

КОАКСИАЛЬНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ СЕПАРАТОРА

В.Б. Юферов, Ю.В. Ковтун, В.А. Сероштанов, Д.В. Винников, С.В. Шарый
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
Харьков, Украина

Исследуется модификация импульсного коаксиального плазменного источника с внешним магнитным полем. Обсуждается возможность работы такого источника на смеси тяжелых газов. Сформулированы требования к параметрам плазменного потока, системе напуска газа, источнику питания коаксиального источника плазмы для плазменного сепаратора элементов.

PACS: 52.50.Dg

1 ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] проводился анализ работы плазменных электромагнитных сепараторов с ионно-циклотронным (ИЦ) нагревом и рассматривались физические процессы, лежащие в их основе. Плазменный источник является одной из основных составных частей электромагнитных сепараторов изотопов и элементов, узлом, в котором создается плазма и затем транспортируется в магнитном поле в область разделения, поэтому именно он и определяет производительность процесса сепарации и номенклатуру сепарируемой продукции.

Естественный режим работы масс-сепаратора промышленного назначения – стационарный. Однако, в экспериментах демонстрационно-имитационного плана для снижения капитальных и эксплуатационных затрат целесообразен квазистационарный режим работы. Поскольку режим работы источника квазистационарный, то мощность и длительность импульсов должна быть такой, чтобы физическая интерпретация полученных данных и возможные технико-экономические применения не вызывали сомнений. Для квазистационарного режима длительность плазменного импульса должна быть не менее чем в 2-5 раз больше времени пролета системы самыми тяжелыми ионами плазмы, т.е.: $\tau \approx L/v$, где L – длина системы, v – скорость тяжелых ионов. Таким образом для сепаратора, описанного в [1], для имитационного эксперимента со смесью Хе-Кг-Аг длительности импульсов должны находиться на уровне 1...10 мс. Ограничения на плотность ионов в плазме n_i вытекают из необходимости исключить в процессе нагрева деселектирующее влияние столкновений ионов, частота которых: $\nu_{ii} = 5 \cdot 10^{-7} n_i / T_i^{3/2} \sqrt{M}$ (T_i – температура ионов, эВ, M – атомный вес). Из условия селективности нагрева $\nu_{ii} / \omega_{ci} \ll \Delta M_i / M_i$ следует, что для разделения ксенона и криптона с разностью масс ΔM равной 48, предельные значения плотности ионов n_i при температуре 20 эВ находятся в диапазоне $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

В настоящее время существует большое количество плазменных источников, применяемых в различных областях науки и техники, работающих как в стационарном, так и в квазистационарном режиме [2-4], однако, специфика сепарационного эксперимента и технико-экономические возможности существенно ограничивают их выбор. Поэтому, проанализировав данные по существующим плазменным

источникам и учитывая характер эксперимента, было сделано заключение, что плазменный источник коаксиального типа с внешним магнитным полем подходит для выполнения задачи.

Коаксиальные источники плазмы обладают высокими разрядными токами и способны создавать плазму с плотностями до и выше 10^{13} см^{-3} . Для таких источников плазмы характерны два режима работы: медленный, где температура ионов до 100 эВ, скорость потока плазмы до $6,5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$; и быстрый с T_i выше 1 кэВ, $v = (4 \dots 6) \cdot 10^7 \text{ см/с}$. Поскольку для имитационного эксперимента со смесью Хе-Кг-Аг на сепараторе требуется обеспечение низкой температуры ионов плазмы, то желательный режим работы коаксиального источника – медленный. В наших предварительных исследованиях [4] проведены эксперименты с плазменным источником коаксиального типа с внешним магнитным полем. В таком плазменном источнике между двумя коаксиальными электродами протекающий ток создает собственное азимутальное магнитное поле, в результате взаимодействия которого с радиальным током, протекающим между внутренним и внешним электродами, создается лоренцева магнитная сила

$$F = \frac{I^2}{2} \frac{dL}{dz},$$
 которая направлена вдоль образующих

электродов к выходу ускорителя независимо от направления протекающего тока.

Цель. Выбор и определение параметров плазменного источника и систем его питания, удовлетворяющих требованиям работы сепаратора. Исследования плазменного источника (ПИ).

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Исследования проводились на плазменном источнике, изображенном на Рис.1. Он состоит из магнитной системы 1, центрального электрода 3, выполненного из магнитной стали и слабомагнитной нержавеющей стали, цилиндрического электрода 5 из нержавеющей стали, покрытого слоем диэлектрика 2, 4 системы напуска газа. Расчетные значения индуктивности и емкости коаксиальной системы составили $L = 8,8 \cdot 10^{-08} \text{ Гн}$, $C = 2,4 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}$.

Объем плазменного источника перед каждым разрядом откачивался диффузионным насосом до давления $3 \dots 8 \cdot 10^{-5} \text{ Торр}$. Заполнение рабочего объема газом производилось при помощи импульсного электромагнитного клапана (4, Рис.1). Клапан обеспечивал напуск $0,6 \text{ см}^3$ рабочего газа при давлении 30 Торр в дополнительной камере. Рабочими газами были воздух и аргон.

Источником питания служила батарея из 10 конденсаторов ИМ 2-5-140 У4 общей емкостью 1400 мкФ. Индуктивность конденсаторной батареи с подводящими кабелями составила $L = 3,87 \cdot 10^{-6}$ Гн.

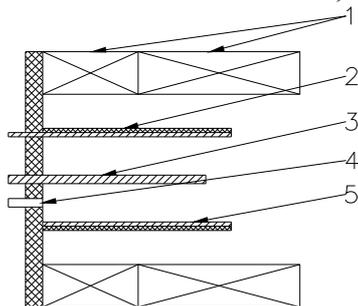


Рис.1. Плазменный источник. 1 – соленоиды; 2 – изоляция; 3 – центральный электрод; 4 – напуск газа; 5 – цилиндрический электрод

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Поскольку применение центрального электрода из ферромагнитного материала изменяет конфигурацию магнитного поля в плазменном источнике, было проведено измерение при помощи датчика Холла. Результаты измерения представлены на Рис.2 для двух случаев: 1 - при вставках из немагнитного материала, 2 - при вставках из ферромагнитного материала.

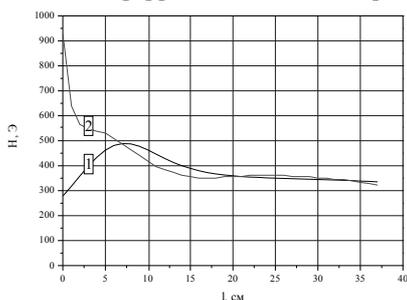


Рис.2. Магнитное поле системы. 1 – без ферромагнитных вставок; 2 – с ферромагнитными вставками

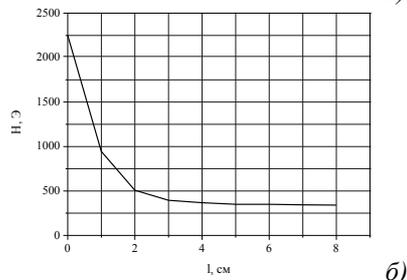
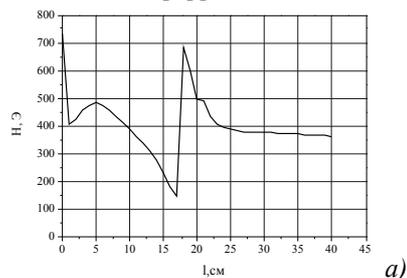


Рис.3. Распределение поля в области плазменного источника при электроде из магнитного материала: а - распределение поля вдоль стержня на расстоянии 10 мм от него, б – радиальное распределение поля на торце магнитного стержня

Распределение поля в области плазменного источника показано на Рис.3.

Для измерения токового импульса и светового излучения плазмы применялись малоиндуктивный шунт и инфракрасный фотодиод с временем срабатывания около 45 нс. Регистрация сигналов производилась двухканальным виртуальным осциллографом Velleman PCS500.

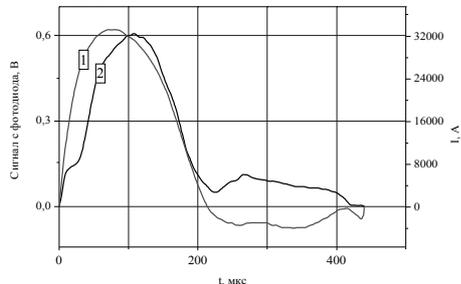


Рис.4. Осциллограммы тока разряда и сигнала с фотодиода. 1 – осциллограмма тока разряда; 2 – сигнал с фотодиода

На Рис.4 представлены осциллограммы тока разряда и сигнала с фотодиода при напряжении на батарее 2,5 кВ. Ток разряда составил 33 кА, длительность импульса 440 мкс. Токые кривые имеют вид затухающих аperiodических колебаний, первый полупериод не имеет особенности в виде резкого излома, характеризующего быстрый режим работы источника [5,6], что говорит о медленном режиме работы.

Измерения энергии, переносимой плазмой, проводились калориметром, который представлял собой медный цилиндр, с обратной стороны которого установлена термопара (хромель-алюмель). Методика калориметрических расчетов рассмотрена в [4].

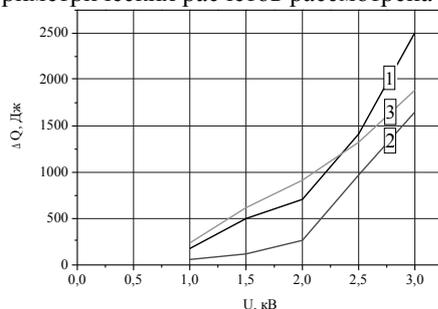


Рис.5. Зависимость количества передаваемой энергии калориметру плазменного источника от напряжения на нем. 1 – положительный потенциал центрального электрода из ферромагнитного материала; 2 – положительный потенциал центрального электрода из неферромагнитного материала; 3 – отрицательный потенциал центрального электрода для обоих материалов

На Рис.5 представлена зависимость энергии, передаваемой калориметру от напряжения на плазменном источнике. Как видно из графика, энергия, передаваемая калориметру, больше при электроде выполненного из ферромагнитного материала чем из неферромагнитного при положительном потенциале центрального электрода. Различие кривых 1 и 2, по-видимому, может указывать на наличие силы, определяемой градиентом магнитного поля. Выделяемая при отрицательном потенциале центрального

электрода энергия оставалась одинаковой при обоих материалах электрода, в этом случае наблюдается минимальная эрозия электродов.

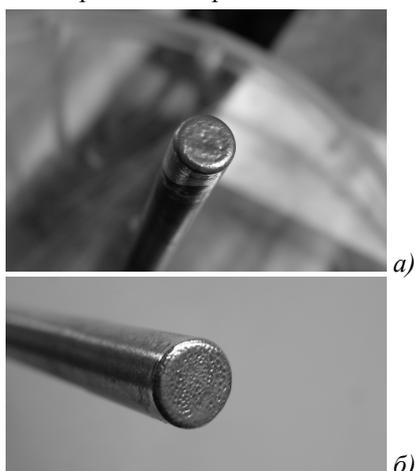


Рис.6. Эрозия центрального электрода

В предположении температуры ионов и электронов на уровне 10 эВ, плотность азото-кислородной-металлической плазмы лежит на уровне $(0.5...5)10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Значительный интерес представляет эрозия центрального электрода. На Рис.6,а видно оплавление торца центрального электрода из ферромагнитного материала, на Рис.6,б – торца центрального электрода из неферромагнитного материала. В результате процесса оплавления центрального электрода в разрядную плазму поступает большое количество металлических ионов. Следует заметить, что при проведении экспериментов на смесях Хе-Кг-Аг, металлические примеси добавляют в масс-спектр атомные номера между 80 и 30, т.е. между Кг-Аг, что не должно сказаться на результатах сепарационного эксперимента.

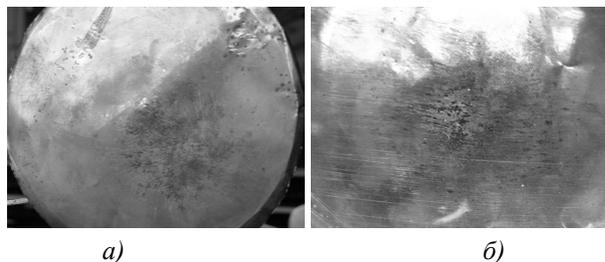


Рис.7. Фото следов эрозии на калориметрах а и б

На Рис.7. представлено фото поверхностей калориметров а и б, обращенных к ПИ, на которых также наблюдаются следы катодно-анодных пятен, что указывает на наличие продольных токов в системе

ПИ–коллектор. На калориметре а, кроме следов дуговых пятен, на правом и левом краю видны следы металлических кластеров и капель, достаточно хорошо сфокусированных и распространяющихся на большие расстояния.

ВЫВОДЫ

Сформулированы требования к параметрам плазменного потока Хе-Кг-Аг смеси для проведения демонстрационно-имитационного эксперимента. Выбран источник плазмы, совместимый с магнитной топографией сепаратором. Определен режим работы источника.

Работа импульсного клапана напуска газа удовлетворяет поставленным условиям. Экспериментально определено, что коаксиальный плазменный источник работает в медленном режиме и на его работу влияет также наличие силы, определяемой градиентом магнитного поля. Проведенная оценка плотности плазмы при температуре ионов и электронов 10 эВ показывает, что она лежит на уровне $(0.5...5)10^{13} \text{ см}^{-3}$. Длительность импульса разряда меньше требуемой, для удлинения импульса необходимо повышение емкости батареи в 10 раз. Целесообразно исследование работы источника при более низких напряжениях на разряде. Необходимы измерения энергий ионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Н. Довбня, А.М. Егоров, В.Б. Юферов и др. Сравнительный анализ проектов плазменных сепараторов изотопов с колебаниями на циклотронных частотах // *Вопросы атомной науки и техники*. 2004. №4. Серия: *Плазменная электроника и новые методы ускорения* (3), с.323-325.
2. М.Д. Габович. *Физика и техника плазменных источников ионов*. М.: «Атомиздат», 1972. с.304.
3. *Физика и применение плазменных ускорителей* / Под ред. А.И.Морозова. Наука и техника. Минск, 1974. с.393.
4. V.V. Yuferov, V.I. Tkachev, V.F. Tikhonov, et al. // *Вопросы атомной науки и техники*. 2004. №4. Серия: *Плазменная электроника и новые методы ускорения* (3), с.323-325.
5. А.А. Калмыков, С.А.Трубчанинов, В.А. Набока // *ЖТФ*, 1964, 34, с.1005.
6. А.Д. Тимофеев, В.Г. Маринин, Б.А. Шевчук, А.А. Калмыков // *Исследование плазменных сгустков*. Киев, 1965, с.156-165.

THE COAXIAL PLASMA SOURCE FOR THE SEPARATOR

V.B. Yuferov, Yu. V. Kovtun, V.A. Seroshtanov, D.V. Vinnikov, S.V. Shariy

Updating of a pulse coaxial plasma source with an external magnetic field is investigated. The opportunity of work of such source on a mix of heavy gases is discussed. Requirements to parameters of a plasma stream, system let in gas, to the power supply of a coaxial source of plasma for a plasma separator of elements are formulated.

КОАКСІАЛЬНЕ ПЛАЗМОВЕ ДЖЕРЕЛО ДЛЯ СЕПАРАТОРА

В.Б. Юферов, Ю.В. Ковтун, В.А. Сєроштанов, Д.В. Вінніков, С.В. Шарій

Досліджується модифікація імпульсного коаксіального джерела із зовнішнім магнітним полем. Обговорюється можливість роботи цього джерела на суміші важких газів. Сформульовані вимоги щодо параметрів плазмового потоку, системи напуску газу, джерела живлення коаксіального джерела плазми для плазмового сепаратора елементів.