

РАЗДЕЛЕНИЕ ВЕЩЕСТВА НА ЭЛЕМЕНТЫ, ОСНОВАННОЕ НА ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО И ОТРАЖАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДОВ

Е.И. Скибенко, Ю.В. Ковтун, А.М. Егоров, В.Б. Юферов
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина
E-mail: Ykovtun@kipt.kharkov.ua

Описываются устройства для разделения вещества на элементы с использованием двух типов разрядов: пучково-плазменного и отражательного. Обе разрядные технологии могут быть реализованы в одних и тех же вакуумно-магнитных условиях, а плазмообразующие системы могут быть взаимозаменяемы. Предложен способ подачи рабочего вещества в область ионизации в капельно-кластерном режиме.

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что в настоящее время атомные электростанции (АЭС) обеспечивают около 20 % мирового производства электроэнергии и значительную часть национального ее производства в отдельных странах [1], одной из мировых экологических проблем является проблема переработки и утилизации отработанного ядерного топлива (ОЯТ), радиоактивных отходов (РАО), в том числе жидких радиоактивных отходов (ЖРО). Поэтому дальнейшее развитие атомной энергетики будет зависеть от решения вопроса о технологии обращения с ОЯТ и РАО. Таким образом, проблема изоляции большого количества радиоактивных материалов, всегда представляющих радиационную опасность, становится

первоочередной проблемой ядерной энергетики настоящего и будущего. Как правило, в этих отходах до 90 % радиоактивности содержится в менее чем 10 % массы вещества с атомным числом $A > 90$. Основные принципы и требования обращения с ЖРО могут быть удовлетворены, если произвести разделение легких фракций (менее радиоактивных) и тяжелых (более радиоактивных). Это может быть достигнуто традиционным методом химической переработки ОЯТ. Недостатком такой технологии при извлечении U и Pu из ОЯТ является образование большего количества ЖРО. Классификация жидких отходов по уровню активности и их удельному выходу после регенерации отработанного топлива приведена в табл. 1.

Таблица 1

Выход активности		Объемная β -активность, Вq/L	Объемная α -активность, Вq/L	Удельный объем ЖРО, м ³ /т
Виды отходов	низкоактивные	$\leq 3,7 \cdot 10^5$	$\leq 3,7 \cdot 10^5$	1875
	среднеактивные	$3,7 \cdot 10^5 \dots 3,7 \cdot 10^9$	$3,7 \cdot 10^4 \dots 3,7 \cdot 10^8$	78
	высокоактивные	$\geq 3,7 \cdot 10^{10}$	$\geq 3,7 \cdot 10^8$	13

2. ДЕЙСТВУЮЩИЕ И РАЗРАБАТЫВАЕМЫЕ УСТРОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИИ

В середине семидесятых годов 20 столетия начинается реализация идеи магнитоплазменной сепарации изотопов, разрабатывавшейся в тот период К.Н. Степановым с сотрудниками [2], А.А. Рухадзе с сотрудниками [3], J.M. Dawson et al. [4] и другими. Принцип магнитоплазменного разделения вещества на элементы в общем случае заключается в следующем: рабочее вещество (ОЯТ или РАО) подготавливается для подачи в блок фазовых превращений (БФП), где в последующем происходит переход разделяемого вещества из твердого (жидкого) состояния в парообразное и вводится в область ионизации. Ионы созданной плазмы находятся в продольном магнитном поле, селективно нагреваются, что приводит к изменению их траекторий движения в магнитном поле, пространственному разделению «горячих» и «холодных» ионов, осаждению их на ионоприемных пластинах, с которых в дальнейшем

производится удаление осевших элементов. При этом возможно разделение ионов плазмы, соответственно веществ РАО и ОЯТ, на легкие и тяжелые массовые группы (так называемая условно «частичная сепарация»), либо поэлементное разделение, т. е. «полная сепарация». При «частичной сепарации» основная задача заключается в уменьшении удельной доли низко- и среднеактивных отходов в хранимых РАО с тем, чтобы снизить количество отходов для последующего остеклования в боросиликатном стекле. Такая технология позволяет значительно снизить количество высокоактивных отходов (ВАО) для последующего остеклования и сэкономить значительные средства на его переработку и хранение (стоимость одной канистры с остеклованным ВАО колеблется от 500 тысяч долларов до 1 миллиона).

На рис. 1 показана принципиальная блок-схема сепарирующего устройства [5]. Основными его частями являются: вакуумная система, магнитная система, фор-инжектор разделяемого вещества в иони-

зованном состоянии, физическая и технологическая диагностики, система разделения и сбора готовой продукции, система контроля и управления.

Вакуумная система обеспечивает необходимую величину рабочего давления в объеме МПС'а. Она комплектуется безмасляными средствами откачки как на стадии предварительного разряжения от атмосферы, так и на высоковакуумной.

Магнитная система формирует аксиальное магнитное поле однородной или пробочной конфигурации с симметричными или несимметричными пробками и состоит из NbTi или Nb₃Sn сверхпроводящих (СП) гелийохлаждаемых или ВТСП азотоохлаждаемых магнитов и блока криоохлаждения СП-магнитов, а также блока электропитания.

Фор-инжектор предназначен для заполнения объема сепаратора разделяемым веществом в ионизированном состоянии и состоит из: системы подачи рабочего вещества, БФП, дозатора, камеры ионизации, ионизатора, средств технологической диагностики, блока электропитания.

Физическая диагностика базируется на бесконтактных методах исследования, таких как спектрометрические и СВЧ-методики, и должна контролировать следующие параметры: плотность и температуру плазмы, ионные потоки, флуктуационные процессы, профили пространственного распределения плотности плазмы, зарядность и др.

Система разделения и сбора готовой продукции состоит из: блока нагрева компонент плазмы; зоны разделения, где происходит пространственное разделение «горячих» и «холодных» ионов; ионоприемника, который представляет собой набор ионоприемных пластин для осаждения разделенного вещества; шлюза, позволяющего выгружать продукцию без разгерметизации рабочей камеры сепаратора; приспособления для выгрузки продукции.

Технологическая диагностика позволяет проводить контроль работоспособности всех систем сепаратора.

Контроль и управление – это автоматизированная система, которая объединяет в единую систему все системы МПС'а для управления и контроля за технологическим процессом разделения вещества.

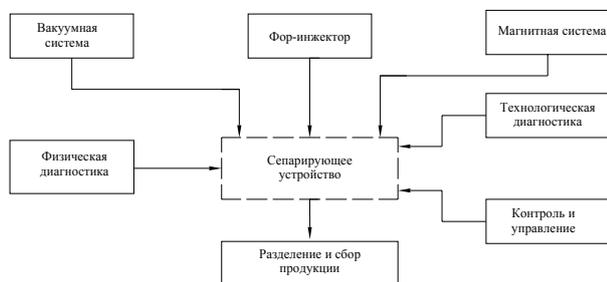


Рис. 1. Принципиальная блок-схема сепарирующего устройства

В настоящее время основные магнитоплазменные сепарационные установки разрабатываются в США, Франции, Российской Федерации, Японии, Украине и других странах. Эти установки (действующие и разрабатываемые) можно разделить

на две группы: исследовательские (индекс *И*), на которых отрабатываются процессы создания и нагрева плазмы, селективного разделения вещества на элементы и их изотопы; производственного применения (индекс *П*), которые предназначены для промышленной переработки ОЯТ и РАО с различными уровнями производительности. В табл. 2 приведены параметры некоторых из этих установок – представителей вышепоименованных групп. К разделительным установкам перспективного планирования следует отнести также установку PSP (plasma separation process) [10,11]. Главной отличительной особенностью ее является наличие сверхпроводящего соленоида длиной 8 м, диаметром внутреннего теплого отверстия 1,1 м, весом 40 т, обеспечивающего напряженность магнитного поля 2 Тл.

Осуществление магнитоплазменных сепарационных проектов наталкивается, как правило, на трудности и проблемы, связанные не только с физической проработкой идеи, но и техническими проблемами изготовительского плана. Это связано, в частности, с тем, что в реальных полномасштабных сепарационных устройствах, например [7], внутренний диаметр магнитной системы превосходит в 4-5 раз поперечный размер плазменного образования. А по наружному размеру магнитной системы это соотношение и того больше, достигает значений 5-6. Все это приводит к заметному возрастанию энергетических затрат на получение магнитного поля заданных параметров и поддержанию их в режиме стационара, так как объем магнитного поля $V_H \gg V_{\text{плазмы}}$. Формирование требуемой структуры и однородности магнитного поля [4-6] накладывает жесткие требования на точность изготовления катушек ($\pm 0,1$ мм); выставку (монтаж) электромагнитных катушек ($\pm 0,2$ мм); магнитные свойства [12] конструкционных материалов (магнитная проницаемость $\mu \leq 1,05$).

Сепарационные магнитоплазменные устройства различаются между собой, в первую очередь, способом создания электрических (электромагнитных) полей, необходимых для получения плазмы требуемых параметров по плотности и температуре. Это может быть индукционный метод [8], электростатический [7] или за счет коллективных процессов в первичной плазме [5] (пучковые или плазменные неустойчивости).

Кроме того, с точки зрения эффективности процесса разделения вещества и работы разделительных (сепарационных) установок имеет смысл рассмотрение различных плазмообразующих систем, основанных на различных физических принципах (явлениях), и сравнение их характеристик и параметров, а также возможность их использования в пределах (рамках) одного разделительного комплекса. В будущем это может оказаться весьма перспективной и полезной возможностью (идеями).

Таким образом, далее будет приведено описание устройств для разделения вещества на элементы, основу которых составляют коллективные процессы, возникающие при пучково-плазменном взаимодействии (ППВ) и в отражательном разряде Пеннинга.

3. АВТОРСКИЙ ПОДХОД, ПРЕДЛАГАЕМЫЕ РЕШЕНИЯ

3.1. Пучково-плазменный разряд

На рис. 2 показана принципиальная физическая схема сепарационного устройства на основе пучково-плазменного разряда. Основные физические предпосылки (теория и эксперимент) заключаются в следующем. Как следует из теории [14], минимальная длина пучково-плазменного взаимодействия может быть оценена по формуле:

$$L \approx \frac{v_0}{\gamma} \approx 10^{-8} \frac{E_e}{j} \sqrt{n_p}, \quad (1)$$

где γ – инкремент нарастания амплитуды колебания; v_0 – направленная скорость электронов в пучке; E_e – энергия электронов пучка, эВ; j – плотность тока пучка, А/см²; n_p – концентрация плазмы, см⁻³.

Расчеты показывают, что эффективная длина торможения первичного электронного пучка при ППВ для $n_p = 10^{12} \dots 10^{13}$ см⁻³ простирается от десятков сантиметров до нескольких метров, что в принципе соответствует линейным размерам сепараци-

онных устройств и укладывается в пределы области разделения элементов или их изотопов.

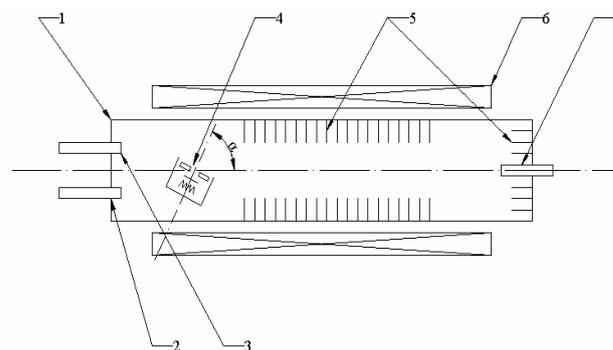


Рис. 2. Принципиальная физическая схема сепарационного устройства на основе пучково-плазменного разряда: 1 – вакуумная камера; 2 – система ввода разделяемого вещества; 3 – система ввода поджигающего газа; 4 – электронная пушка; 5 – ионоприемники; 6 – магнитная система; 7 – коллектор пучка

Таблица 2

Параметры	ERIC France [6], 1989	PMF (DEMO) USA [7], 2001	ПС-1 РФ [8], 2004	ОПН-1 ННЦ ХФТИ Украина [9], 2007
Габаритные размеры, L/d, М	4/0,3	>4/0,8	–	>4/1,5
Диаметр плазмы, М	0,12	0,75	1	1
Тип магнитной системы	Сверхпроводящая	Тепловая из 4 соленоидов	–	Сверхпроводящая
Напряженность магнитного поля, Тл	3	0,16	–	≤ 3
Способ и механизм создания сепарационной плазмы	Термическое испарение или распыление с последующей ионизацией в ЭЦР-разряде и нагревом по методу ИЦР	Паровая или капельная фаза с последующим переводом в термическую плазму и доионизацию в геликоновом разряде	Термическое испарение или распыление с последующей ионизацией в ЭЦР-разряде и нагревом по методу ИЦР	Распыление, испарение, ППР
Плотность n_p , см ⁻³	$10^{10} \dots 10^{12}$	$>10^{13}$	$>10^{13}$	$\geq 10^{12}$
Температура T_e/T_i , эВ	1,4...6/0,2...0,6	1,5-2/	–	50/20
Средства диагностики	Оптика, пассивная корпускулярная, СВЧ	Оптика, зондовая, термометрия	–	Пассивная корпускулярная, зондовая, оптика, СВЧ
Рабочее вещество, разделяемые элементы, изотопы	Ca, Cr, Zn, Ba, Yb, Cr, Ni, Pd, Mo, Fe, Gd	Ar, Xe, Cu, Au, Ag, Na, Bi, NaOH, PAO	Переработка PAO и ОЯТ	Переработка PAO и ОЯТ, обогащенные изотопы
Энергетика плазменная/общая, МВт	–	5/7	0,6/	1–4/
Производительность	–	0,63...0,99 т/сут (при $n_p > 10^{13}$ см ⁻³)	150 т/год по урану (при $n_p > 10^{13}$ см ⁻³)	30 т/год по урану (при $n_p = 10^{12}$ см ⁻³)
Статус установки	<u>И</u>	DEMO, <u>П</u>	<u>П</u>	Концепт.проект, <u>П</u>

Экспериментально установлено [13], что при взаимодействии с плазмой плотностью $10^{14} \dots 10^{15}$ см⁻³ в магнитных полях напряженностью $H_0 \leq 35$ кЭ элек-

тронный пучок может потерять до 65 % своей первоначальной мощности. При плотностях $10^{12} \dots 10^{13}$ см⁻³ и $H_0 < 10$ кЭ уровень потерь составляет 10...20 %. Изме-

нение величины H_0 от 5 до 15 кЭ приводит к увеличению энергосодержания плазмы более чем на два порядка величины, что соответствует увеличению температуры плазмы от нескольких электронвольт до нескольких сотен и более, что по сути дела отвечает основным требованиям, предъявляемым к МПС'ам [15]. Показано, что эффективность пучкового нагрева плазмы плотностью $n_p > n_b$, где n_p – плотность плазмы, а n_b – плотность пучка, зависит от тока и энергии пучка, плотности плазмы и нейтральной среды, конфигурации и напряженности магнитного поля, от способа ввода (инъекции) электронного пучка в зону удерживающего поля. В пучково-плазменном разряде наряду с нагревом электронов происходит нагрев ионов (рис. 3).

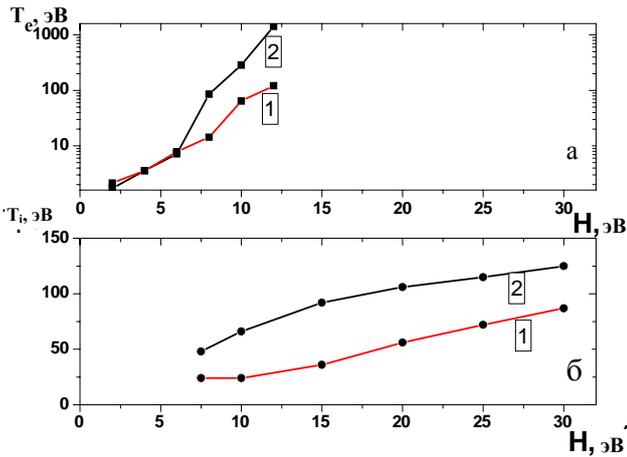


Рис. 3. Зависимость электронной (а) и ионной (б) температуры плазмы пучково-плазменного разряда от напряженности магнитного поля:
 1 – $n_p = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $E_e = 30 \text{ кэВ}$, $I_e = 7,2 \text{ А}$,
 $\delta = E_{\perp}/E_{\parallel} = 6 \%$, 2 – $n_p = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $E_e = 30 \text{ кэВ}$,
 $I_e = 10 \text{ А}$, $\delta = E_{\perp}/E_{\parallel} = 38 \%$ (а);
 1 – $n_p = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, 2 – $n_p = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (б)

Основным механизмом нагрева обеих компонентов плазмы является циклотронный механизм – циклотронный резонанс. В случае электронной компоненты плазмы нагрев ее сильно зависит от соотношения между электронной плазменной частотой ω_{oe} и электронной циклотронной частотой ω_{He} . Экспериментально установлено, что максимальный нагрев электронов происходит в условиях циклотронного резонанса в точке $\omega_{oe} = 2\omega_{He}$. В то же время нагрев ионов эффективен, когда частота вращения плазмы в скрещенных \vec{E} - и \vec{H} -полях становится порядка ионно-циклотронной частоты ω_{Hi} , что приводит к возникновению ионно-циклотронных колебаний с частотами и инкрементами порядка ионно-циклотронной частоты $\omega \sim \omega_{Hi}$. Таким образом, в системе реализуется нагрев частиц плазмы в результате ионно-циклотронного резонанса.

Отличительными чертами магнитоплазменного устройства на основе пучково-плазменного разряда от известных устройств подобного типа являются: способ создания и нагрева плазмы; возможность одновременного или раздельного использования испарительных и распылительных механизмов подачи рабочего вещества в разряд; конструктивное упрощение за счет отказа от использования внешних ВЧ-генераторов и внутренних

антенных устройств для образования и нагрева плазмы; снижение жесткости требований к параметрам и топологии магнитной системы; снижение энергетических затрат на создание и нагрев плазмы. Действующие ноу-хау связаны с особенностями инъекции электронного пучка, подачи поджигающего газа, геометрии магнитной системы и реализации пучково-плазменного взаимодействия.

На рис. 4 приведен вариант предлагаемого сепарирующего устройства. Это схематическое изображение сепарирующего устройства с обозначением основных функциональных узлов и блоков в их физикотехнической связи и взаимодействии. Параметры этого устройства ОПН-1 (концептуальный проект) приведены в табл. 2.

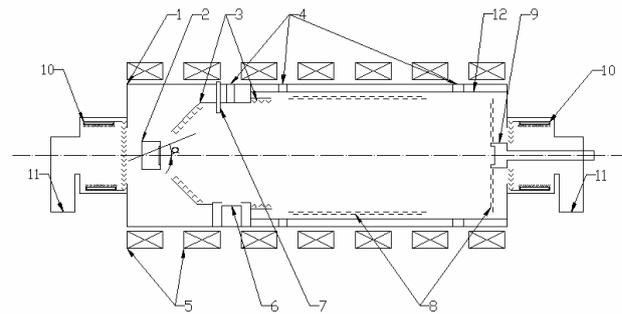


Рис. 4. Схема сепарирующего устройства ОПН-1 на основе пучково-плазменного разряда:

- 1 – вакуумная камера; 2 – электронная пушка;
- 3 – радиационные экраны; 4 – диагностические окна;
- 5 – магнитные катушки; 6 – блок фазовых преобразований;
- 7 – натекатель поджигающего газа;
- 8 – приемные пластины; 9 – приемник пучка;
- 10 – криогенный насос; 11 – откачной пост;
- 12 – лайнер; α – угол пространственной ориентации электронной пушки

Работает предлагаемое устройство (см. рис. 2) следующим образом. На первом – подготовительном – этапе, целью которого является создание предварительной плазмы в объеме вакуумной камеры 1 путем ионизации поджигающего газа электронным пучком, производится включение магнитного поля с помощью магнита 6, напуска поджигающего газа с помощью узла подачи поджигающего газа 3, включается электронная пушка 4 и производится инъекция электронного пучка в область магнитного поля, где он ударной ионизацией поджигающего газа создает предварительную плазму плотностью до 10^{10} см^{-3} . На втором – рабочем – этапе открывается узел подачи разделяемого вещества 2, и пары разделяемого вещества поступают в объем предварительно созданной плазмы, где происходит их ионизация. При этом ионизация паров разделяемого вещества производится как электронами инжектированного первичного электронного пучка, так и электронами плазмы, образованной при ионизации поджигающего газа. В этом случае плотность плазмы возрастает до 10^{13} см^{-3} и более. За счет физического механизма коллективного пучково-плазменного взаимодействия происходит нагрев электронов и ионов плазмы до величин в несколько десятков электронвольт и более. Существенную роль в процессах образования и нагрева плазмы в объеме устройства для разделения вещества на элементы играет угол (α) наклона оси анодного отверстия электронной пушки

к оси вакуумной камеры. Установлено, что при изменении величины угла α от 3 до 40° время образования плазмы уменьшается почти на порядок. Это объясняется тем, что при увеличении угла наклона у электронов инжектируемого пучка возрастает поперечная составляющая их энергии (скорости) и, как следствие, увеличивается их длина пробега в среде ионизируемого вещества (пара) и соответственно увеличивается число соударений электрон-нейтрал. Кроме того, быстрее происходит нагрев плазменных электронов, производящих ионизацию, так как возрастает амплитуда возбуждаемых в системе плазма-пучок колебаний и происходит расширение спектра частот. Таким образом, соответствующим выбором условий инжекции электронного пучка можно добиться высокой эффективности образования плазмы при взаимодействии электронного пучка с парами разделяемого вещества. В целом регулировка параметров плазмы (плотности и температуры) производится путем изменения энергии и тока пучка, угла его инжекции, плотности (количества) паров разделяемого вещества в объеме вакуумной камеры, напряженности магнитного поля. В случае, если разделяемое вещество в своем составе имеет легкую и тяжелую фракции, то образовавшиеся в разряде ионы разделяются по массам и собираются на приемных пластинах 5: легкие ионы на пластинах в торце камеры, тяжелые - в центре камеры на ее боковой поверхности.

Более подробно концепция разделения в этом случае может выглядеть следующим образом.

– В продольное магнитное поле пробочной конфигурации вдоль оси z инжектируется рабочее вещество в требуемом фазовом состоянии, например, в виде сверхзвуковой струи.

– Электронный пучок, вводимый в магнитную ловушку через пробку, ионизирует рабочее вещество и нагревает электроны и ионы образовавшейся плазмы до температур в несколько сотен электронвольт или более вследствие развития пучковой неустойчивости с возможной реализацией всех осуществляемых в системе плазма-пучок механизмов и частот (плазменных, циклотронных, верхнегибридных, нижнегибридных, их гармоник и др.).

– В образовавшейся и нагретой до температуры T_i плазме, находящейся в продольном магнитном поле, ионы с разными массами имеют разные ларморовские радиусы. Используя различие ларморовских радиусов, производится разделение относительно легких и «тяжелых» ионов, а именно: тяжелые ионы осаждаются на боковых электродах, расположенных вдоль внутренней поверхности цилиндрической части корпуса установки, а легкие - уходят и выделяются на торцевых электродах.

– В данном варианте разделение вещества производится грубо по массовым группам. Высокая производительность разделения может достигаться в том случае, если в процессе участвуют все ионы плазмы.

– В случае необходимости, например T_i – мало, можно дополнительно ввести внешнее радиальное электрическое поле E_r , подав соответствующий потенциал на торцевые электроды или между анодом электронной пушки и стенкой камеры.

3.2. Отражательный разряд

Как указывалось в разд. 2 настоящего материала, одним из вариантов реализации магнитоплазменного сепаратора можно считать отражательный разряд Пеннинга, первоначально исследования которого проводились при $n_p = 10^9 \dots 10^{10} \text{ см}^{-3}$. В то же время для создания промышленных устройств с высоким уровнем производительности требуются плотности плазмы $10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и выше. Все это приходилось учитывать при проведении физических исследований и выбора варианта концептуального проекта сепарирующего устройства на основе отражательного разряда. Один из вариантов концепт-проекта приведен на рис. 5 – физическая схема устройства и рис. 6 – объемное изображение полномасштабной установки, размеры которой соответствуют размерам, указанным в проекте ОПН-1 (см. табл. 2).

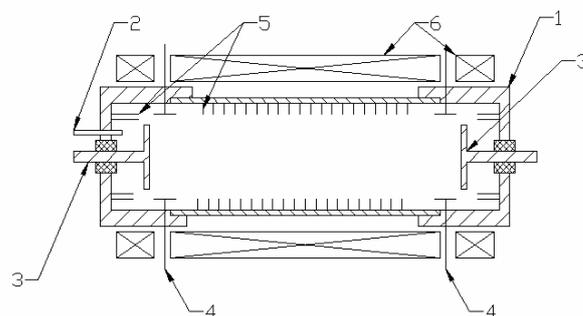


Рис. 5. Физическая схема сепарационного устройства на основе отражательного разряда: 1 – вакуумная камера; 2 – узел подачи поджигающего газа; 3 – катод; 4 – анод; 5 – приемник плазменного потока; 6 – магнитная система; 7 – изолятор

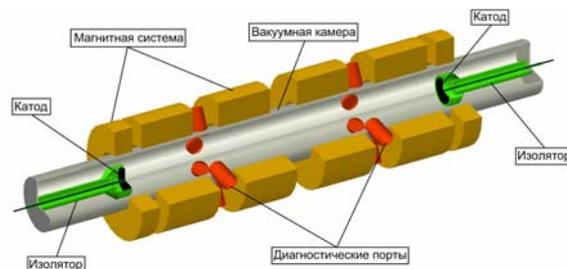


Рис. 6. Объемное изображение сепарационного устройства на основе отражательного разряда

Работает предлагаемое устройство (см. рис. 5) следующим образом. На первом - подготовительном - этапе при включенных катушках магнитного поля 6, образуется предварительная плазма в объеме вакуумной камеры путем ионизации поджигающего газа 2 в отражательном разряде с холодными катодами 3, для которого характерно многократное прохождение межкатодного пространства электронами, производящими ионизацию нейтральных частиц разделяемого вещества. Разряд возникает в объеме вакуумной камеры 1 при подаче высокого напряжения на разрядный промежуток анод 4 – катод 3. При этом в плазме отражательного разряда, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях, когда ионная циклотронная частота становится кратной относительно угловой частоты вращения компонент плазмы $\omega_{Hi} \sim 2\omega_{вр.}$, происходит

возбуждение продольных плазменных колебаний на частоте, близкой к ионной циклотронной частоте со значительно большей амплитудой и направлением распространения поперек магнитного поля. Развитие резонансной циклотронной неустойчивости сопровождается эффективным нагревом ионной компоненты плазмы. После этого потоки и частицы вновь образованной предварительной плазмы бомбардируют наружные поверхности катодов, обращенные к разряду, и в разряд поступают распыленные частицы материала катодов, т. е. разделяемого вещества, где они ионизируются, нагреваются и затем высаживаются на приемных пластинах 5. Разделяемое вещество в предлагаемом устройстве может содержаться следующим образом: по первому варианту катоды изготавливаются из разделяемого вещества, которое поступает в разряд в распыленном виде; по второму варианту разделяемое вещество напыляется на катодную подложку в атмосфере инертных газов. Изготовленный таким образом катод помещается в вакуумную камеру и подвергается распылению под действием потоков частиц вначале предварительной (из поджигающего газа) плазмы, затем основной (из распыленного разделяемого вещества) плазмы. Действующие ноу-хау заключаются в том, что устройство для разделения вещества на элементы выполнено в виде анодно-катодной электродной системы, а катоды из разделяемого вещества либо в виде монолита, либо в виде напыленного на катодную подложку слоя, и разряд первоначально инициируется в среде поджигающего газа.

Соответствие полученных экспериментальных результатов по исследованию параметров плазмы отражательного разряда Пеннинга сепарационным задачам наглядно продемонстрировано при изучении спектров оптического излучения из плазмы и флюктуационного спектра зондирующего СВЧ-сигнала (рис. 7 и 8). Зафиксировано совпадение пиков оптического и СВЧ флюктуационного спектров в разряде. Кроме того, установлено, что всплески флюктуаций наблюдаются на характерных частотах, соответствующих ионно-циклотронным частотам тех газов и паров металлов, в атмосфере которых протекает разряд. Появление резонансных пиков, соответствующих ионно-циклотронным частотам различных ионов, фиксируемых в разряде другими средствами, может объясняться развитием электростатической ионно-циклотронной неустойчивости [16] и, как следствие этого, развитием электростатических ионных циклотронных волн.

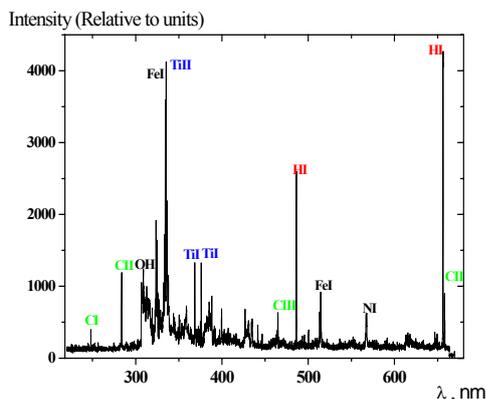


Рис. 7. Спектрограмма водородно-титановой плазмы

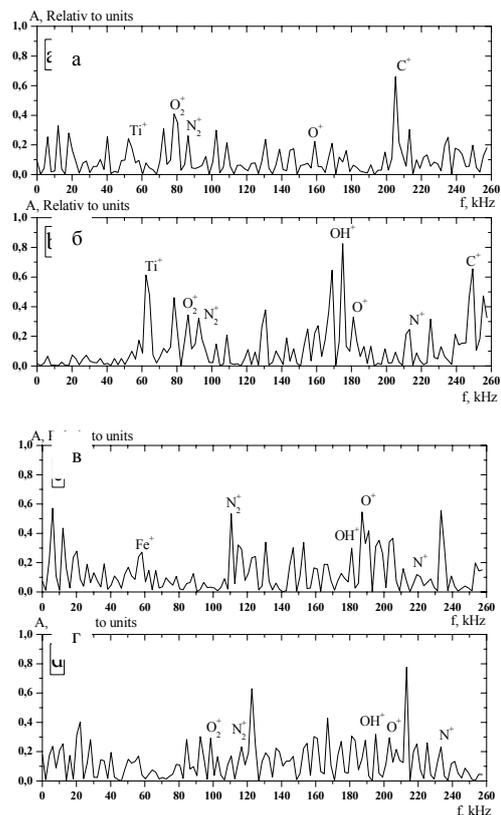


Рис. 8. Спектр флуктуаций уровня отраженного СВЧ-сигнала от плазменного слоя с $n \geq 1,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ водородно-титановой плазмы в различные моменты разряда: а – интервал времени 3,2...3,4 мс от начала включения магнитного поля; б – 3,4...3,6 мс; в – 3,6...3,8 мс; г – 3,8...4 мс

3.3. Сравнительный анализ вариантов ввода рабочего (разделяемого) вещества в разряд

Задача ввода разделяемого вещества в область ионизации сепарирующего устройства может решаться различными способами. Например, путем реализации процесса испарения расплавов солей, имитирующих работу с РАО, на стадии поискового эксперимента или ЖРО на стадии рабочего процесса. Достижение поставленной цели в данном случае осуществляется, например, с помощью испарителя на базе высокочастотного индуктивного (ВЧИ) плазмотрона [17]. Другой возможностью может быть термический испаритель со сверхзвуковым формирователем парового потока. Рассмотрим подробнее эти два варианта ввода рабочего вещества в разряд.

В [17] описан испаритель на базе ВЧИ-плазмотрона (рис. 9). Назначение испарителя – перевод ЖРО в паробразное состояние с целью их дальнейшего магнито-плазменного разделения на фракции по атомному весу и степени радиоактивности. Работа экспериментальной установки осуществлялась с расплавами солей (алюминатами натрия), образующихся в результате химических реакций $\text{NaOH} + \text{Al}(\text{OH})_3 = \text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$, $3\text{NaOH} + \text{Al}(\text{OH})_3 = \text{Na}_3[\text{Al}(\text{OH})_6]$, моделирующих радиоактивные смеси. Для возможности визуального наблюдения и фоторегистрации плазмы разрядная камера плазмотрона была изготовлена из кварцевого стекла. ВЧИ-разряд зажигался в среде аргона. Ниже приведены основные параметры ВЧИ-плазмотрона.

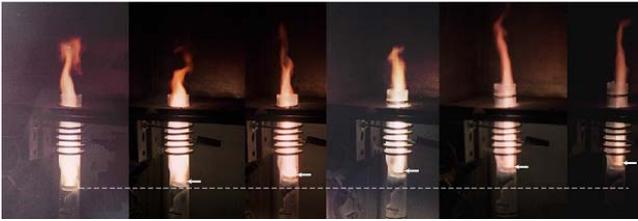


Рис. 9. Динамика процесса испарения мелкодисперсных капль расплавов солей в плазме ВЧИ-плазматрона

Рабочая частота плазматрона, МГц	.....1,76...5,28
Мощность плазматрона, кВт	.....5...40
Тип генератора	.....ВЧГ-5,28/60
Скорость подачи капль в плазму, м/с	.....10...30
Расход рабочего газа, л/мин	.....25
Температура плазмы, К	.....3500...7000
Рабочее давление испарителя, Торр	.....10^{-2}
Диаметр мелкодисперсных капль	
NaOH, мкм	.....10...70
Глубина проникновения капль в плазму, мм	.....46...113
Полное время пребывания капль в потоке плазмы, мс	.....15...6,5

Подача рабочего вещества (расплава солей) производится в плазму в виде мелких капль с фиксированными величинами наружных диаметров. Испарение капль исключает дистилляцию, характерную для других способов испарения многокомпонентных расплавов, содержащих в своем составе соединения с различными температурами плавления и испарения. Экспериментально было установлено, что для полного испарения капль заданного размера в ВЧИ-плазматроне необходимо подавать их в плазму снизу вверх по оси плазматрона со скоростью $V_{so} \geq 16$ м/с (см. рис. 9). Верхний предел скорости подачи капль в плазматрон ограничен ее величиной 30 м/с, что связано с ограничением расхода транспортирующего газа и возможностью срыва разряда.

В отличие от литературного прототипа [17] предлагаемый термический испаритель со сверхзвуковым формирователем парового потока, схема которого была представлена ранее [18], обладает несколькими отличительными свойствами, а именно: в устройстве такого типа реализуется регулируемый капльно-кластерный режим работы, причем его регулировка осуществляется путем изменения (подбора) давления пара в критическом сечении сверхзвукового элемента; для сверхзвукового течения характерный размер кластера составляет $10^3 \dots 10^4$ молекул, хотя возможны режимы с размером 10^5 молекул в кластере; предлагаемое устройство для формирования парового потока пригодно для фазовых превращений как жидких, так и твердых РАО; скорость потока, достигаемая в сверхзвуковом формирователе пара, составляет $\geq (1 \dots 3) \cdot 10^2$ м/с, что на порядок и более превосходит данные, изложенные выше для литературного прототипа [17]; возможен вариант создания пространственно распределенного парового потока разделяемого вещества путем суперпозиции одиночных блоков (рис. 10). Таким образом, термосверхзвуковой формирователь парового потока позволяет вводить рабочее вещество в область ионизации электронным пучком, где происходит его взаимодействие с предвари-

тельно созданной плазмой из поджигающего газа (см. рис. 2 и 5). Так как в столбе плазмы из поджигающего газа последовательно будут происходить испарение капль и разрушение кластеров, то все фазовые переходы будут совершаться в основном плазменном образовании, в то время как в литературном прототипе [17] для этой цели используется специальное плазменное устройство (ВЧИ-плазматрон). Таким образом, эта особенность термосверхзвукового формирователя парового потока и превосходство в скорости движения парового потока приводят к увеличению глубины проникновения капль в плазменную среду и сокращению полного времени ее пребывания в плазменном столбе, а также позволяет в целом повысить эффективность предлагаемого способа и устройства для ввода рабочего вещества в парообразном состоянии в разделительную установку.

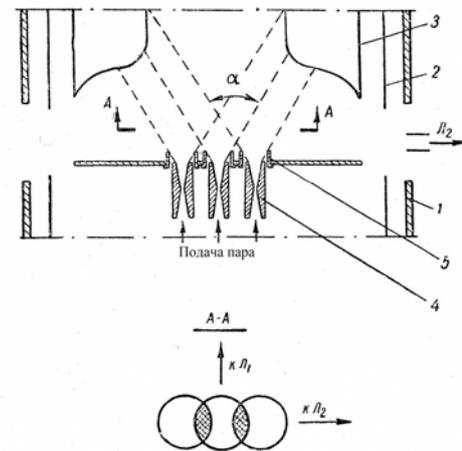


Рис. 10. Вариант широкоапертурного БФП, создаваемого суперпозицией одиночных моноблоков:

- 1 – корпус; 2, 3 – холодные поверхности;
- 4 – сверхзвуковой формирователь потока;
- L_1 и L_2 – датчики давления;
- α – угол пересечения потоков

ВЫВОДЫ

1. Предложены и физически обоснованы варианты устройств для разделения вещества в конденсированном состоянии на элементы с использованием двух типов электрических разрядов: пучково-плазменного и отражательного разряда Пеннинга.
2. Определены параметры устройств для разделения вещества с использованием вышеназванных разрядов. Причем обе разрядные технологии могут быть реализованы в одних и тех же вакуумно-магнитных условиях (объем вакуумной камеры, конфигурация, напряженность магнитного поля и др.), и плазмосоздающие системы могут быть взаимозаменяемые.
3. Использование физических механизмов, приводящих к самовозбуждению ВЧ-колебания, которые необходимы для создания и нагрева сепарационной многокомпонентной плазмы, несколько упрощает компоновку и систему сепаратора и снижает жесткость требований к отдельным его узлам, в частности, к магнитной системе.
4. Предложен способ подачи рабочего вещества в область ионизации в капльно-кластерном режиме с использованием сверхзвукового формирователя потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ядерная энергетика. Обращение с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами* / Под ред. И.М. Неклюдова. Киев: «Наукова думка», 2006, 253 с.
2. В.В. Власов, И.И. Залюбовский, Ю.А. Кирочкин, М.Г. Кривонос, Ю.П. Крячко, А.М. Рожков, М.В. Сосипатров, К.Н. Степанов, В.И. Фареник. Пространственное распределение и вывод ионных компонентов вращающейся плазмы при развитии резонансной циклотронной неустойчивости // *Письма в ЖЭТФ*. 1978, т. 27, № 5, с. 264-267.
3. Г.А. Аскарьян, В.А. Намиот, А.А. Рухадзе. Изменение массового состава плазмы в плазменных ловушках при ионном циклотронном нагреве // *Письма в ЖЭТФ*. 1975, т. 1, с. 820.
4. J.M. Dawson, H.C. Kim, D. Arnush, et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1976, v. 37, p. 1547.
5. Ю.В. Ковтун, С.І. Скибенко, В.Б. Юферов. Магнітоплазмові сепараційні технології і їх можливе використання для переробки ВЯП і РАВ // *Ядерні та радіаційні технології*. 2007, т. 7, № 1-2, с. 72-80.
6. P. Louvet // *In Proc: 2nd Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases, Versailles*. 1989, v. I, p. 71.
7. A. Litvak, S. Agnew, F. Anderegg, B. Cluggish, R. Freeman, J. Gilleland, R. Isler, W. Lee, R. Miller, T. Ohkawa, S. Putvinski, L. Sevier, K. Umstadter, D. Winslow. Archimedes Plasma Mass Filter // *30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys.* St. Petersburg (Russia), 2003, v. 27A, p. O-1.6A.
8. V.A. Zhil'tsov, V.M. Kulygin, N.N. Semashko, A.A. Skovoroda, V.P. Smirnov, A.V. Timofeev, E.G. Kudryavtsev, V.I. Rachkov, V.V. Orlov. Plasma separation of the elements applied to nuclear materials handling // *Atomic Energy*. 2006, v.101, N4, p. 755-759.
9. Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Действующие и разрабатываемые магнитоплазменные сепараторы для разделения вещества на элементы и их изотопы // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2008, № 2, с.149-154.
10. N.R. Stevenson, T.S. Bigelow, F.J. Tarallo. Industrial scale production of stable isotopes employing the technique of plasma separation // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2003, v. 257, N 1, p. 153-155.
11. T.S. Bigelow, F.J. Tarallo, N.R. Stevenson. Production of stable isotopes utilizing the plasma separation process // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. 2005, v. 241, p. 652-654.
12. М.Ю. Бредихин, Б.В. Гласов, Р.В. Пайл, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Магнитная система для исследования лоренцевой ионизации высоковольтных атомов водорода // *Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза: Сборник статей*. Киев, 1971, в. 2, с. 251-260.
13. Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Системы с самовозбуждением ВЧ-колебаний для создания, нагрева и сепарации многокомпонентной плазмы // *Вісник Харківського університету. Серія фізична: Ядра, частинки, поля*. 2008, №794, в. 1/37/, с. 115-120.
14. Я.Б. Файнберг. Взаимодействие пучков заряженных частиц с плазмой // *Атомная энергия*. 1961, т. 11, №4, с. 313-335.
15. Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов, Ю.В. Ковтун. Форинжектор разделяемого вещества на основе пучково-плазменного разряда для ионно-атомных сепарационных технологий. Концептуальный проект. Часть вторая // *Вестник Национального технического университета ХПИ. Тематический выпуск «Техника и электрофизика высоких напряжений»*. 2007, т. 20, с.180-199.
16. Д.Г. Ломинадзе. *Циклотронные волны в плазме*. Тбилиси: «Мецниереба», 1975, 223 с.
17. О.Н. Фейгенсон. *Разработка и исследование высокочастотного плазмотрона и стенда для переработки промышленных отходов*: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2002, 18 с.
18. Е.И. Скибенко. Физико-технические аспекты создания устройств магнитоплазменного разделения вещества на элементы и их изотопы на основе пучково-плазменного разряда // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2009, №6, с. 67-85.

Статья поступила в редакцию 24.07.2010 г.

РОЗДІЛЕННЯ РЕЧОВИНИ НА ЕЛЕМЕНТИ, ЯКЕ БАЗУЄТЬСЯ НА ФІЗИЧНИХ ПРИНЦИПАХ ПУЧКОВО-ПЛАЗМОВОГО І ВІДБИВНОГО РОЗРЯДІВ

Є.І. Скибенко, Ю.В. Ковтун, О.М. Єгоров, В.Б. Юферов

Описуються пристрої для розділення речовини на елементи з використанням двох типів розрядів: пучково-плазмового і відбивного. Обидві розрядні технології можуть бути реалізовані в одних і тих вакуумно-магнітних умовах і плазмостворюючі системи можуть бути взаємозамінними. Запропоновано спосіб подачі робочої речовини в область іонізації в крапельно-кластерному режимі.

MATERIAL SEPARATION INTO ELEMENTS BASED ON THE PHYSICAL PRINCIPLES OF BEAM-PLASMA AND REFLEX DISCHARGES

E.I. Skibenko, Yu. V. Kovtun, A.M. Yegorov, V.B. Yufarov

The devices designed for material separation into elements with the use of two types of discharges (beam-plasma and reflex discharges) are described. Both discharge technologies can be realized under the same vacuum-magnetic conditions and the plasma-forming systems can be interchangeable. A method for working material feeding into the ionization region in the drop-cluster mode of operation is offered.