

УДК 621.039.624

## ДВУХСТУПЕНЧАТЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК СО СЖАТЫМ ВАКУУМНО-ДУГОВЫМ РАЗРЯДОМ СЕПАРАТОРА

В.А. Сероштанов, С.В. Шарый, В.Б. Юферов, О.С. Друй, В.В. Егоренков, Е.В. Рыбас

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины*

*61108, ул. Академическая, 1, Харьков, Украина*

Поступила в редакцию 7 февраля 2008 г.

Разработан и исследован плазменный источник для проведения демонстрационно-имитационного эксперимента на сепараторе с плотностями плазмы на уровне  $10^{10}$ – $10^{13}$  см<sup>-3</sup> и ионными токами свыше 1 А. Описаны энергетические факторы и проблемы обеспечения достаточной производительности сепараторов нового поколения. Обоснован выбор двухступенчатого плазменного источника со сжатым вакуумно-дуговым разрядом, приведена его конструкция, описан принцип работы и результаты экспериментального исследования. Измерены вольтамперные характеристики и ионные токи источника в широком диапазоне режимов работы. Предложен метод повышения однородности плазмы применительно к конструкции сепаратора. Полученные параметры плазменного источника удовлетворяют требованиям для проведения экспериментов на демонстрационном имитационном сепараторе.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** плазменный сепаратор, энергетические факторы, производительность сепаратора, сжатый вакуумно-дуговой разряд, ионный ток, магнитная пробка.

Плазменный источник любого электромагнитного сепаратора изотопов является одной из важнейших составляющих, определяющих и производительность, и ассортимент продуктов, и их энергетическую стоимость [1,2]. Для разрабатываемого в настоящее время нового поколения сепараторов элементов ионно-плазменные источники только создаются и формулируются требования к ним [3,4]. Демонстрационно-имитационные исследования сепаратора, проводящиеся в стационарном и квазистационарном режимах, используют несколько типов источников, разрабатываемых по ходу экспериментов. Естественно, таким же образом формируются и требования к плазменным источникам и другим составным частям сепаратора, например, к вакуумной системе. Требования к плазменному источнику, работающему в квазистационарном режиме, были сформулированы ранее [3], для стационарного режима времяпролетные требования становятся не существенными, однако, существенным моментом становится газовая эффективность плазменного источника, поскольку существенное снижение величины разрядного тока, более чем на порядок величины, пропорционально снижает и степень ионизации плазмы, ее плотность и температуру. Основную роль начинают играть энергетические факторы, т.е. энергозатраты на частицу и возможная производительность метода. И если в первых электромагнитных сепараторах энергетическая стоимость продукта лежала на уровне 30–40 кэВ/ион, при токовой производительности источников на уровне 1–10 А, в сепараторах нового поколения энергетическая стоимость должна лежать на уровне 0,5–2 кэВ и производительности на уровне 100 А и более, при апертурах на уровне 1 м<sup>2</sup>. При таких параметрах особую роль приобретает газовая эффективность плазменного источника, которая вряд ли сможет превысить величину 0,2÷0,3, что делает процессы перезарядки ионов определяющими процентный составов многокомпонентной плазмы и сам процесс разделения.

В настоящее время, на демонстрационно-имитационном сепараторе планируется эксперимент по выделению ионов *Xe* из *Xe-Kr-Ar-CO<sub>2</sub>* газовой смеси. Данный эксперимент моделирует выделение *UO<sub>2</sub>* из продуктов распада отработанного ядерного топлива АЭС. Имитационный эксперимент планируется проводить с газовой плазмой вышеуказанной смеси газов плотностью  $10^{10}$ – $10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Сечение рабочей камеры сепаратора составляет 10<sup>3</sup> см<sup>2</sup> и для получения плазмы плотностью  $10^{10}$  см<sup>-3</sup> необходим плазменный источник с ионными токами не менее 1 А.

Известно, что большими токами обладают вакуумно-дуговые плазменные источники [5]. Однако создаваемая ими металлическая плазма будет вносить дополнительные примеси в состав плазмы планируемого эксперимента, что затруднит проведение эксперимента. В работе [6] была описана двухступенчатая конструкция вакуумно-дугового устройства, создающая во второй ступени газовую плазму с достаточно высокой степенью ионизации.

Целью работы является модернизация и исследование вакуумно-дугового плазменного источника двухступенчатой модификации с целью использования его в демонстрационно-имитационном эксперименте на сепараторе.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данный источник отличается от описанного в работе [6] областью напуска рабочего газа, который происходит в первую ступень, а не в объем второй ступени, геометрическими размерами, формой катода и наличием магнитного поля. Конструктивно источник делится на две камеры (рис.1). Во внутренней камере создается ме-

таллическая плазма, возбуждаемая вакуумно-дуговым разрядом с холодным катодом. На торце камеры установлена пластина с отверстиями, в которых происходит сжатие положительного столба вакуумной дуги и увеличение энергии электронов. Электроны, эмитируемые из первой ступени, ионизируют нейтральный газ во второй ступени, создавая газовую плазму.

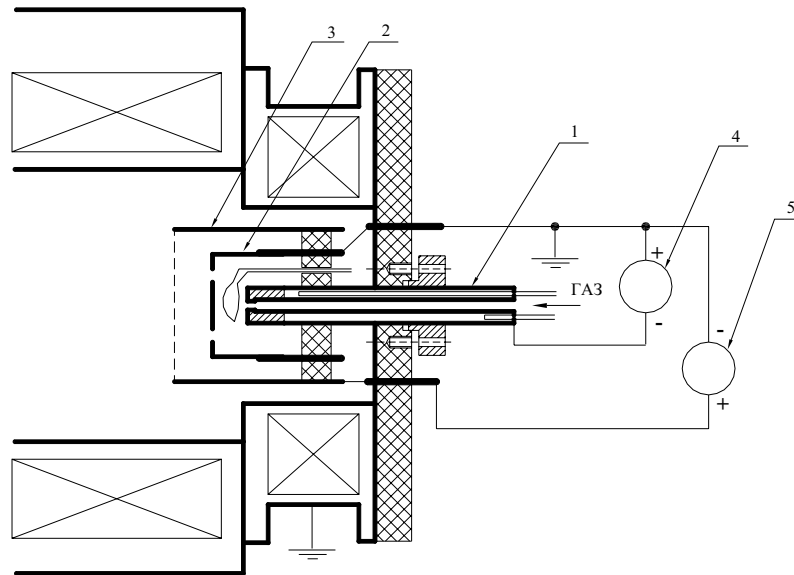


Рис.1. Конструкция и схема питания плазменного источника  
1 – катод; 2,3 – анод; 4 – источник питания дуги; 5 – источник питания второй ступени

Катод источника 1 с металлическим наконечником диаметром 20 мм выполнен из медной трубки и имеет водяное охлаждение. Через изолятор к катоду крепятся две цилиндрические камеры двухступенчатого разряда. Внутренняя камера 2 диаметром 70 мм отделена от внешней камеры 3 крышкой с шестью отверстиями диаметром 4 мм. На конце внешнего цилиндра установлена сетка с коэффициентом прозрачности 0,9.

По оси внутри катода проходит канал подачи рабочего газа. Расход рабочего газа (аргон) изменялся в диапазоне от 30 до 60 см<sup>3</sup>/мин. Начальное давление в вакуумной камере сепаратора  $1 \cdot 10^{-4}$  Торр, при напуске –  $1 \cdot 10^{-3}$  –  $9 \cdot 10^{-3}$  Торр.

Одним из главных требований к плазменным источникам, используемым при сепарации элементов, является однородность создаваемой плазмы. Однако стационарный источник на основе вакуумной дуги не может удовлетворить требованию однородного заполнения рабочего объема сепаратора, см. рис.2.

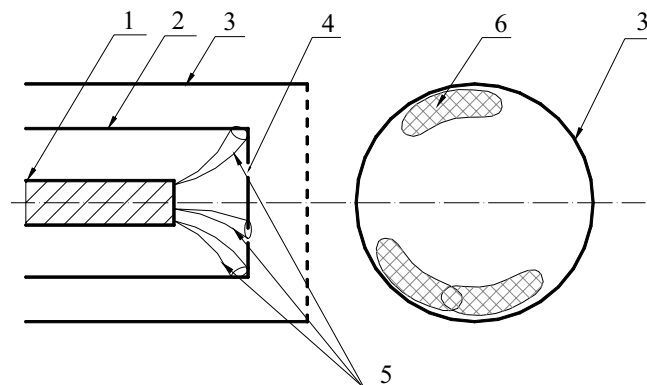


Рис.2. Зажигание разряда в источнике

1 – катод; 2,3 – анод; 4 – контрагирующие отверстия для сжатия плазмы; 5,6 – след плазменной струи в поперечном сечении

Это объясняется тем, что время пролета тяжелых ионов в сепараторе составляет около 10-20 мс. За это время дуга сканирует только 15-20% площади поперечного (входного) сечения разрядной камеры. Для напылительной техники такое положение вещей не является критичным, поскольку времена напыления намного превышают 1 секунду. Двухступенчатый газовый источник, использующий металлическую плазму как катод, позволяет получить более однородную плотность плазмы по сечению, поскольку использует несколько отверстий эмиссии. Дальнейшее повышение однородности плазмы в сечении входного отверстия сепаратора возможно

получить путем использования трехступенчатой его разновидности, представленной на рис.3.

К двухступенчатой системе добавляется инжекция плазмы в магнитную систему встречных полей, или систему с промежуточной большой магнитной пробкой в которых благодаря высокой поперечной диффузии распределение плотности плазмы по сечению камеры становится более однородным.

Магнитное поле установки создается двумя соленоидами, включенными встречно рис.3. Осевое распределение поля представлено на рис.4. Измерение величины магнитного поля производилось датчиком Холла при рабочем токе в соленоидах 6 А.

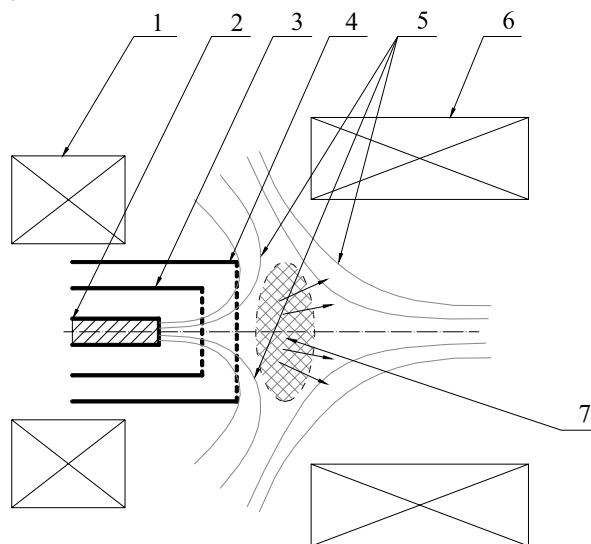


Рис.3. Инжекция плазмы в систему с магнитной пробкой и конфигурация силовых линий плазменного источника  
1 – соленоид плазменного источника; 2 – катод; 3,4 – аноды; 5 – силовые линии магнитного поля;  
6 – магнитная система сепаратора; 7 – эмитирующая плазменная линза

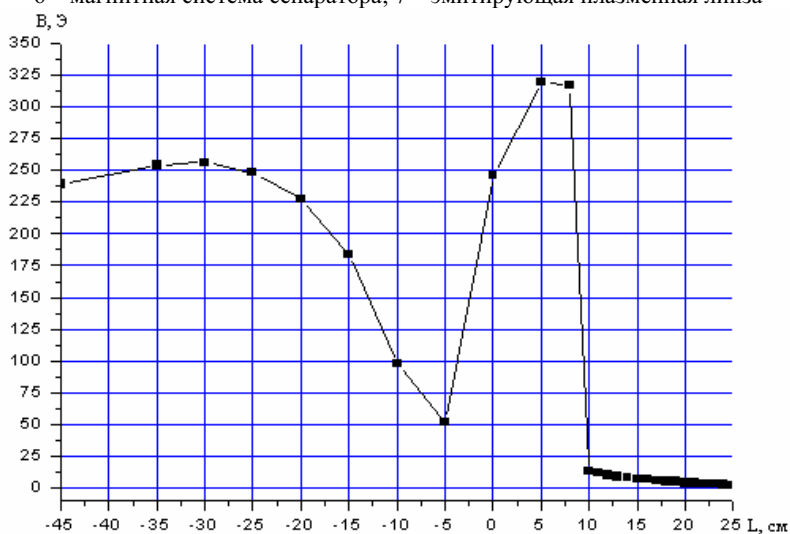


Рис.4. Напряженность магнитного поля вдоль центральной оси плазменного источника (нуль на графике соответствует началу соленоида плазменного источника)

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Схема питания плазменного источника представлена на рис.1. Параметры источников питания: первой ступени – 140 В, 40 А; второй ступени – 110 В, 14 А. На рис.5 представлена вольтамперная характеристика дугового разряда первой ступени. На рис.6 представлена зависимость тока второй ступени при увеличении напряжения питания на ней.

Измерение ионного тока плазменного факела производилось при помощи коллектора диаметром 150 мм, расположенного от торца плазменного источника на расстоянии 200 мм. На коллектор подавался отрицательный потенциал в 100 В. На рис.7 представлена зависимость ионного тока на коллектор от напряжения на второй ступени плазменного источника (при измерениях не учтены токи вторичной электронной эмиссии).

Как видно из характеристик разрядного тока второй ступени и ионного тока принципиальным является их насыщение, когда при росте напряжения не происходит рост тока.

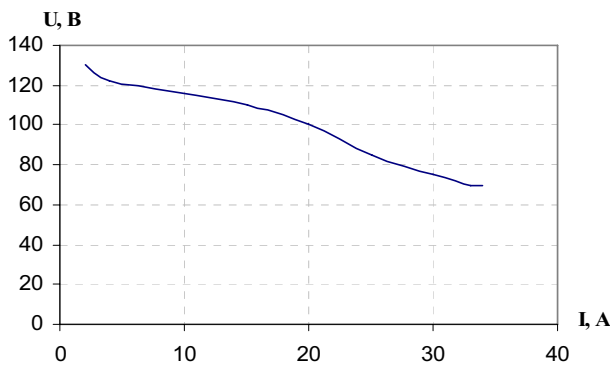


Рис.5. Вольтамперная характеристика первой ступени дугового разряда

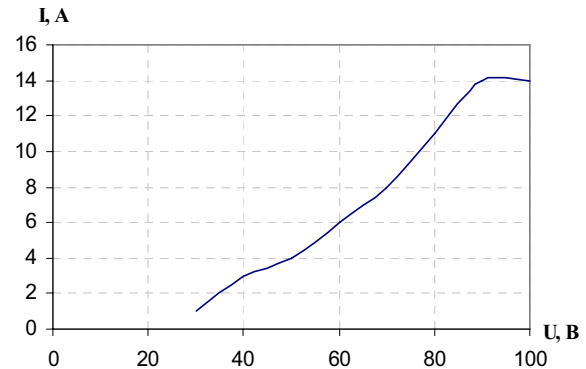


Рис.6. Зависимость тока во второй ступени от напряжения на ней

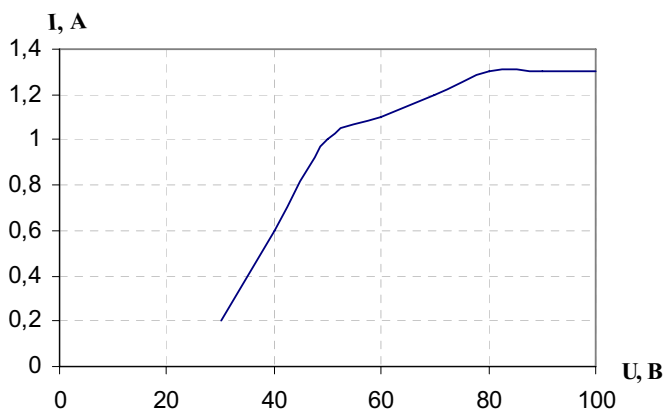


Рис.7. Зависимость ионного тока на коллектор при изменении напряжения второй ступени

### ВЫВОДЫ

- создан и исследован плазменный источник на основе сжатого вакуумно-дугового разряда [5,6] для сепарационных технологий;
- для увеличения однородности плазмы в объеме сепаратора предложена трехступенчатая модель источника, то есть инжекция плазмы в систему встречных магнитных полей;
- ионный ток на коллектор в рабочей камере составил 1,3 А, что позволяет использовать его для проведения демонстрационно-имитационного эксперимента на сепараторе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юферов В.Б., Друй О.С. и др. Резонансный плазменный сепаратор для разделения изотопов. Выбор параметров // «Вестник НТУ ХПИ». Серия: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – 2004. – №35. – С. 169–179.
2. Довбня А.Н., Друй О.С. и др. Сравнительный анализ проектов плазменных сепараторов изотопов, с колебаниями на циклотронных частотах // «Вопросы атомной науки и техники». Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. – 2004. – №4. – С. 51–57.
3. Юферов В.Б., Ковтун Ю.В. и др. Коаксиальный плазменный источник для сепаратора // «Вопросы атомной науки и техники». Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. – 2006. – № 5. – С. 38–41.
4. Юферов В.Б., Швец О.М. и др. Высокочастотный источник сепаратора элементов ДИС // «Вісник НТУ ХПИ». Тематичний випуск: «Техніка і електрофізика високих напруг». – 2006. – № 37. – С. 133–140.
5. Андреев А.А., Саблев Л.П. и др. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / Ред. Неклюдов И.М. – Х.: ННЦ ХФТИ, 2005. – 235 с.
6. Саблев Л.П., Андреев А.А. и др. Некоторые характеристики сжатого газового дугового разряда с плазменным катодом // Труды конференции «Харьковская нанотехнологическая Ассамблея», Харьков 2006. – С. 158–162.

### THE DOUBLE-STAGE PLASMA SOURCE WITH VACUUM ARC DISCHARGE FOR SEPARATOR

V.A. Seroshtanov, S.V. Shariy, V.B. Yuferov, O.S. Druy, V.V. Yegorenkov, E.V. Rybas

National Science Center "Kharkov Institute of Physics & Technology"

61108, Akademicheskaya str, 1, Kharkov, Ukraine

The plasma source for carrying out of demonstration-imitating experiment on a separator is being developed. The plasma density for experiment consists  $10^{10}$ – $10^{13}$   $\text{sm}^{-3}$  and ion current more then 1 A. The energy factors and enough productivity support problems are described. The construction and experimental research output of double-stage plasma source with vacuum arc discharge have been produced. The current-voltage characteristics of source, ion current and plasma discharge current were measured. The amenity of plasma source for demonstration-imitating separator experiments has been considered.

**KEY WORDS:** plasma separator, energy factors, productivity of separator, compressed vacuum arc discharge, ion current, magnetic plug.