

СТАЦИОНАРНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЛЯ ИМИТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СЕПАРАТОРЕ

В.Б. Юферов, С.В. Шарый, В.А. Сороштанов

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
Харьков, Украина*

Обоснован выбор имитационной газовой смеси для проведения экспериментов на демонстрационном имитационном сепараторе (ДИС). Изменена конструкция плазменного источника, проведено исследование режимов его работы и проведен сравнительный анализ полученных характеристик.

Как известно, в процессе ядерного горения в твэлах создается практически вся таблица Менделеева. Не вдаваясь в подробности, можно утверждать, что максимумы распределения по элементам располагаются в диапазонах масс 233...240; 120...130; 85...90; 16. При коэффициенте выгорания около 10%, достигнутом в современных реакторах, в топливных элементах с UO_2 появляется около 20% других элементов.

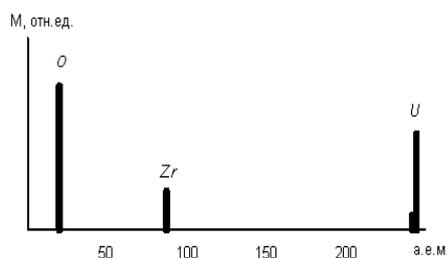


Рис.1. Элементный состав материалов твэла

На Рис.1. схематически, в произвольных единицах, представлен элементный состав материалов твэла: UO_2 и Zr (окись урана – топливо и цирконий – конструкционный материал).

В процессе ядерного горения-распада к урановой компоненте с атомными номерами 238 и 235 добавляются еще и уран 233, а также заурановые элементы 239, 240 и др. – плутоний, америций и т.д. Одновременно появляется и вся таблица Менделеева (см. Рис.2).

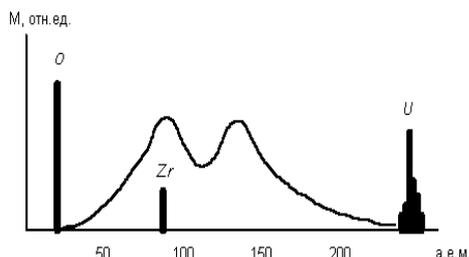


Рис.2. Элементный состав материалов твэла после выгорания

Именно эти продукты ядерного распада и должны быть выведены в процессе обработки ОЯТ. Как уже говорилось ранее [1], разделение тяжелых и легких элементов ОЯТ предлагается осуществлять в плазме, вращающейся в скрещенных электрическом и магнитном поле, при достижении условия спонтанного циклотронного резонанса, приводящего к ускорению (или нагреву) попавших в резонанс ионов.

На начальной стадии нет необходимости проводить эксперименты непосредственно на материалах твэла, так как возможен выбор имитационного объекта более удобного и безопасного в обращении. Изначально была выбрана смесь благородных газов: Xe-Kr-Ar, и N_2 или O_2 (воздух) (см. Рис.3).

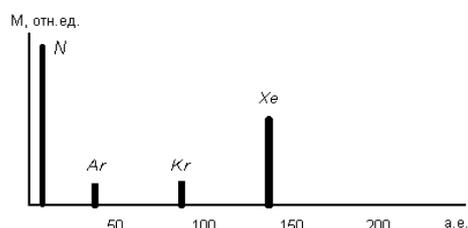


Рис.3. Газовая смесь, имитирующая состав твэла N-Ar-Kr-Xe

Следует заметить, что именно эта 4-х компонентная смесь, с относительными концентрациями 20-1-1-10 будет, на наш взгляд, более удачно имитировать состав ОЯТ, чем трехкомпонентная Xe-Kr-Ar, о которой шла речь ранее[2]. Поскольку при достижении условия резонанса и при выходе резонансных ионов Xe на стенку камеры (доля которых 33% от общего числа частиц), плотность плазмы в этом случае, изменится на треть, а не в двое, как в случае трехкомпонентной смеси, что важно для сохранения транспортных свойств плазмы.

Так же в качестве имитирующего объекта может быть выбрана смесь CO_2 -Xe (см. Рис.4 и 5). Достоинство этой смеси в том, что для достижения вакуумных условий, необходимых для проведения эксперимента, нет необходимости использовать неоновые крионасосы, предназначенные для откачки Kr.

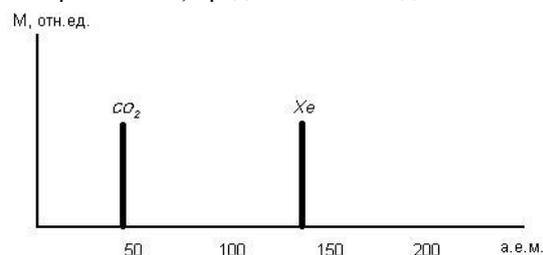


Рис.4. Газовая смесь, имитирующая состав твэла CO_2 -Xe

Конструкция сепаратора ДИС для проведения имитационного эксперимента, состоящая из вакуумной камеры, системы магнитов и электродов, создающих скрещенные продольное магнитное и радиальное электрическое поля, описана в работе [2].

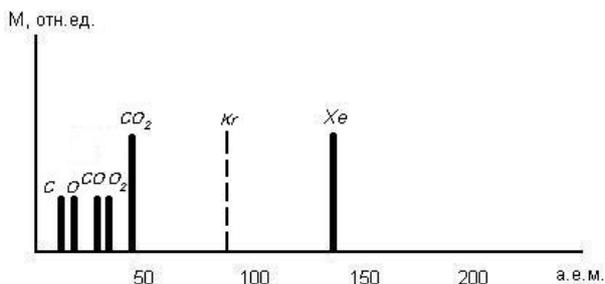


Рис.5. Имитирующая смесь в процессе разряда

В работе [3] был описан и исследован плазменный источник, схематический вид которого представлен на Рис.6. В настоящей работе рассматривается модификация этого источника – стационарный газовый плазменный источник тяжёлых ионов с дрейфом электронов и открытым торцом без магнитного фланца – магнитопровода, ограничивающего выходное отверстие (см. Рис.8). Назовем эти модификации источников ПИ-П (Рис.7) и ПИ-Г (Рис.8), по конфигурациям магнитопроводов.

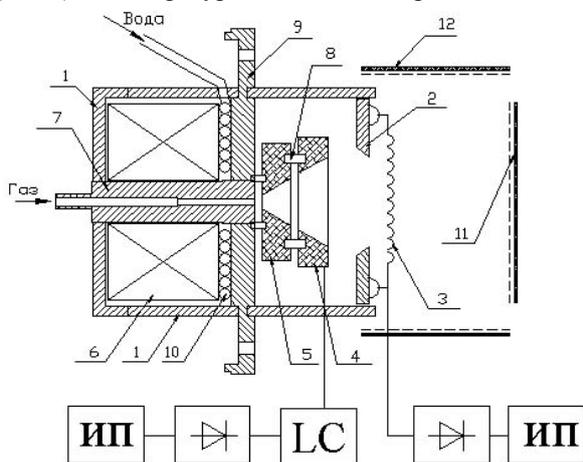


Рис.6. Схематический вид плазменного источника: 1 – корпус; 2 – крышка с выходным отверстием; 3 – катод; 4 – анод; 5 – газораспределительная вставка; 6 – магнитная катушка; 7 – сердечник; 8 – алундовые кольца; 9 – фланец из нержавеющей стали; 10 – система водяного охлаждения; 11, 12 – коллекторы

На Рис.7 и 8 представлены топографии магнитных полей источников при встречном включении ведущего поля сепаратора. Для случая источника ПИ-П, повышение поля источника приводит к сжатию плазмы и локализации разряда в области вблизи анода. Удаление крышки с выходным отверстием привело к изменению магнитной конфигурации источника и, соответственно, изменению карты силовых линий, что позволило избежать этого эффекта. Плазма распространялась по всему объему, прилегающему к источнику.

В модификации ПИ-Г область нулевого поля встречно включенных соленоидов может выходить за область источника, что позволит заполнить весь объем сепаратора плазмой, при введении дополнительных электродов во внешнюю область вокруг плазменного источника.

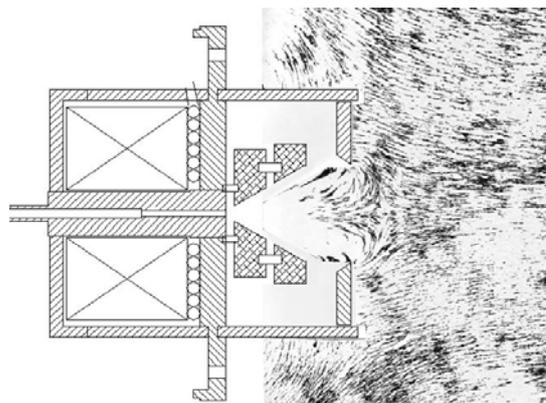


Рис.7. Топография магнитного поля источника ПИ-П

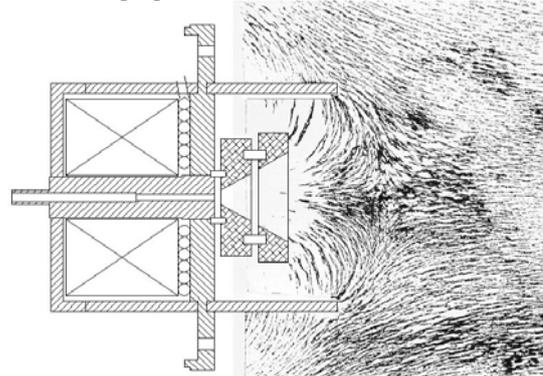


Рис.8. Топография магнитного поля источника ПИ-Г

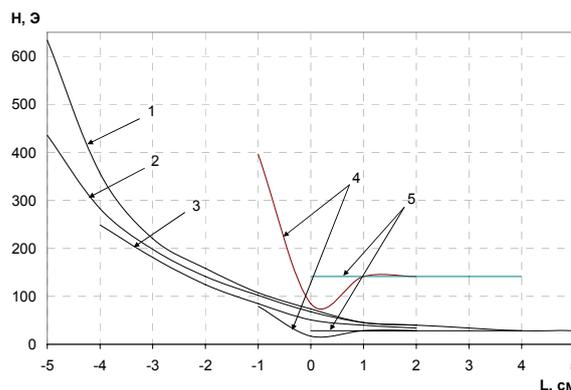


Рис.9. Продольная составляющая напряженности магнитного поля источника ПИ-П на различных радиусах от оси. 1 – $r = 0$ см; 2 – $r = 1$ см; 3 – $r = 2$ см; 4 – $r = 3$ см; 5 – $r = 5$ см; (верхние кривые 4, 5 продублированы в пятикратном масштабе)

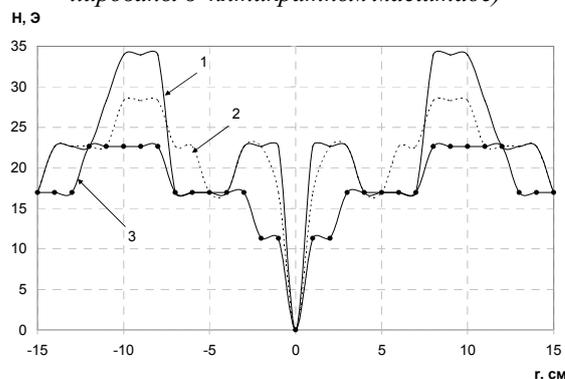
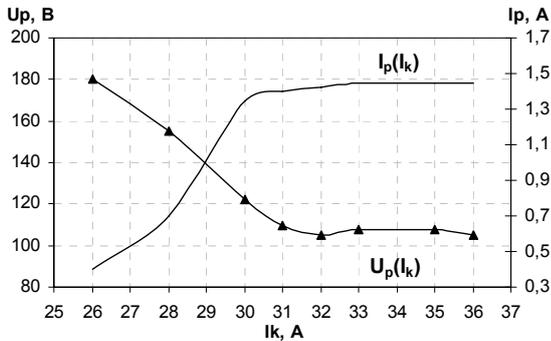


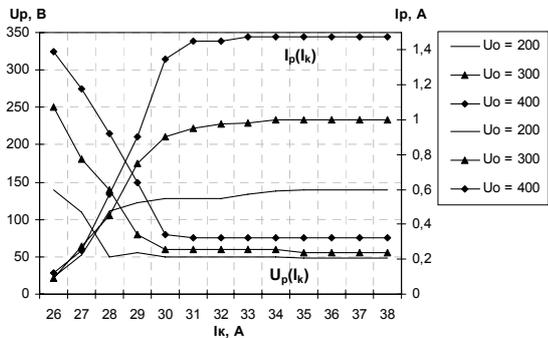
Рис.10. Радиальная составляющая напряженности магнитного поля источника ПИ-П для различных расстояний по оси от среза выходного отверстия ($1 - l = 1$ см; $2 - l = 2$ см; $3 - l = 4$ см) в зависимости от радиуса, ноль соответствует центральной оси источника

На Рис.9 и 10 представлены продольные и радиальные составляющие магнитного поля источника ПИ-П в области разряда. На рис.10 ноль соответствует сечению выходного отверстия источника.

На Рис.11-13 представлены характеристики различных режимов работы обоих источников при различных значениях начального напряжения U_0 на разрядном промежутке. Для ПИ-Г зажигание разряда происходит при более низком потоке напускаемого газа и, соответственно, более низком давлении. Вдвое уменьшились напряжения на дуге (Рис 11).

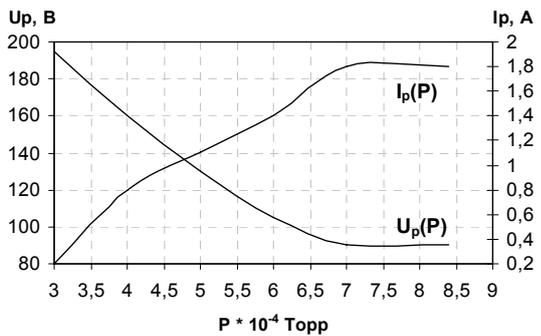


а)

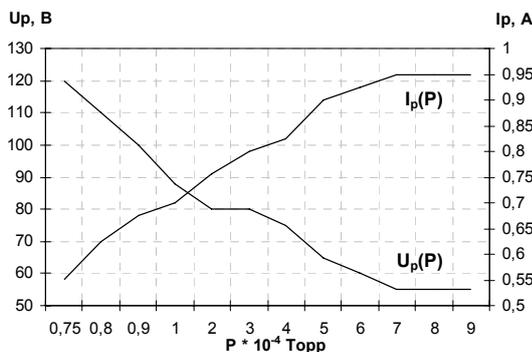


б)

Рис.11. Зависимость тока разряда от накала катода:
а) – источник ПИ-П; б) – источник ПИ-Г

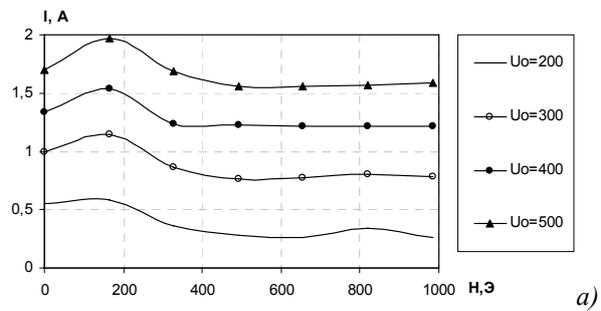


а)

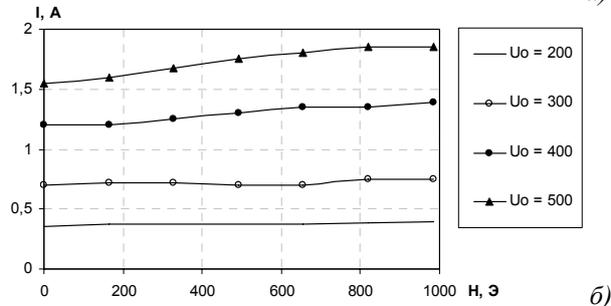


б)

Рис.12. Зависимость тока разряда от напуска газа:
а) – источник ПИ-П; б) – источник ПИ-Г



а)

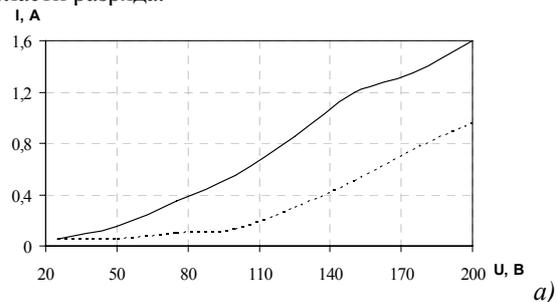


б)

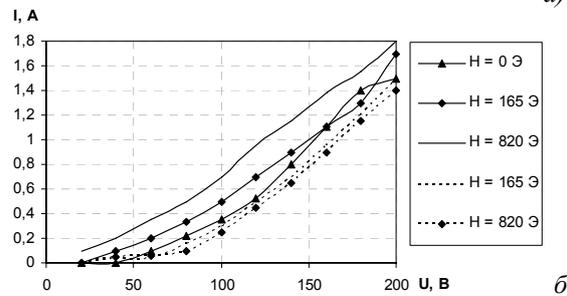
Рис.13. Зависимость тока разряда от величины внутреннего магнитного поля источника:
а) – источник ПИ-П; б) – источник ПИ-Г

На Рис.13,а, наблюдается характерный максимум тока при величине магнитного поля источника около 160 Э. При дальнейшем увеличении магнитного поля наблюдается снижение тока разряда. Для источника ПИ-Г характер разряда изменился: с ростом магнитного поля ток разряда монотонно увеличивается (рис.13,б).

Измерение ионных токов на осевой 11 и радиальный 12 коллекторы (рис.6) проводилось при подаче отрицательного потенциала до 200 В. Был получен преимущественно радиальный ток, величиной до 2 А, ток на осевой коллектор находился на уровне 30 мА. Подача задерживающего потенциала на коллекторы приводит к созданию дополнительной области разряда.



а)



б)

Рис.14. Ток источника на радиальный коллектор в зависимости от потенциала на нем, для различных значений магнитного поля источника:
а) – источник ПИ-П ($H = 490$ Э); б) – источник ПИ-Г; пунктирные кривые – ток на коллектор при наличии внешнего продольного магнитного поля

При увеличении магнитного поля источников ток на радиальный коллектор возрастает, а при увеличении ведущего поля сепаратора – уменьшается.

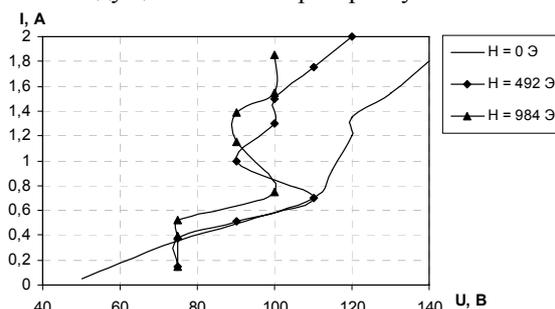


Рис.15. Вольт-амперные характеристики разряда

На Рис.15 представлены вольт-амперные характеристики разряда источника. Характерной особенностью является их S-образный характер.

На Рис.16 представлены фото плазменного разряда (вертикальный электрод возле источника – зонд для измерения параметров плазмы).

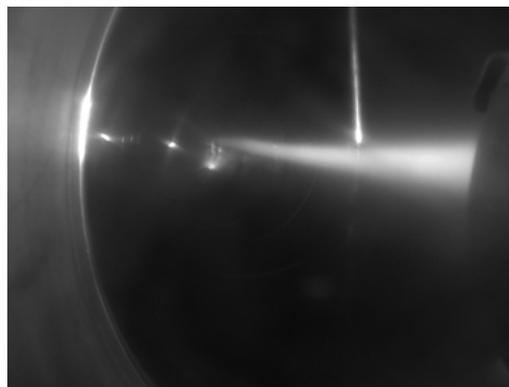
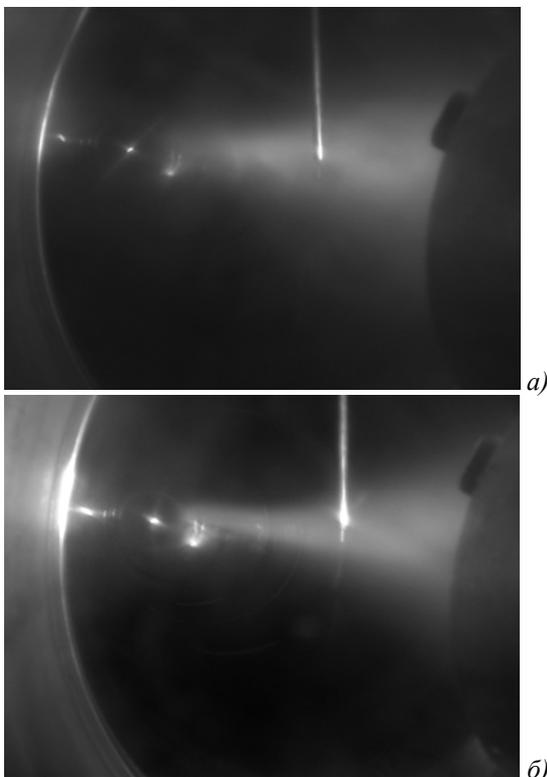


Рис.16. Фото плазменного разряда для различных соотношений величин магнитного поля источника и сепаратора

Рис.16,а – случай слабого поля сепаратора и без внутреннего поля источника (разряд в нарастающем поле). Рис.16,б – случай среднего поля сепаратора и при наличии поля в источнике. Здесь появилась область нулевого поля у встречно включенных соленоидов и плазма может выходить на стенку камеры или задний изоляционный фланец, что не видно на черно-белом фото. Рис.16,в – сильные поля сепаратора и источника. Область нулевого поля зажата внутри источника.

ВЫВОДЫ

Исследования показали возможность создания плазмы плотностью $1...5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ в объеме сепаратора. В модификации ПИ-Г область нулевого поля встречно включенных соленоидов может выходить за область источника, что позволит заполнить весь объем сепаратора плазмой, при введении дополнительных электродов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Б. Юферов, О.С. Друй и др. Резонансный плазменный сепаратор для разделения изотопов. Выбор параметров // *Вестник НТУ «ХПИ». Серия: «Электроэнергетика и преобразовательная техника»*. 2004, №35. с.169-179.
2. В.Б. Юферов, Д.В. Винников и др. Плазменный источник для сепаратора // *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2006, №35, с.125-131.
3. В.Б. Юферов, С.В. Шарый и др. Плазменный источник тяжелых ионов с замкнутым дрейфом электронов и открытым торцом // *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2007, №24, с.111-115.

STATIONAR PLASMA SOURCE OF HEAVY IONS FOR IMITATING RESEARCH AT THE SEPARATOR

V.B. Yuferov, S.V. Shariy, V.A. Seroshtanov

The imitational gas mix choice for experimenting on the demonstrational imitational separator have been grounded. The construction of plasma source is changed. The research of operating conditions and contrastive analysis of received characteristics have been carry out.

СТАЦІОНАРНЕ ПЛАЗМОВЕ ДЖЕРЕЛО ВАЖКИХ ІОНІВ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА СЕПАРАТОРІ

В.Б. Юферов, С.В. Шарий, В.О. Сероштанов

Обгрунтовано вибір імітаційної газової суміші для проведення досліджень на демонстраційному імітаційному сепараторі (ДС). Змінена конструкція плазмового джерела, проведено дослідження режимів його роботи та зроблено порівняний аналіз отриманих характеристик.