

В.Б.ЮФЕРОВ, докт.техн.наук.; **О.М.ШВЕЦ**; **О.С.ДРУЙ**;
Д.В.ВИННИКОВ; **В.А.СЕРОШТАНОВ**; **С.В.ШАРЫЙ**; Национальный
технический институт «Харьковский физико-технический институт»

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИСТОЧНИК СЕПАРАТОРА ЭЛЕМЕНТОВ ДИС

Запропоновано технологію з очищення відпрацьованого ядерного палива. Описано сценарій здійснення експерименту. Визначено основні параметри плазмового ВЧ-джерела. Представлено діючі плазмові антени та система діагностики. Відображено результати попередніх експериментів. Окреслено коло питань.

The technology of refinement of nuclear waste is proposed. The scenario of carrying out of experiment has been described. The main parameters of HF plasma source are determined. The active plasma antennas and the system of diagnostics are presented. The results of prior experiments are represented. A number of problems have been described.

Постановка проблемы. За год на Украине образуется 350 т отработанного ядерного топлива (ОЯТ), со средним молекулярным весом 90 г/моль. В процессе выгорания топлива в ТВЭЛах образуется практически вся таблица Менделеева. При этом максимумы распределения по элементам располагаются в диапазоне масс 233-240, 120-130, 85-90, 16, то есть исключая кислород, элементы, в своем большинстве, имеют отношения масс 3/2/1 (см рис. 1, [1]). При коэффициенте выгорания около 10 %, которое достигнуто в современных реакторах, в топливном элементе, содержащем UO_2 , появляется около 20 % других элементов.

В настоящее время ни одна страна мира не имеет полностью замкнутого топливного ядерного цикла. Все топливные циклы не замкнуты в том смысле, что ОЯТ отправляется на вечное хранение. В то время как из него необходимо удалить около 20 % продуктов деления урана и т.о. восстановить ядерное топливо. Но проводить очистку ОЯТ в тех же системах, на которых проходило обогащение урана невозможно из-за его высокой активности: слишком велики будут площади с высокой активностью. Это возможно делать на системах с высоким коэффициентом обогащения однопроходного типа – электромагнитных сепараторах, где весь процесс, идущий с, приблизительно, 100 % разделением происходит за один цикл [2,3]. Но современные электромагнитные сепараторы малопроизводительны и слишком энергоемки. Для очистки ОЯТ их производительность должна быть увеличена в 100-1000 раз, а энергозатраты сокращены в 10-50 раз. И то и другое должно быть возможно для сепараторов нового поколения: Поверхность отбора частиц должна быть увеличена в 10^3 - 10^4 раз, а ускоряющее напряжение уменьшено с $3 \cdot 10^4$ В до, приблизительно, 1 кВ и ниже.

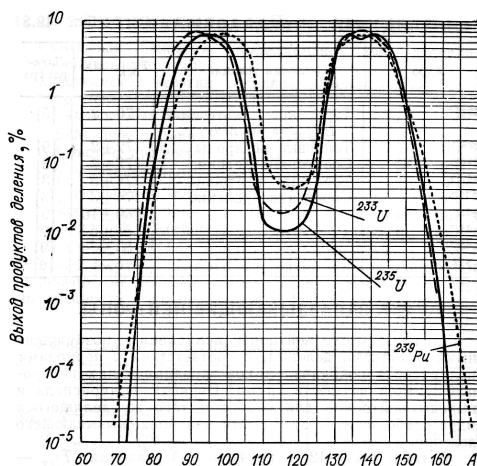


Рисунок 1 – Зависимость выхода продуктов деления ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu под действием тепловых нейтронов от массового числа А. (для ^{233}U , ^{239}Pu приведены независимые выходы, для ^{235}U , дан полный выход)

Цель экспериментов. Задача экспериментов на демонстрационно-имитационном плазменном сепараторе (ДИС) заключается в разработке физических основ методов обработки ОЯТ с целью отделения топлива от осколков деления, определения возможных энергетических величин, которые в настоящее время допустимы для 1 моля – 30-100 кВт/ч, или $1-3 \cdot 10^3$ эВ/атом. На первом этапе выбрана смесь Xe-Kr-Ar-N_2 с отношением масс 3/2/1 для тяжелых элементов и процентным содержанием, соответственно, 40, 5, 5 и 50%, являющаяся моделью ОЯТ. Возможен выбор и других масс, например, металлов Pb-Bi , Pb-Sn , Bi-Sn-Fe или др.

Выбор моделирующих материалов ОЯТ определяется не только магнитно-вакуумной системой и системой диагностики, но еще и наличием плазменного источника (ПИ) с параметрами, удовлетворяющими требованиям эксперимента. Поэтому при создании сепараторов одной из основных задач является выбор ПИ и его рабочих параметров. Они будут определять параметры плазмы в сепараторе, а, следовательно, и выбор параметров магнитной и вакуумной систем. В [2] была выбрана магнитная система и ее конфигурация, первой моделью ПИ выбран ВЧ-источник, эксперименты с которым приводятся здесь.

Сценарий плазменного эксперимента. Как указывалось в [4], трехкомпонентная плазма из плазменного источника двигается вдоль силовых линий убывающего магнитного поля. При включении радиального электрического поля E_r , плазма начинает вращаться в скрещенных радиальном электрическом поле E и

аксиальном магнитном поле H с частотой $\omega_E \approx E/H$. При достижении условия $\omega_E \approx \omega_{CI}/2$, где ω_{CI} – циклотронная частота иона массой μ_i , в магнитном поле H происходит ускорение резонансных ионов [5,6], благодаря чему может достигаться пространственное выделение ионов Xe из трехкомпонентной плазмы (следует заметить, что в процессе нарастания электрического поля ускорение может последовательно происходить и на кратных частотах: $\omega_{CI}/8$, $\omega_{CI}/4$, $\omega_{CI}/2$). Резонансно ускоренные ионы Xe должны выйти из плазмы на стенки вакуумной камеры в кольцевой области 13, см рис. 2.

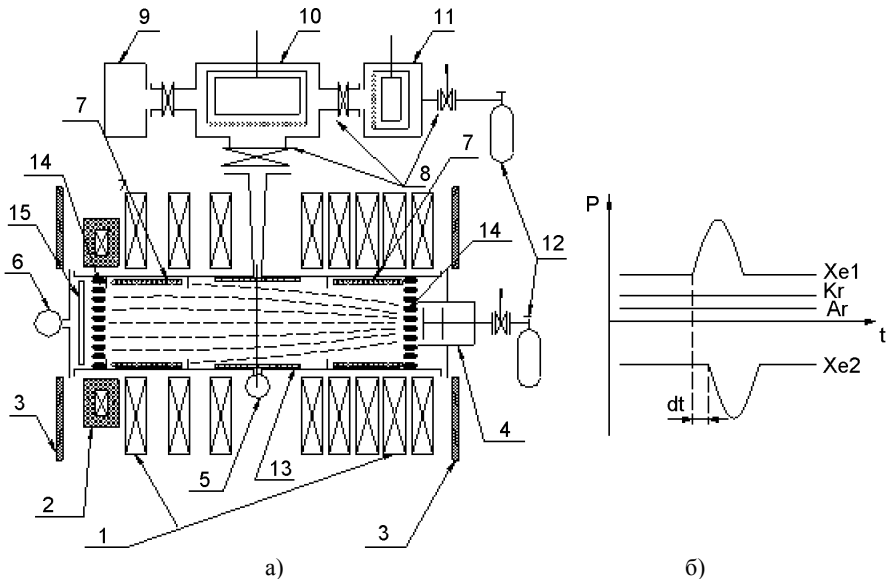


Рисунок 2 – Схематический вид установки ДИС (а) и ожидаемые зависимости выхода ионов Xe на многосеточных зондах, располагаемых в центральной области-13 и на торце системы,15, при импульсном включении E_r (б):

1,2,3 – соленоиды для создания определенной конфигурации магнитного поля и магнитные экраны; 4 – плазменный источник; 5,6 – магнитные анализаторы нейтральной и ионной компонент плазмы; 7 – крионасосы для откачки смеси $Xe-Kr-Ar$; 8 – вакуумные клапана; 9 – высоковакуумный диффузионный насос с азотной ловушкой; 10 – насос накопитель для откачки смеси; 11 – крионасос-компрессор, для закачки смеси в баллоны 12; 13 – кольцевая область на внутренней поверхности вакуумной камеры, куда должны выходить ионы Xe ; 14 – система формирования радиального электрического поля, 15. – трехсеточный зонд

Ожидаемое место прихода ионов Xe на стенку камеры находится приблизительно на ее середине, то есть в 700-900 мм от плазменного источника. При ожидаемых параметрах плазмы: $n_i \approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $T_i \approx 100 \text{ эВ}$, $T_e \approx 10 \text{ эВ}$, $H \approx 2 \text{ кЭ}$, согласно выражениям: $r_{ci} = v_{Ti} / \omega_{CI}$ и $r_{ce} = v_{Te} / \omega_{Ce}$, величины лармо-

ровских радиусов ионов ксенона и электронов будут: $r_{ci} \approx 5-6$ см, $r_e \approx 10^{-3}$ см. Учитывая соотношение радиуса плазмы R и ларморовского радиуса ионов ксенона $R/r_{ci} \approx 3$ и разность фаз ионов, на магнитной силовой трубке, приблизительно π , продольный размер области выхода ионов ксенона может составлять около $3 \cdot r_{ci}$, то есть 15-20 см для цилиндрической плазмы. В случае тубчатой плазмы она может составлять 5-10 см.

Система ВЧ-питания. Как указывалось, первой моделью ПИ в предварительных имитационных экспериментах являлся ВЧ плазменный источник, работающий в квазистационарном режиме. Основные требования к ПИ сепаратора ДИС: получение плазмы с плотностью $10^{10}-10^{13}$ см⁻³, либо в стационарном, либо в квазистационарном режиме, с температурой ионов 10-100 эВ и электронов до 10 эВ.

Плазменный ВЧ-источник представляется оптимальным для конечной цели развития программы работ, поскольку позволяет создавать плазму из любых элементов в любом состоянии, что характерно для ОЯТ, поскольку ТВЭЛ представляет собой металлическую трубку (цирконий), внутри которой расположена керамика – таблетки UO_2 . Разряд начинается на металле с помощью инертного газа, который вначале начинает его распылять. В процессе ионной бомбардировки керамика нагревается и становится электропроводящей и далее возможен процесс самораспыления.

Электрическая схема питания ВЧ-источника представлена на рис. 3

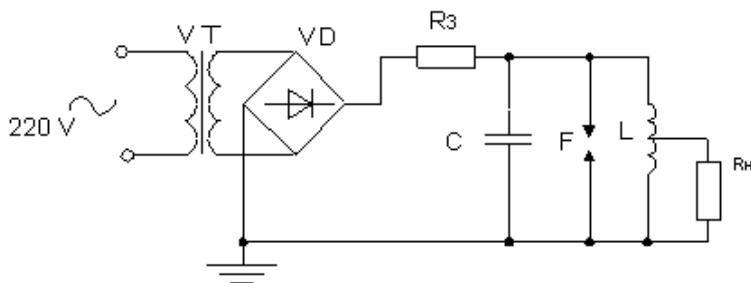


Рисунок 3 – Электросхема питания ВЧ-источника

Эта схема позволяет получать большую ВЧ-мощность, что необходимо из-за значительного объема плазменной системы. Вид токовых импульсов представлен на рис. 4.

Частоту следования высокочастотных импульсов можно определить по формуле:

$$F = \frac{1}{2 \cdot R_3 \cdot C}$$

Собственная частота разрядного контура:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Для представленного ВЧ источника частоты составляли: $F = 280$ Гц и $f = 340$ кГц. Запасаемая энергия в конденсаторной батарее $W = 0,24$ Дж. Таким образом, средняя мощность ПИ: $P = F \cdot W = 67,2$ Вт.

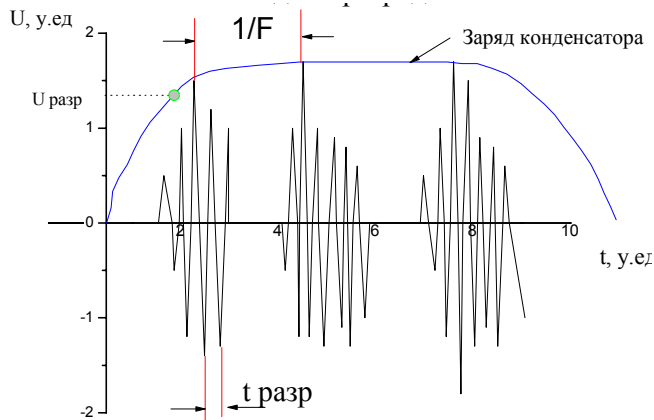


Рисунок 4 – Токовые характеристики ВЧ разряда

Действующие системы электродов. В ходе проведенных экспериментов были использованы несколько систем электродов, однако наилучшие результаты дала емкостная система, представленная на рис. 5. Очевидно, ее согласование с нагрузкой было более эффективно.

Система диагностики. На первом этапе включает два многосеточных электростатических зонда, располагаемых в центральной части камеры, области 13, и в ее торце – 15. Первый зонд должен определить осевое распределение уходящих ионов ксенона, создаваемый плазменным ВЧ источником, в момент возникновения резонансных условий. Он состоит из экранирующего корпуса, регистрирующих коллекторов и двух сеток. Длина корпуса, сеток и коллектора 350 мм, ширина 50 мм, высота бортов 35 мм, корпус выполнен из немагнитной стали. Сетки выполнены из латуни с шагом 0,05 мм.

На верхнюю сетку подается отрицательный потенциал для отсеки электронов, вторая сетка служит для определения распределения ионов по энергии. Напряжение на сетках может изменяться от 0 до ± 600 В. Каждая пластина коллектора соединена через переключатель и измерительное сопротивление с землей.

Данный коллектор позволяет определять только поперечную компоненту энергии ионов плазмы. Для определения продольной компоненты, равно как и поперечной, был изготовлен трехсеточный зонд, который располагается на торцовом фланце установки, в месте прихода плазменного потока на стенку.

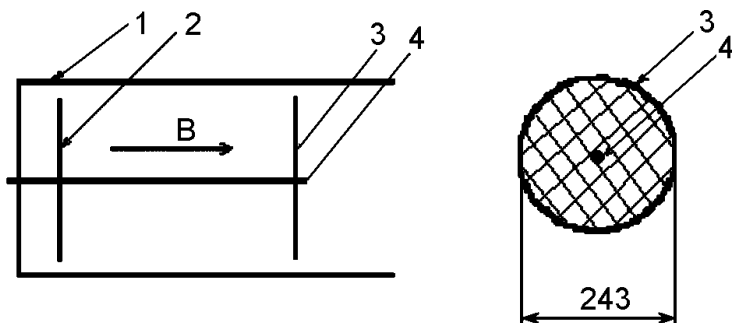


Рисунок 5 – Система электродов ВЧ источника: 1 – корпус камеры; 2 – дисковый электрод; 3 – электрод-сетка; 4 – стержневой электрод

Предварительные эксперименты по созданию плазмы с помощью ВЧ источника показали, что не все антенны позволяют создать плазму при заданных вакуумных условиях, эквивалентных давлению нейтрального газа на уровне $1 \cdot 10^{-4}$ - $1 \cdot 10^{-5}$ Торр, которое, по нашему мнению, необходимо для сохранения постоянного и заданного элементного состава сепарируемой смеси. Изменение состава смеси может происходить за счет процессов перезарядки ионов плазмы на газовой мишени. Эта газовая мишень сопутствует плазме и возникает из-за частичной ионизации смеси в плазменном источнике. В то же время фотосъемка плазменного разряда вдоль оси системы, при вакуумных условиях в области давлений на порядок более низких, то есть $1 \cdot 10^{-3}$ - $1 \cdot 10^{-4}$ Торр (см. рис. 6), показала ожидавшиеся картины плазменного эксперимента по разделению элементов. Как уже указывалось выше, выход резонансных ионов на стенки плазменной камеры вдоль оси магнитной системы должен происходить в кольцевых областях, располагающихся вдоль оси магнитной системы в областях, где величины электрического и магнитного поля соответствуют резонансным условиям. В настоящее время мы не считаем возможным однозначно трактовать полученный результат. Необходимы дополнительные эксперименты.

Обсуждение результатов эксперимента и выводы. (Следует заметить, что черно-белое изображение на рисунке значительно уступает в качестве цветному изображению). Темный круг в центре – ВЧ-антенна. Яркое свечение вокруг него – плазма, выходящая из ВЧ источника. Далее на всех шести фото видны темная и светлые окружности, располагающиеся в камере в разных

сочетаниях. Следует отметить некоторые пространственные ориентиры. Темная окружность это кольцевое отверстие для вакуумной откачки, расположенное в центре вакуумной системы, на расстояниях около 850 мм от обоих торцов системы и имеющее ширину около 20 мм. Светлые окружности – это предполагаемые места прихода ионов на стенки вакуумной камеры, ширина этих областей-колец 5-10 см. Для однозначного ответа необходимо идентифицировать сорт ионов, связанный со свечением этого кольца. Как видно, кольца смещаются вдоль оси при изменении величины магнитного поля. Плазменные кольца появляются в точках зоны однородности, где величины магнитного поля одинаковы. В то же время во всех этих случаях плазма не достигала противоположного торца системы.

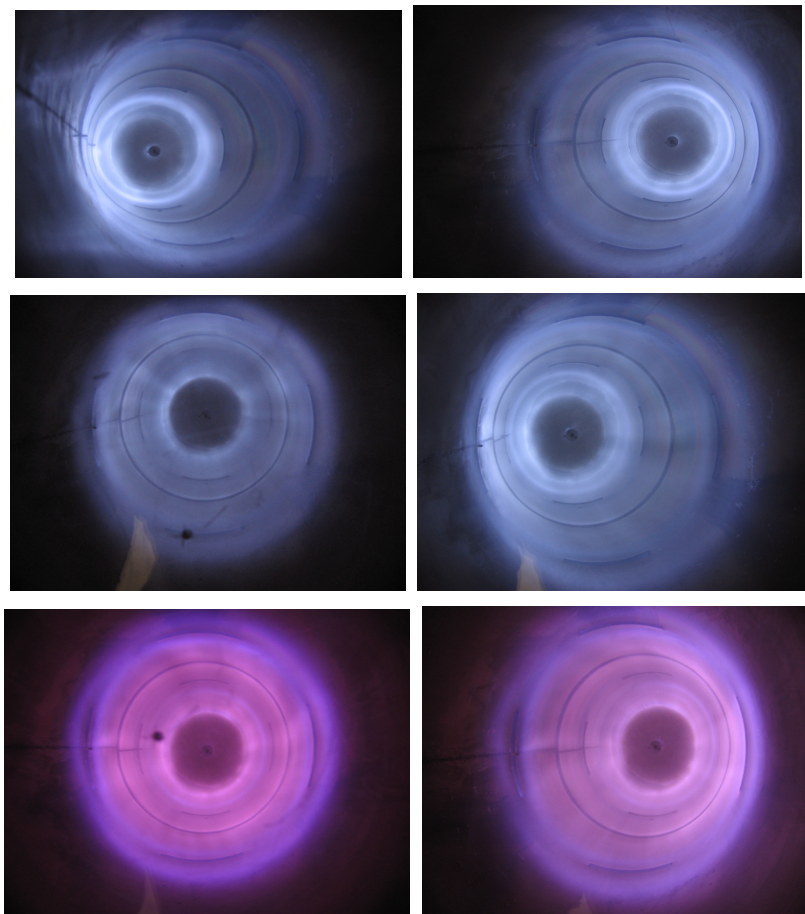


Рисунок 6 – Фото плазменных ВЧ-разрядов вдоль оси системы

Эксперименты показали, что создавая плазму с приемлемыми параметрами в нужных вакуумных условиях ВЧ источник создает мощные ВЧ помехи, препятствующие диагностированию процесса сепарации с помощью электростатических зондов всех модификаций. Поэтому в условиях этого предварительного эксперимента регистрация велась только оптическим методом, не чувствительным к помехам. Очевидно, что для подавления ВЧ помех необходимы дополнительные работы. Идентификация сорта ионов в области светящихся колец возможна с помощью методов элементного анализа поверхностей.

Список литературы: 1. *И.К.Киконин* Таблицы физических величин. Справочник. – М.: Атомиздат, 1976. 2. *A.Litvak, S.Agnev, F.Anderegg and others* Archimeds Plasma Mass Filter // 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg, 7-11 July 2003 ECA. – Vol. 27A, O-1.6A. 3. *S.Putvinsk, A.F.Agnev, B.P.Cluggish, T.Ohkawa and other* Archimedes Mass Filter Vaporizer. American Physical Society, 43rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics October, 29 – November, 2, 2001 Long Beach, California, abstract #KP1.053. 4. *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. 5. *А.М.Рожков, К.Н.Степанов и др.* Исследование возбуждения ионно-циклотронных колебаний в плазме, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях // Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. – «В.1. Наукова Думка». – Киев. – 1971. – С. 14-18. 6. *А.М.Рожков, К.Н.Степанов, и др.* Резонансная циклотронная неустойчивость во вращающейся плазме // Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. – «В.3. Наукова Думка». – Киев. – 1972. – С. 193-202.

Поступила в редколлегию 15.11.2006.

УДК 537.528:537.529

В.С.ГЛАДКОВ, канд.техн.наук; **Л.В.ВАВРИВ**, канд.фіз.-мат.наук;
О.А.ГУЧЕНКО; **О.В. ШЕСТЕРІКОВ**; НТУ «ХПІ»

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУЙНУВАННЯ БЕТОНУ ПРИ ДІЇ ІМПУЛЬСІВ НАПРУГИ НАНОСЕКУНДНОГО ДІАПАЗОНУ

Запропоновано математичну модель руйнування бетону при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону. Модель базується на механізмі електричного пробоя бетону за рахунок розвитку розряду в повітряних порах бетону внаслідок розвитку перегрівної несталості в плазмі стримерного каналу. Модель, що пропонується, дозволяє визначати склад продукту руйнування, який утворюється в результаті електричного пробоя бетону, як функцію параметрів генератора імпульсів напруги, характеристик матеріалу та тривалості фронту імпульсу напруги.

A mathematics model for breaking the concrete by action of the nanosecond voltage pulses has been offered. This model is based on a mechanism of electric breakdown of a concrete caused by the development of a discharge in the air concrete pores due to the superheat unsteadiness in plasma of a