располагался углеродистый резистор 100 Ом

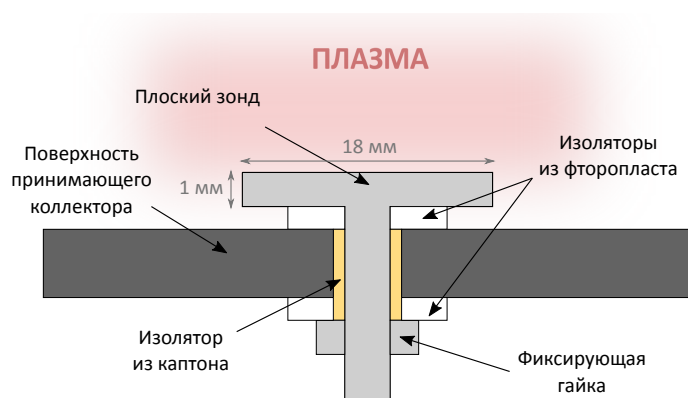


Рисунок 1. Схема плоского зонда.

для измерения протекающего тока по падению напряжения. Измерительные резисторы были подключены к шестнадцати-канальному 24-битному АЦП L-Card LTR114 с максимальной суммарной частотой преобразования до 4 кГц. АЦП мог измерять напряжение амплитудой до 10 В, поэтому для его защиты от перенапряжения, в случае появления электрического контакта между зондом и коллектором, в цепь включались варисторы с рабочим напряжением 11 В. Для дополнительной защиты от короткого замыкания установлены плавкие предохранители на ток 0,05 А. Зонды были подключены к одному источнику напряжения, величина которого изменялась от 0 до -250 В. Напряжение источника измерялось при помощи делителя напряжения $R2/(R1 + R2)$ с коэффициентом $1/50$ и отдельным, синхронизируемым с данными токов, АЦП. Величина сопротивления делителя напряжения подобрана так, чтобы ток, протекающий через него, значительно превосходил суммарный ток зондов. Суммарный ток зондов по предварительным измерениям, не превышал 50 мА. При варьировании напряжения источника питания одновременно записывались все шестнадцать ВАХ системы зондов. Ионная ветвь ВАХ плоского зонда имеет хорошо определяемое насыщение при приложенном отрицательном потенциале относительно плавающего [8]. В насыщении ток плоского зонда имеет горизонтальный вид и почти не изменяется при изменении напряжения. Для определения ионного тока из плазмы на зонд горизонтальный участок ионной ветви ВАХ усреднялся.

В ходе процесса плазменной сепарации траектории ионов разделяются в пространстве и заканчиваются на принимающем коллекторе [3]. Коллектор представлял из себя охлаждаемую водой пластину — часть боковой поверхности цилиндра, размерами 48 см вдоль длинной стороны и 30 см — вдоль короткой. На коллектор можно установить до 384 пробников (16 строк и 24 ряда) для анализа распределения характеристик осаждаемых потоков. Зонды устанавливались на данный коллектор вдоль короткой стороны. Фотография коллектора с установленными зондами приведена на рисунке 3. Также на нем проиллюстрированы ход траекторий ионов разделяемых компонент и их координаты осаждения на коллекторе.

Проверка работоспособности предложенного метода диагностики ионных токов проводилась в тестовом эксперименте по плазменному разделению бинарной

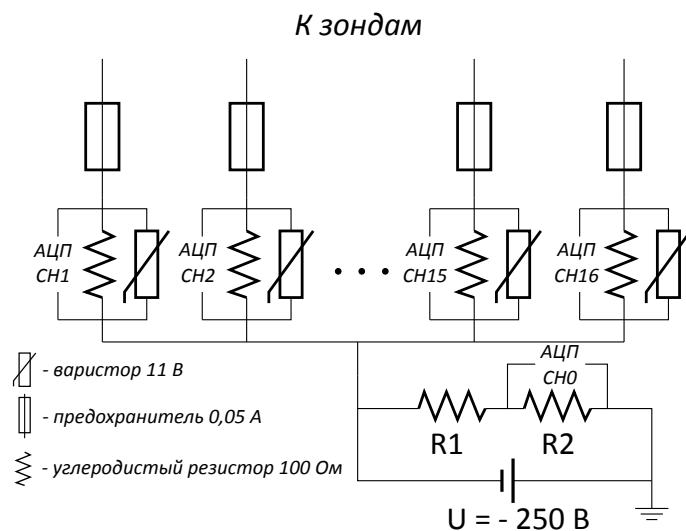


Рисунок 2. Электрическая схема измерения ВАХ зондов.

смеси Ag+Pb. Плазменная сепарация проводилась в схеме с потенциальной ямой [3]. Постановка эксперимента следующая. В цилиндрической вакуумной камере длиной 2 м и диаметром 1 м, в присутствии постоянного однородного магнитного поля величиной 1400 Гс, направленного вдоль оси камеры, при помощи концентрических электродов, расположенных на торцах, генерировался отражательный разряд Пеннинга [11] в атмосфере гелия. Давление гелия составляло около 0,3 мТорр. Напряжение на электродах составляло -800 В относительно заземленных стенок. Отражательный разряд формировал в объеме радиальное электрическое поле практически постоянной величины 12 В/см, направленное от периферии к центру. Внутри камеры располагался инжектор плазмы разделяемых компонент (см. рисунок 3), в котором зажигался дуговой разряд в парах смеси Ag+Pb [12]. Через анод плазма смеси поступала в рабочий объем камеры, и в скрещенных электрическом и магнитном полях траектории ионов, содержащихся в потоке, разделялись по параметру отношения заряда к массе, заканчиваясь на коллекторе. Зонды, установленные на коллекторе, измеряли распределение ионного тока разделяемых пучков, которое должно соответствовать координатам их осаждения. Величина плавающего потенциала составляла около -120 В, ионная ветвь зондовых ВАХ прописывалась в диапазоне напряжений от -200 до -120 В.

Ионные токи на зонды складывались из токов разделяемых пучков и тока ионов буферного разряда Пеннинга. Для выделения ионной компоненты именно пучков производилась процедура калибровки. Предварительно измерялись ионные токи только от буферного разряда. Далее из распределения токов, зарегистрированных в процессе сепарации, вычитался ток буферного разряда. Получающееся распределение токов в результате соответствовало распределению ионных потоков сепарируемых пучков вблизи коллектора.

Измерение токов ионов не позволяет выделить конкретную ионную компоненту в осаждающемся потоке. Проверить, является ли измеряемый сигнал сигналом именно разделяемых потоков, возможно, проведя измерения независимым методом. Для этой цели применялся

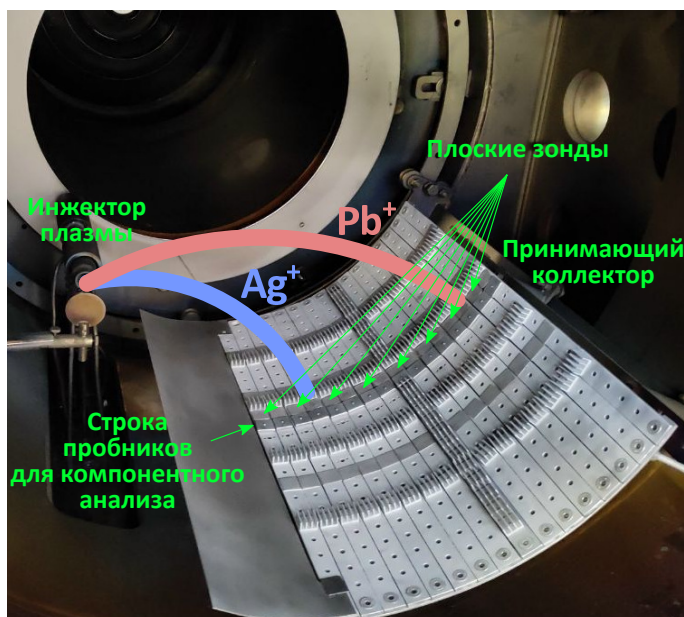


Рисунок 3. Фотография принимающего коллектора с установленными зондами.

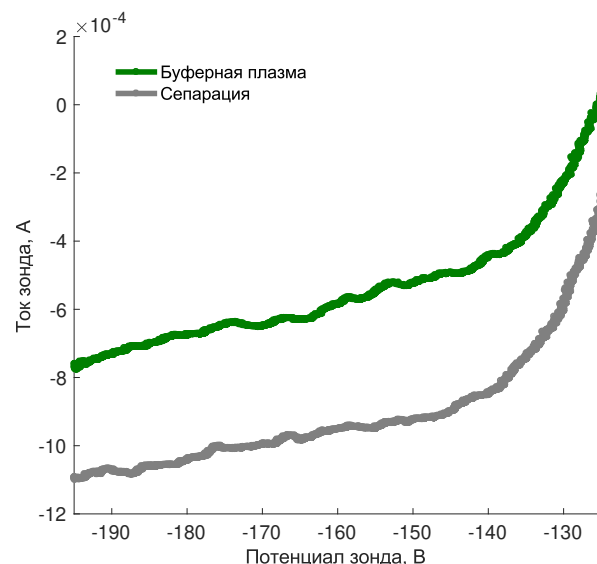


Рисунок 4. Примеры ионных ветвей ВАХ одного из плоских зондов, зарегистрированных при горении буферной плазмы и при сепарации.

дополнительный набор измерительных пробников, который устанавливался рядом с зондами на коллекторе. Пробники имели аналогичные зондам размеры и количество. В процессе плазменной сепарации на них осаждались те же потоки разделяемых веществ. Пленка, образовавшаяся на них в конце эксперимента, анализировалась методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS) [13]. Анализ позволял получить данные о процентном содержании Ag и Pb по поверхности коллектора и сравнить их с данными измерений токов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты проверки работоспособности метода контроля процесса плазменного разделения приведены ниже.

На рисунке 4 изображены примеры вида ионных ветвей ВАХ одного из плоских зондов, зарегистрированных при горении буферной плазмы и при сепарации. На приведенных графиках видно, что ионное насыщение начинается с величины потенциала зонда около -140 В. Величины токов зондов на ВАХ в диапазоне от -190 В до -140 В усреднялись, и результат усреднения принимался равным ионному току насыщения.

На рисунке 5 изображено распределение ионного тока по поперечной координате принимающего коллектора, измеренное при помощи набора плоских зондов. На нем приведены распределения токов по коллектору для трех случаев: сигнал только от буферной плазмы; сигнал от буферной плазмы и сепарируемых потоков одновременно; разность этих двух сигналов.

Как видно из рисунка, операция вычитания позволяет обнаружить в распределении токов два локальных максимума. Эти максимумы должны соответствовать координатам осаждения ионных потоков на принимающем коллекторе. Максимум, находящийся на координате около 13 см, соответствует сигналу ионов Ag^+ , а максимум на координате около 24 см — сигналу ионов Pb^+ .

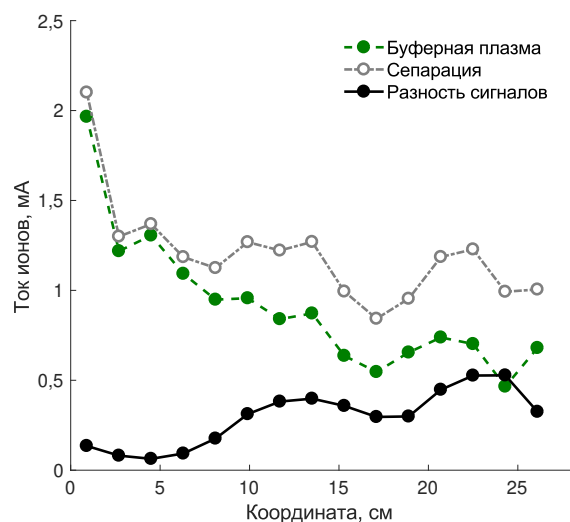


Рисунок 5. Распределение ионных токов по поперечной координате принимающего коллектора.

Можно заметить, что сигналы токов без дополнительной обработки, отмеченные на рисунке 5, характеризуются наиболее высокими значениями в диапазоне координат 0–3 см. Это вызвано следующим обстоятельством. Буферная плазма находится в скрещенных электрическом и магнитном полях, что приводит к ее дрейфовому движению, которое заключается во вращении вокруг аксиальной оси камеры. Вращение таково, что ионы гелия движутся в направлении вдоль поперечной координаты принимающего коллектора. Таким образом, двигаясь из свободного пространства и встречая на своем пути коллектор, именно они обеспечивают сигнал ионного тока на зондах, расположенных в диапазоне координат 0–3 см.

Данные о распределении химических элементов в составе оседающих на коллектор покрытий дополняют

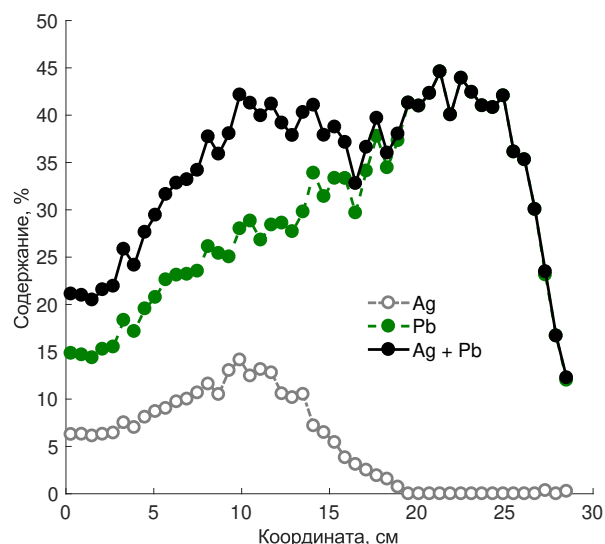


Рисунок 6. Распределение содержания Ag и Pb в осадочных покрытиях вдоль поперечной координаты принимающего коллектора.

данные о распределении токов. На рисунке 6 приведены результаты измерения содержания Ag и Pb в осадочных покрытиях вдоль поперечной координаты принимающего коллектора, полученное методом EDS.

Данные рисунка 6 позволяют сделать вывод о том, что измерения ионных токов достоверны. Максимальное содержание атомов Ag находится на координате около 10 см, а максимальное содержание атомов Pb — на координате около 23 см. На этих же координатах находятся локальные максимумы измеренных ионных токов на рисунке 5. Распределение содержания суммы Ag и Pb, отмеченное на рисунке 6, также демонстрирует два локальных максимума, совпадающие по координатам с максимумами на распределении токов.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Оценим чувствительность описанной диагностики к концентрации осаждающихся потоков. Согласно данным, приведенным на рисунке 5, чувствительность можно оценить, исходя из величины минимально измеримой разницы между сигналами от токов в режиме сепарации и отдельно буферной плазмы. Флуктуации тока буферного разряда, согласно специально проведенным измерениям, находятся на уровне 0.1 мА. Также при включении инжектора плазмы состояние буферного разряда немного меняется, что добавляет ошибку в процедуру калибровки. Будем считать, что достоверно определяемая разность сигналов составляет порядка 0.2 мА. Также будем считать, что ионы приходят на плоский зонд с энергией, равной температуре электронов, согласно критерию Бомы [14]. Тогда, учитывая площадь зонда ($\approx 3.2 \text{ см}^2$), и воспользовавшись данными о температуре электронов буферной плазмы ($\approx 5 \text{ эВ}$) из [3], оценим концентрацию ионов n_i в потоке по формуле, описывающей ионный ток на плоский зонд [8]:

$$I = en_i S \sqrt{\frac{2T_e}{M}}, \quad (1)$$

где M — масса иона, I — ток на зонд, S — площадь зонда, T_e — температура электронов, e — заряд электрона.

Концентрация в этих условиях составляет порядка 10^9 см^{-3} для ионов серебра (108 а.е.м.).

Понятие разрешающей способности предложенного метода диагностики применимо в случае контроля процесса разделения, когда в распределении ионных токов на коллекторе ожидается обнаружить не менее двух максимумов. Она определяется минимальным расстоянием между максимумами, на котором они все еще разрешимы. Для данных рисунка 5 минимально разрешимое расстояние составляет порядка ширины максимума, то есть около 5 см. Однако отметим, что на ширину пучка, достигающего коллектора, влияет множество факторов, не зависящих от системы диагностики. К ним относится разброс углов и энергий ионов на выходе из инжектора плазмы, а также амплитуда и частота флуктуаций электрического поля. Минимальное же расстояние, на котором можно различить максимумы сигналов, в случае бесконечно узких пучков, определяется размерами зондов и составляет около 2 см.

Отметим также, что измерение токов осаждающихся пучков позволяет контролировать не только сам процесс разделения, но и его производительность. Для этого необходимо обеспечить условия на коллекторе, при которых каждый прилетающий ион конденсировался.

5. ВЫВОДЫ

В работе представлен метод диагностики процесса плазменной сепарации веществ, основанный на измерении ионных токов насыщения разделяемых потоков. Описана электрическая схема и процедура калибровки системы регистрации. В пробном эксперименте проверена работоспособность метода. Измерены распределения ионных токов разделяемых в процессе плазменной сепарации пучков Ag и Pb, осаждаемых на поверхности принимающего коллектора. Независимым методом, основанным на измерении химического состава осадочных пленок, проведена проверка результатов измерения токов, которая показала их достоверность. Определены максимальная чувствительность и разрешающая способность метода для измерения процесса сепарации бинарной смеси.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00270-24-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамов Е О и др. 2020 *Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами* (Москва: Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежалея)
2. Смирнов В П, Самохин А А, Ворона Н А и Гавриков А В 2013 *Физика Плазмы* **39** 523–533
3. Лизякин Г Д и др. 2023 *Физика плазмы* **49** 278–287

4. Амиров Р Х, Ворона Н А, Гавриков А В, Лизякин Г Д, Полищук В П, Самойлов И С, Смирнов В П, Усманов Р А и Ярцев И М 2015 *Физика плазмы* **41** 877–883
5. Лизякин Г Д, Гавриков А В, Кузьмичёв С Д, Смирнов В П и Усманов Р А 2024 *Успехи физических наук* **194** 495
6. Усманов Р А и Мельников А Д 2020 *Вестник ОИВТ РАН* **4** 35–38
7. Geva M, Cohen C, Danziger O, Dothan F, Friedland L, Levin L A, Maharshak S and Hirshfield J L 1987 *IEEE Transactions on Plasma Science* **15** 583–588
8. Козлов О В 1969 *Электрический зонд в плазме* (Москва: Атомиздат)
9. Паперный В Л и Красов В И 2011 *Физика плазмы* **37** 1057–1067
10. Balmain K G and Dubois G R 1979 *IEEE Transactions on Nuclear Science* **26** 5146–5151
11. Hooper E 1970 *Advances in Electronics and Electron Physics* **27** 295–343
12. Antonov N N, Gavrikov A V, Smirnov V P, Liziakin G D, Usmanov R A, Vorona N A and Timirkhanov R A 2018 *Journal of Physics: Conference Series* **946** 012171
13. Trincavelli J, Limandri S and Bonetto R 2014 *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* **101** 76–85
14. Riemann K U 1991 *Journal of Physics D: Applied Physics* **24** 493–518