

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ МАССОВОГО РАСХОДА РАСПЫЛЯЕМОГО И РАЗДЕЛЯЕМОГО ВЕЩЕСТВА В ИМПУЛЬСНОМ ОТРАЖАТЕЛЬНОМ РАЗРЯДЕ

Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, А.И. Скибенко, В.Б. Юферов

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,

Харьков, Украина

E-mail: Ykovtun@kipt.kharkov.ua

На основе экспериментальных данных проведены количественные оценки массового расхода катодного вещества, поступающего в разряд за счет механизма распыления рабочих поверхностей катодов под действием ионных потоков предварительно созданной газовой плазмы в импульсном отражательном разряде со скрещенными $E \times B$ -полями. Произведена также оценка массового количества рабочего вещества многокомпонентной плазмы, образуемой в разряде, выносимого поперек удерживающего магнитного поля и конденсируемого на приемных пластинах, находящихся при комнатной температуре. Полученные данные позволяют сделать вывод о направленном выделении тяжелой компоненты плазмы в результате центробежных эффектов.

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблемы создания устройств и технологий разделения вещества на ионно-атомном уровне на элементы и их изотопы требует, по крайней мере, четкого выбора и формулирования двух основных задач, а именно: физических принципов, на основе которых должна решаться проблема; оптимизированного варианта ввода рабочего вещества в область ионизации и создания высокоионизованной плотной плазмы. На данный момент в [1] сформулированы модернизированные взгляды на проблематику сепарации вещества в ионизированном состоянии, которые концептивно заключаются в следующем: а) ключевым моментом в выборе типа разделяемого устройства (технологии) является вращающаяся плазма; б) при этом рассматривается только высоко-ионизованная плотная плазма с концентрацией частиц 10^{14} см^{-3} ; выбор такого значения плотности разделяемой плазмы обосновывается тем, что только при плотности плазмы 10^{14} см^{-3} можно достичь производительности переработки ядерных отходов 1500 т/год или 4...6 т/сут, что согласуется с мощностью химических перерабатывающих предприятий того же профиля; в) для масс-фильтров (масс-технологий), основанных на вращении плазмы, коэффициент сепарации экспоненциально зависит от скорости вращения и разности разделяемых масс; исходя из этого и требуемой производительности разделительных устройств (см. выше п. б) скорость вращения плазмы должна быть порядка 10 км/с (10^6 см/с), что отвечает современным требованиям; при данной скорости вращения плазмы и при больших разностях разделяемых масс (25 а.е.м.) коэффициент сепарации на отдельных стадиях технологического процесса может достигать значений от 10^2 до 10^6 .

Теперь перейдем к анализу второй задачи, обозначенной выше и необходимой для решения проблемы разделения вещества на ионно-атомном уровне, а именно: исследование и разработка оптимизированного варианта ввода рабочего вещества в ионизационную зону и как итог – создание необхо-

димой высокоионизованной плотной плазмы. Известно устройство [2] для разделения изотопов, состоящее из вакуумной камеры, источника плазмы, узла подачи рабочего (разделяемого) вещества, который вводит разделяемое вещество в виде пара в источник плазмы, магнитной системы и ВЧ-генератора. Внутри вакуумной камеры располагалась также ВЧ-антенна. Известно также другое устройство [3], которое содержит вакуумную камеру, источник плазмы, узел подачи рабочего (разделяемого) вещества, магнитную систему и приемник плазменного потока. Для повышения эффективности работы устройства в целом и источника плазмы в частности, помимо прочего, устройство снабжено узлом подачи поджигающего газа.

Совершенно иной подход к решению подачи рабочего (разделяемого) вещества в зону ионизации предложен в [4] и частично апробирован в [5]. Суть этого предложения заключается в том, что в пределах локализованного вакуумного пространства с помощью запатентованного устройства на основе отражательного разряда [4] реализуется несколько физических процессов и отличий от известных решений [2,3], приводящих к созданию плотной (10^{14} см^{-3}) высокоионизованной плазмы из разделяемого вещества. Это, во-первых, факт, что материалом катодов служит разделяемое вещество. Во-вторых, материал катодов должен поступать в разряд за счет механизма его распыления плазменными потоками и частицами. В третьих, процесс образования плазмы из разделяемого вещества последовательно проходит следующие стадии: создание предварительной плазмы плотностью $10^{10} \dots 10^{12} \text{ см}^{-3}$ из поджигающего газа; создание основной (рабочей) плазмы из разделяемого вещества. Результаты частичной апробации запатентованного предложения [4] по созданию разделительного устройства на основе отражательного разряда, о чем упоминалось выше, состояли в следующем [5]:

1). Экспериментально показано, что распылительный способ подачи рабочего вещества является достаточно эффективным механизмом, обеспечивающим создание многокомпонентной плазмы, на-

пример, H_2+Ti , $Ar+Ti$, $Kr+Xe+Ti$ плотностью $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Измеренные величины коэффициента распыления Ti лежат в диапазоне $(2,8...2,6) \cdot 10^2$ ат./ион, что соответствует литера-турным данным;

2). Экспериментально показано, коэффициент разделения вещества во вращающейся со скоростью $v_\phi \sim 2 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ (20 км/с) плазме может быть достаточно высоким $\geq 10^3$.

3) Проведенный анализ и эксперименты подтверждают обоснованность концепции создания устройства для разделения вещества на элементы, в том числе отработанного ядерного топлива и радиоактивных отходов, на основе отражательного разряда, сформулированной в патенте [4], с достаточно высокой производительностью его переработки, около 30 т/год.

Для развития настоящей темы будут проведены экспериментальные исследования по оценке массового расхода распыляемого и разделяемого катодного вещества в многокомпонентной плазме импульсного отражательного разряда. Таким образом, целью данной работы является составление и анализ на основе экспериментальных данных оценочного баланса массы катодного вещества, поступающего в разряд, при этом отслеживая последовательно стадии его распыления плазменными потоками и частицами, и выноса в радиальном направлении (поперек удерживающего магнитного поля) для подтверждения направленного выделения тяжелой компоненты вращающейся плазмы импульсного отражательного разряда.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные исследования процессов распыления катодного вещества и выноса на приемные пластины в радиальном направлении проводились на установке МАКЕТ, представляющей собой импульсный отражательный разряд в продольном магнитном поле пробочной конфигурации. Электрофизические параметры установки и разряда приведены в табл. 1.

Поскольку подробное описание экспериментальной установки приводилось ранее [6,7], то здесь будут отмечены некоторые особенности эксплуатационного режима и новые элементы, связанные с данными исследованиями. В средней части магнитной системы между диагностическими портами были расположены шесть приемных пластин для сбора частиц тяжелой (металлической) компоненты плазмы, выходящих поперек магнитного поля. Каждая приемная пластина представляла собой диск $\varnothing 3,3 \text{ см}$ и толщиной $0,03 \text{ см}$ из нержавеющей стали. Приемные пластины располагались таким образом, что их рабочие поверхности, на которых происходила конденсация выходящих из плазменного столба частиц, были ориентированы вдоль магнитных силовых линий.

Таблица 1

Параметры	Значения
Электроразрядная система:	
– напряжение разряда, кВ	$\leq 4,6$
– ток разряда, кА	≤ 2
– длительность импульса, мс	~ 1
– емкость С-накопителя, мкФ	560
– энергосодержание, кДж	≤ 6
Магнитная система:	
– напряжение, кВ	≤ 3
– длительность импульса, мс	18
– индукция магнитного поля, Тл	$\leq 0,9$
– пробочное отношение R	1,25
Объем вакуумной камеры, см^3	$\sim 6,6 \cdot 10^4$
Начальное давление, Па	$1,33 \cdot 10^{-4}$
Рабочее давление, Па	0,133-4,7
Диаметр катодов, см	10
Материал катодов	Ti
Поджигающий газ	Ar
Объем плазмы, см^3	$\sim 10^4$

На рис. 1 приведено геометрическое расположение приемных пластин в экспериментальной установке.

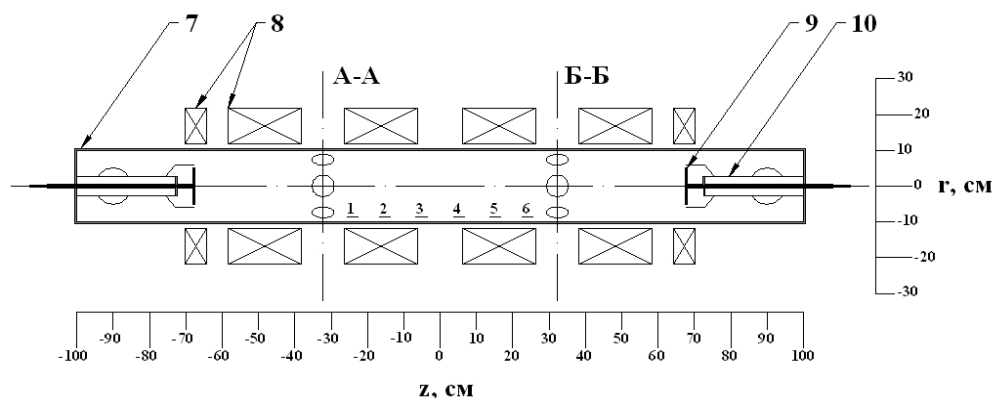


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки и геометрического расположения приемных пластин: 1–6 – приемные пластины; 7 – разрядная камера (анод); 8 – магнитная система; 3 – диагностические порты; 9 – катоды; 10 – изолятор; А-А, Б-Б – сечения диагностических портов

В данной серии экспериментальных исследований было произведено всего 3446 импульсов, причем 3107 импульсов (90,16 % от полного количества) было сделано на плазме $Ar+Ti$ и 339 импульсов (9,84 %) на плазме $Kr+Xe+Ti$. Диаграмма прироста

массы каждой из шести приемных пластин представлена на рис. 2. Максимальная величина прироста массы характерна для пластин №2 и 4. Усредненный по всем приемным пластинам прирост их массы за счет вещества, приходящего на них из плазмы

разряда, составляет 9,39 мг на одну условную пластину. Практический прирост массы на всех пластинах отличается от усредненного прироста массы в среднем на $\pm 47\%$. Исключением является пластина №3, для которой отклонение прироста массы от усредненного значения достигает 800%, что может объясняться изменением геометрического фактора, например, угла между плоскостью пластины и нормали под действием пондеромоторных сил импульсного магнитного поля. И так, в среднем на одну приемную пластину (приемник) $\varnothing 3,3$ см и площадью приемной поверхности $8,55 \text{ см}^2$ в течение серии импульсов равной 3446 сконденсировалось около 9,39 мг, т.е. удельный поток составил примерно $1,1 \text{ мг/см}^2$. Учитывая величину площади внутренней поверхности разрядной камеры, равную $S = \pi D L = 8,48 \cdot 10^3 \text{ см}^2$, получаем соответственно оценочную величину массы распыленного катодного вещества, которое могло бы там сконденсироваться, равную $9,3 \cdot 10^3 \text{ мг}$, в предположении равномерного осаждения. Реальная убыль массы двух катодов почти на порядок меньше этой оценочной величины, что в какой-то мере может объясняться процессами переконденсации рабочего вещества и осаждения его на обратной стороне катодов и разветвленной поверхности стеклянных катодных изоляторов, что реально и наблюдается в эксперименте. В определенной мере это различие может происходить из-за пространственной неоднородности осаждения по поверхности разрядной камеры, что может привести к тому, что эффективная площадь поверхности осаждения будет много меньше геометрической и соответственно эффективная масса осажденного вещества меньше оценочной.

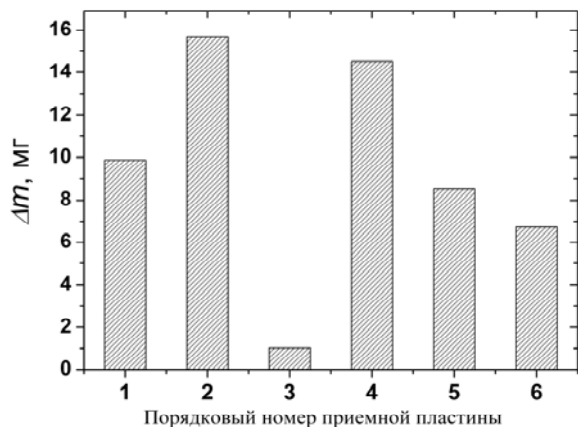


Рис. 2. Диаграмма прироста массы каждой из шести приемных пластин

Далее переходим к описанию изменений, происшедших с катодами в процессе воздействия плазменными потоками и частицами в течение выполнения серии импульсов, равной 3446 одиночных плазменных импульсов длительностью ~ 5 мс каждый. Суммарная экспозиция равна 17,23 с. На рабочей поверхности катода №1 (рис. 3) имеется около 20 серповидных дорожек, идущих от центра катода к периферии и расширяющихся в том же направлении. Ширина этих дорожек составляет от 1...2 до 4 мм. Направление разворота этих дорожек справа-

налево, т.е. против часовой стрелки. На рис. 4 приведены снимки фрагментов рабочей поверхности катода №1, полученные при увеличении в 44 и 125 раз.

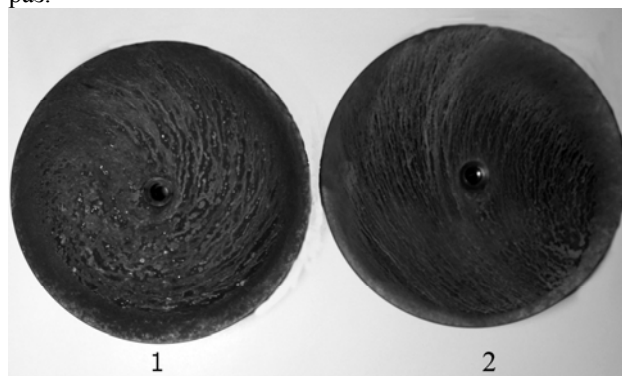
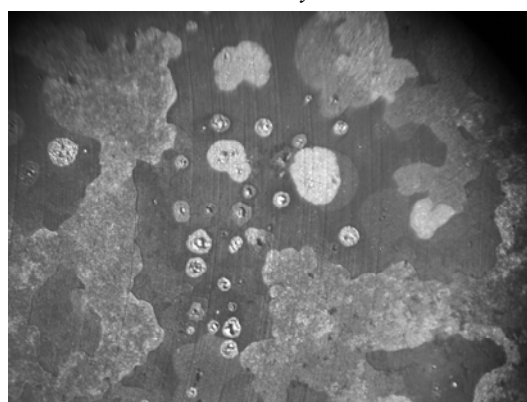
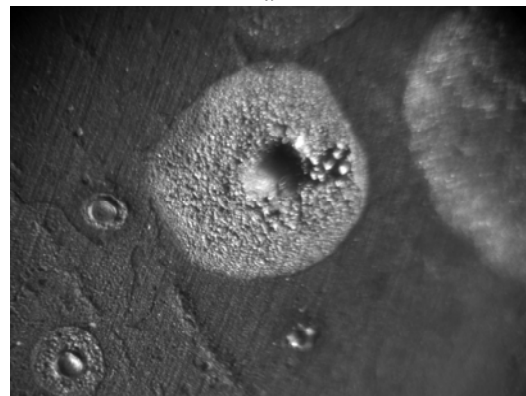


Рис. 3. Внешний вид рабочей поверхности катодов №1 и 2 по окончании измерительной серии из 3446 импульсов



а



б

Рис. 4. Фрагменты изображения отдельных участков поверхности катода №1 при увеличении в 44 (а) и 125 раз (б)

Как видно из рис. 4, на поверхности катода имеются следы эрозии катодного материала за счет процессов распыления, вакуумных дуг, блистеринга и частичного оплавления под действием плазменных и корпускулярных потоков. На рабочей поверхности катода №2 имеются аналогичные серповидные дорожки (дуги), как и на катоде №1, с той лишь разницей, что направление разворота этих дорожек обратно тому, что зафиксировано на поверхности катода №1, т.е. слево-направо (навстречу друг другу). Наличие этих дорожек с указанным направлением их разворота является подтверждением враще-

ния плазменных слоев. Структурно серповидные дорожки на катодах №1 и 2 отличаются между собой тем, что на катоде №2 они тоньше и общее их число более 20, т.е. больше, чем на катоде №1. На рабочей поверхности и обратной стороне катода №1 имеется заметный слой углеродного нагара, в то время как на рабочей поверхности и обратной стороне катода №2 слой углеродного нагара значительно меньше. Источником углеродного нагара на катодах являются продукты сгорания диффузионного масла и частицы материала катодного изолятора, разрушаемого вследствие протекающих в системе физических процессов – распыления и испарения. Общая масса углеродного нагара на катоде №1 составляет 46,35 мг, причем на рабочей поверхности менее 1/100 от этой величины. Попутно отметим, что углеродный нагар полностью отсутствует на приемных пластинах.

Как видно из рис. 3-4, на поверхности катодов находятся также участки со следами оплавления материала катода (*Ti*). Такая картина не наблюдалась ранее при работе с композитным катодом (*Ti*, напыленный на *Cu*) [5]. Наличие или отсутствие участков с оплавлением катода может быть связано с различными теплофизическими характеристиками используемых катодных материалов при одинаковом тепловом потоке. Для подтверждения высказанного предположения проведем оценочный расчет температуры поверхности катода для различных материалов. Предположим, что плотность теплового потока одинакова по всей поверхности катода и не изменяется во времени. Охлаждением поверхности катода за счет излучения пренебрегаем, что вполне оправданно, поскольку температура плазмы выше, чем катода. Таким образом, рассмотрим одномерную задачу теплопроводности через плоскую стенку. Дифференциальное уравнение теплопроводности в этом случае имеет вид [8]:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{1}{a} \frac{dT}{dt}, \quad (1)$$

где T – температура, К; t – время, с; x – координата в направлении x , м; $a = \lambda/c\rho$ – температуропроводность, m^2/c ; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³. При постоянном тепловом потоке на поверхности задаем граничное условие:

$$q = -\lambda \left(\frac{dT}{dx} \right)_s. \quad (2)$$

Для границы двух тел с различной теплопроводностью при плотном контакте и с низким контактным термическим сопротивлением (*Ti*, напыленный на *Cu*)

$$\lambda_1 \left(\frac{dT_1}{dx} \right)_s = \lambda_2 \left(\frac{dT_2}{dx} \right)_s. \quad (3)$$

Примем начальную температуру 300 К; время воздействия на поверхность, равное длительности импульса тока, 1 мс; толщину катода 3 мм, толщину слоя *Ti*, напыленного на *Cu*, 5 мкм; значения коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости возьмем из [9, 10]. Результаты расчета для раз-

личных катодных материалов приведены на рис. 5–7.

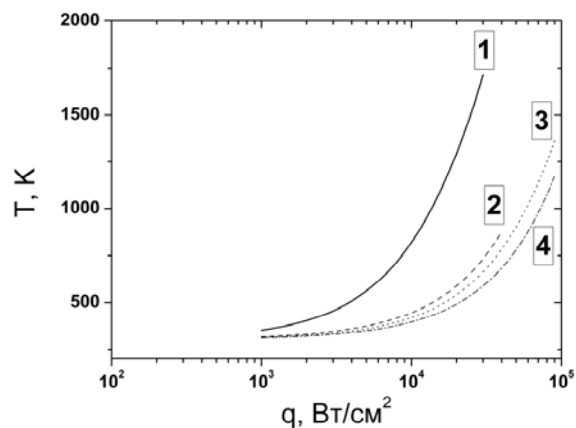


Рис. 5. Зависимость температуры поверхности катода от плотности теплового потока для различных материалов катода: 1 – *Ti*, 2 – *Al*, 3 – *Ti-Cu*, 4 – *Cu*

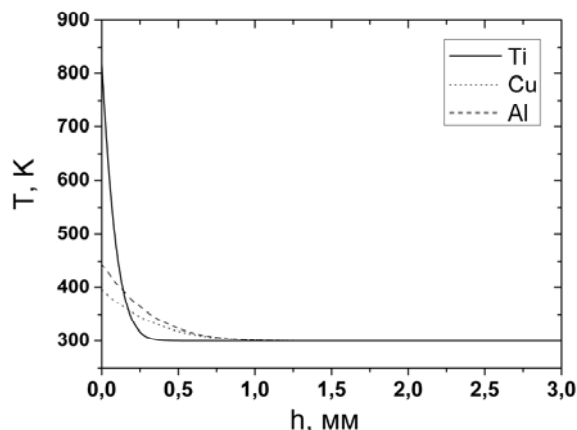


Рис. 6. Распределение температуры по толщине катода ($q = 10^4 \text{ Вт/см}^2$)

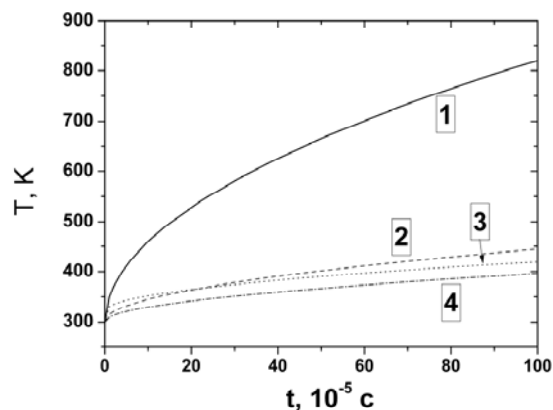


Рис. 7. Зависимость изменения температуры поверхности катода во времени ($q = 10^4 \text{ Вт/см}^2$): 1 – *Ti*, 2 – *Al*, 3 – *Ti-Cu*, 4 – *Cu*

Как видно из рис. 5, температура поверхности титанового катода при одинаковой плотности теплового потока выше в 1,1...2,9 раза, чем для катодов выполненных из *Al*, *Cu* и композитного материала (*Ti*, напыленный на *Cu*). При плотности теплового потока $\sim 4 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$ температура поверхности титанового катода достигает температуры плавления 1939 К. Расчет распределения температуры по тол-

щине катода (см. рис. 6) показывает, что за время 1 мс температура титанового катода увеличивается в области порядка 0,3 мм в отличие от медного и алюминиевого, где эта область составляет до 1 мм. Для композитного катода *Ti-Cu* распределение температуры аналогично медному, за исключением области с более высокой температурой, равной толщине напыленного слоя титана. Увеличение температуры поверхности катода (см. рис. 7) происходит быстрее для монометаллического титанового катода, чем для других материалов. Таким образом, ре-

зультаты расчета подтверждают сделанное ранее предположение о связи теплофизических характеристик используемых катодных материалов и наличия участков с оплавлением катода.

Далее проведем сравнение количества распыленного катодного вещества в единицу времени и на единицу площади в данном эксперименте и на установке ERIC [11] – магнитоплазменном сепараторе. Основные данные, необходимые для такого сравнения, показаны в табл. 2.

Таблица 2

Параметры для сравнения		ERIC [11] Saclay, France	МАКЕТ [5] ННЦ ХФТИ, Украина
Режим распыления		стационарный	импульсный, длительностью ~ 5 мс
Распыляемое вещество		<i>Ni, Cu, Pd, Gd</i>	<i>Ti</i>
Частицы-распылители		Ar^+, Kr^+	Ar^+, Kr^+, Xe^+
Плотность плазмы, см ⁻³		$2 \cdot 10^{10} \dots 10^{12}$	$10^{13} \dots 10^{14}$
Энергия частиц-распылителей, кэВ		2	2,8...3,4 в max распределения
Коэффициент распыления	расчетный	$\left\{ \begin{array}{l} Y_{Ar^+ \rightarrow Gd} = 1,62 \\ Y_{Gd^+ \rightarrow Gd} = 2,85 \end{array} \right.$	$\left. \begin{array}{l} Y_{Ar^+ \rightarrow Ti} \\ Y_{Ti^+ \rightarrow Ti} \end{array} \right\} = 0,8 - 2,2$
	экспериментный	$\left\{ \begin{array}{l} Y_{Ar^+ \rightarrow Gd} = 1,35 \\ Y_{Gd^+ \rightarrow Gd} = 2,65 \end{array} \right.$	$\left. \begin{array}{l} Y_{Ar^+ \rightarrow Ti} \\ Y_{Ti^+ \rightarrow Ti} \end{array} \right\} = 0,26 - 0,6$
	расчетный	$\left. \begin{array}{l} Y_{Ar^+ \rightarrow Pd} \\ Y_{Pd^+ \rightarrow Pd} \end{array} \right\} = 3,3$	
	экспериментный	$\left. \begin{array}{l} Y_{Ar^+ \rightarrow Pd} \\ Y_{Pd^+ \rightarrow Pd} \end{array} \right\} = 3,9$	
Удельные потоки распыляемого вещества, мг/(см ² ·с) (эксперимент)		$Gd \sim 3,3 \cdot 10^{-3}$ $Ni \sim 1,67 \cdot 10^{-3}$	$Ti \sim 2,8 \cdot 10^{-3}$ мг/(см ² ·имп.) или 0,56

Наиболее существенное различие данных, приведенных в табл. 2, по установкам ERIC [11] и МАКЕТ [5] заключается в значениях плотности плазмы (как минимум два порядка величины) и удельных потоков распыляемого вещества (также на два порядка величины, точнее в 335 раз).

Для достижения поставленной цели весьма существенным является анализ состава осадка (конденсата), образовавшегося на приемных пластинах (№1-6) (см. рис. 1-2) в течение проведенной серии импульсов. Исследование состава осадка проводилось с помощью рентгеновского флуоресцентного спектрометра (РФС) типа ElvaX, обеспечивающего неразрушающий элементный анализ материала. Материалом подложки (приемной пластины) служила нержавеющая сталь. Начальный элементный состав приемной пластины, полученный на основании рентгено-флуоресцентного анализа, приведен в табл. 3.

Таблица 3

Элемент	<i>Fe</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mn</i>	<i>Mo</i>
Концентрация, %	70,51	19,22	8	2,07	0,2

На рис. 8 представлена РФ-спектрограмма, полученная при анализе приемной пластины с осажденным слоем (см. рис. 1 и 2) при импульсном корпускулярно-плазменном воздействии на катоды в отра-

жательном разряде. Отличительное различие между данными табл. 3 и РФ-спектрограммы (см. рис. 8) состоит в том, что на спектрограмме зафиксированы новые элементы, которых не было ранее (см. табл. 3).

Элементы *Ti* и *Ar* являются основными компонентами плазмы. Наличие их на РФ-спектрограмме свидетельствует о поперечном относительно продольной оси разрядной камеры и магнитного поля выносе (движении) частиц плазмы и осаждении их на приемных пластинах.

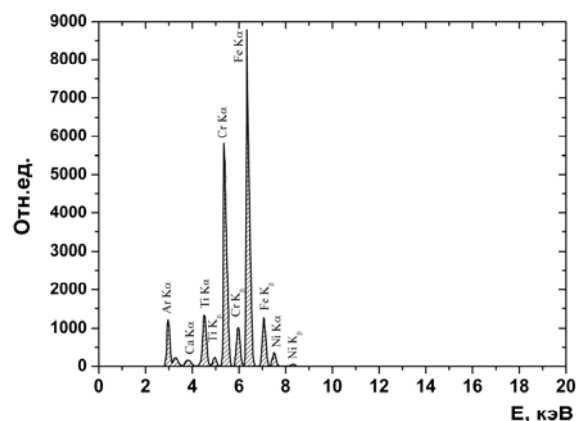


Рис. 8. РФ-спектрограмма облученной приемной пластины

Частицы Ti удерживаются на поверхности пластины за счет процесса конденсации, а частицы Ar – вследствие процессов возможного внедрения в подложку или захвата конденсирующимися частицами металла (Ti). Таким образом, РФ-спектрограмма (см. рис. 8) подтверждает факт о направленном выделении тяжелой компоненты плазмы на поперечных приемных пластинах в результате центробежных эффектов. Грубая оценка количества Ti на приемной пластине дает величину от 5 до 12 %. Количество Ar в подложке незначительно отличается от содержания в ней Ti (на $\leq 10\%$), что практически соответствует первичному составу плазмы $\sim 50\% Ar + 50\% Ti$.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены современные тенденции развития сепарационных исследований и технологий, направленных на создание конкурентоспособных устройств, имеющих производительность не менее производительности устройств, существующих на химических заводах. Проанализированы различные варианты (методы) подготовки и ввода рабочего (разделяемого) вещества в зону разделения. На основании этого сформулирована задача экспериментальных исследований на данном этапе и цель настоящей работы.

2. Показано, что для сепарационных систем на основе отражательного разряда оптимальным вариантом ввода в зону разделения рабочего вещества является вариант, при котором катоды изготавливаются из разделяемого вещества, а дисперсионная среда создается с помощью физического механизма распыления материалов за счет плазменно-корпускулярного взаимодействия с катодной поверхностью.

3. Проведено сравнение величины удельных потоков катодного вещества, поступающих в разряд, при изменении плотности плазмы в широком диапазоне значений $10^{10} \dots 10^{14} \text{ см}^{-3}$. По данным настоящей работы величины удельных потоков в диапазоне плотности плазмы $10^{13} \dots 10^{14} \text{ см}^{-3}$ достигают значений $\leq 0,56 \text{ мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. В то же время по литературным данным [11] на установке ERIC (Франция) эти потоки не превышают значений $\sim 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ мг}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ для Gd и $\sim 1,67 \cdot 10^{-3} \text{ мг}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ для Ni при плотности плазмы $2 \cdot 10^{10} \dots 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

4. В измерительной серии, состоящей из 3446 импульсов, экспериментально зафиксирован прирост массы всех шести приемных пластин, располагающихся продольно по магнитному полю и вдоль внутренней стенки вакуумной (разрядной камеры) в ее центральной части, в среднем на 9,4 мг на одну пластину.

5. Проведено исследование состава осадка на внешней поверхности приемных пластин, обращенного в сторону плазменного столба, с помощью рентгеновского флуоресцентного (РФ) спектрометра типа ElvaX, обеспечивающего неразрушаемый элементный анализ материала. Из сравнения РФ-спектров для необлученной и облученной приемных пластин

установлено, что в осадке на облученной пластине идентифицируются Ar и Ti , которые являются основными компонентами газометаллической плазмы исследуемого отражательного разряда. Это подтверждает факт о направленном выделении тяжелой компоненты плазмы на поперечных приемных пластинах в результате центробежных эффектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.J. Fetterman, N.J. Fisch Plasma mass filters for nuclear waste reprocessing // *Princeton Plasma Physics Laboratory; PPPL-4627*. Princeton, 2011, 8 p.
2. А.И. Карчевский, А.И. Лазько, Ю.А. Муромкин, А.И. Мячиков, В.Г. Пашковский, А.Л. Устинов, А.В. Чепкасов. Исследование разделения изотопов лития в плазме при изотопически селективном ИЦР-нагреве // *Физика плазмы*. 1993, т.19, №3, с. 411-419.
3. Пат. 24729 Україна, МПК (2006) B01D 59/00. Пристрій для розділення речовини на елементи / Є.І. Скібенко, Ю.В. Ковтун, В.Б. Юферов. // *Промислова власність. Офіційний бюлетень*. 2007, №10.
4. Пат. 38780 Україна, МПК (2006) B01D 59/00. Пристрій для розділення речовини на елементи / Є.І. Скібенко, Ю.В. Ковтун, А.І. Скибенко, В.Б. Юферов. // *Промислова власність. Офіційний бюлетень*. 2009, №1.
5. Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, А.И. Скибенко, Ю.В. Ларин, В.Б. Юферов. Описание эксперимента по созданию и разделению газометаллической плазмы импульсного отражательного разряда // *ЖТФ*. 2011, т.81, №5, с. 35-39.
6. Ю.В. Ковтун, А.І. Скибенко, Є.І. Скібенко, Ю.В. Ларін, А.М. Шаповал, Є.Д. Волков, В.Б. Юферов. Дослідження параметрів багатоконпонентної плазми в імпульсному відбивному розряді // *Український фізичний журнал*. 2010, т. 55, №12, с. 1269–1277.
7. Ю.В. Ковтун, А.И. Скибенко, Е.И. Скибенко, А.Н. Шаповал, Е.Д. Волков, В.Б. Юферов. Исследование параметров водородно-титановой плазмы в импульсном отражательном разряде // *Физика плазмы*. 2010, т. 35, № 12, с. 1130-1136.
8. Х. Уонг *Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Справочник / Пер. с англ. / М.: «Атомиздат», 1979. - 216 с.*
9. С.У. Но, R.W. Powell, P.E. Liley Thermal conductivity of the elements: A comprehensive review // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 1974, v. 3, №1, p. 1-796.
10. M.W. Chase, Jr. NIST-JANAF Thermochemical tables // *Journal of Physical and Chemical Reference Data. Monograph № 9*. 1998, p. 1-1951.
11. A Compant La Fontaine, P. Louvet. Study of an ECR sputtering plasma source // *Plasma Sources Science and Technology*. 1999, v. 8, №1, p. 125-135.

Статья поступила в редакцию 21.09.2011 г.

КІЛЬКІСНІ ОЦІНКИ МАСОВИХ ВИТРАТ РОЗПОРОШЕНОЇ І РОЗДІЛЯЄМОЇ РЕЧОВИНИ В ІМПУЛЬСНОМУ ВІДБИВНОМУ РОЗРЯДІ

Ю.В. Ковтун, Є.І. Скібенко, А.І. Скібенко, В.Б. Юферов

На основі експериментальних даних проведено кількісні оцінки масових витрат катодної речовини, яка поступає в розряд за рахунок розпорошення робочих поверхонь катодів під дією іонних потоків створеної газової плазми в імпульсному відбивному розряді зі схрещеними $E \times B$ -полями. Проведена також оцінка масової кількості робочої речовини багатоконпонентної плазми, що створюється в розряді, яка виноситься поперек утримуючого магнітного поля і конденсується на приймальних пластинах, які знаходяться при кімнатній температурі. Одержані дані дозволяють зробити висновок відносно спрямованого виділення важкої компоненти плазми за рахунок відцентрових ефектів.

QUANTITATIVE EVALUATION OF THE MASS RATE OF SPUTTERING AND SEPARATING MATERIAL IN THE PULSED REFLEX DISCHARGE

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

Based on experimental data, qualitative evaluation was made on the mass rate of a cathode material entering into the discharge by the mechanism of work cathode surface sputtering under the action of ion fluxes of pre-formed gas plasma in the pulsed reflex discharge with crossed $E \times B$ -fields. The mass quantity of a working material in the discharge-formed multicomponent plasma, coming out across the confining magnetic field and being condensed on the receiving plates at room temperature has been evaluated. The data obtained enable to draw a conclusion about directed separation of a heavy plasma component due to the centrifugal effects.