

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МАГНИТОПЛАЗМЕННОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ОБЛУЧЕННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

В.О. Ильичева, В.Б. Юферов, О.С. Друй, С.В. Шарый

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

E-mail: v.yuferov@kipt.kharkov.ua

Проведен сравнительный анализ плазменных сепарационных устройств, использующих системы с вращающейся в скрещенных $E \times B$ полях плазмой и системы с внешними ВЧ-полями, для разделения отработанного ядерного топлива; рассмотрены преимущества и недостатки.

В Украине около 50 % электроэнергии вырабатывается на АЭС, и в рамках топливного ядерного цикла существует множество проблем, связанных с разделением разных продуктов: выделение малых добавок гафния из циркония, извлечение рассеянных металлов из руд, обогащение регенерированного урана, получение выгорающих добавок к топливу реакторов и др. Актуальной проблемой остается утилизация отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Решить проблему постоянного накопления ОЯТ можно путем его регенерации, для чего требуется разделить ОЯТ на тяжелую фракцию: ядерное топливо (ЯТ) – актиноиды, и легкую фракцию – ядерную золу (ЯЗ) (Рис.1), то есть основная часть урана и плутония извлекается и используется как ЯТ [1].

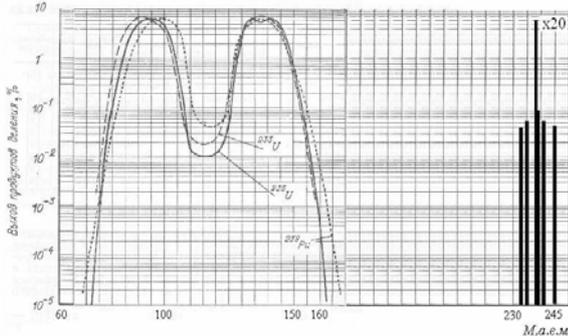


Рис.1. ЯТ и продукты его деления

Радиохимические методы переработки ОЯТ связаны с образованием большого количества радиоактивных отходов, а при использовании физических методов сепарации, в частности, электромагнитного, масса радиоактивных отходов не возрастает. Однако, традиционные электромагнитные масс-сепараторы энергоемки и малопроизводительны, тогда как для переработки 300 т ОЯТ, образующихся в Украине за год, необходим ионный ток на уровне 4,2 кА. Поэтому возникла необходимость создания масс-сепараторов нового поколения. В этих системах непосредственно в многокомпонентной плазме нужно селективно ускорять требуемые ионы, формировать потоки и собирать их, отделяя от остальной ионной компоненты также в плазме. Реализация этой магнитоплазменной технологии может проводиться в устройствах двух типов:

-масс-сепараторы, использующие метод ионно-циклотронного резонанса, основанные на селективном нагреве резонансных ионов с помощью ВЧ-

излучения от внешних генераторов (упрощенно ИЦР-сепараторы);

-масс-сепараторы с вращающейся в скрещенных $E \times B$ полях плазмой, в которых при определенном соотношении величин E и B происходит сепарация ионов заданных масс (упрощенно $E \times B$ -сепараторы).

В работе [2] проводилось сравнение обоих типов сепарационных устройств, однако, речь не шла об их применении для регенерации ОЯТ. В работах [3,4] представлены проекты плазменных сепараторов обоих типов для переработки ОЯТ, где в ИЦР- и $E \times B$ -сепараторах производится сепарация ионов ЯЗ и ЯТ соответственно. В работе [5] представлена экспериментальная установка "ДИС" для имитационного разделения ОЯТ, позволяющая осуществить оба типа сепарации. Используя эти данные, проведем сравнение обоих типов сепарационных устройств для исследования регенерации ОЯТ с использованием имитационных сред (ИС). В настоящее время на установке "ДИС" ведутся исследования $E \times B$ -сепаратора. На Рис.2 представлен схематический вид установки.

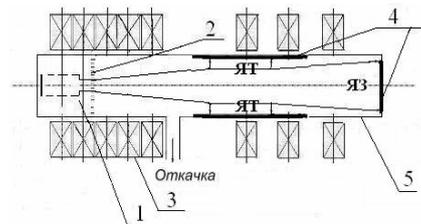


Рис.2. Схематический вид установки "ДИС-1":
1 – плазменный источник; 2 – коаксиальная система электродов создания радиального электрического поля; 3 – магнитная система продольного магнитного поля; 4 – торцевой и продольный коллекторы; 5 – вакуумная камера и система диагностики

Одной из основных частей плазменных сепараторов является магнитная система, в которой образуется замагниченная плазма и осуществляется сепарация масс. Установка работает в режиме фильтра масс, то есть на оси задан положительный потенциал. Принципы сепарации ионов различных масс описаны в работах [6,7], где рассмотрены две версии, одна из которых отражает одночастичное движение ионов в плазме, а другая – коллективные процессы. Оба подхода базируются на соотношении: $\omega_{ci} = 2\omega_E$, которое определяет условия разделения ионов разных масс во вращающейся плазме (ω_E – угловая частота вращения

плазмы, ω_{ci} – циклотронная частота вращения ионов заданной массы M_i). Исходя из этого, рассматривается процесс масс-сепарации при транспортировке плазменного потока в спадающем магнитном поле. В этом случае поток плазмы постоянный, а в нарастающем поле доля отраженных частиц увеличивается. При $E_r = \text{const}$ в убывающем магнитном поле ω_E растет, а ω_{ci} убывает. При $\omega_{ci} = 2\omega_E$ в плазме наблюдается процесс выделения ионов с массой M_i и формирование их в потоки. Такие условия называют резонансными, и им соответствуют определенные значения электрического (E_{rc}) и магнитного (B_{zc}) полей. В этих условиях происходит нагрев селективных ионов и их пространственная сепарация [8]. Из Рис.3,а,б видно, что при движении плазмы в спадающем магнитном поле резонансные условия для различных компонент реализуются при различных магнитных полях, и резонанс наблюдается, в первую очередь, для тяжелых компонент плазмы.

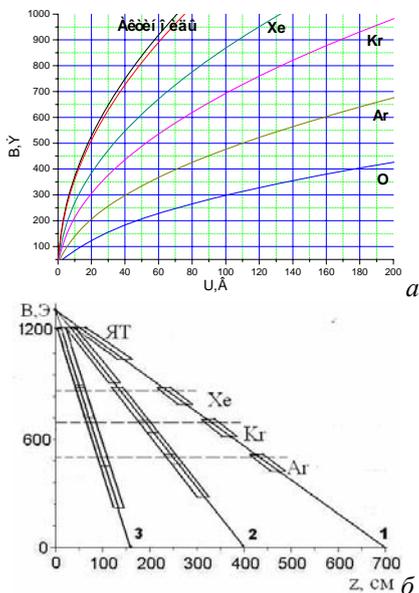


Рис.3. Резонансные зависимости для ионов ЯТ и ИС(а); области выделения ионов ЯТ и ИС в зависимости от длины сепаратора (б)

Пороговая масса M_c , разделяющая частицы на два сорта согласно [7], определялась как

$$M_c = e r_k (B_{zc})^2 / (4c^2 E_{rc}). \quad (1)$$

Когда масса M заряженной частицы больше, чем пороговое значение ($M > M_c$), частица находится на нелокализованных траекториях и движется поперек магнитного поля в радиальном направлении наружу, набирая энергию, равную разности потенциалов, тогда как частицы более легких масс будут располагаться на локализованных орбитах, двигаясь вдоль магнитного поля, оставаясь холодными, и могут быть собраны на выходе устройства. Таким образом, при выборе параметров E , B , R , процесс разделения проводится для различных масс. Применительно к регенерации ОЯТ величина $M_c = 230$ а.е.м., и тяжелыми массами с $M \geq M_c$ является группа актиноидов (ЯТ), а легкой компонентой с $M < M_c$ – ядерная зола (ЯЗ).

На начальной стадии целесообразны исследования с имитаторами ядерного материала. Выбор ИС среды производился исходя из соотношения масс

элементов, образующихся в ТВЭЛе после выгорания ЯТ. Продукты деления имеют максимумы в диапазоне массовых чисел: $M_{1\text{max}} \approx 85 \dots 90$, $M_{2\text{max}} \approx 120 \dots 130$, где $M_{1\text{max}} + M_{2\text{max}} \approx M_U$, $M_U = 240$. Компоненты ИС могут быть определены с использованием коэффициентов подобия: $k_1 + k_2 = 1$, где $k_1 = M_{1\text{max}}/M_U$, $k_2 = M_{2\text{max}}/M_U$. Исходя из этого, в качестве имитационной среды была выбрана газовая, Хе- Кг- Аг-плазма, имитирующая ОЯТ в плазменном состоянии. Для разделения ИС на две фракции: тяжелую, имитирующую ЯТ (ионы ксенона), и легкую, имитирующую ЯЗ (ионы криптона и аргона), задается $M_c \approx M_{\text{Xe}}$.

Требуемые величины магнитных полей определялись исходя из того, что в замагниченной плазме ($\omega_{ci} \tau_{ci} \gg 1$, где τ_{ci} – время между двумя ион-электронными столкновениями) ларморовские радиусы всех компонент холодной плазмы r_{ci} много меньше размеров установки ($r_k \approx r_p \gg r_{ci}$, где r_p – радиус плазменного потока, r_k – радиус вакуумной камеры), в то время как для резонансных ионов ЯТ $r_k \approx r_p \approx r_{ci}$. Исходя из этого, для выделения актиноидов из ОЯТ в ЕХВ-сепараторах требуются величины магнитных полей $\sim 0,1$ Тл, а для ИС с меньшими массовыми числами – меньшие магнитные поля (Рис.4,а,б). Конфигурация магнитного поля задавалась с учетом динамики частиц плазмы.

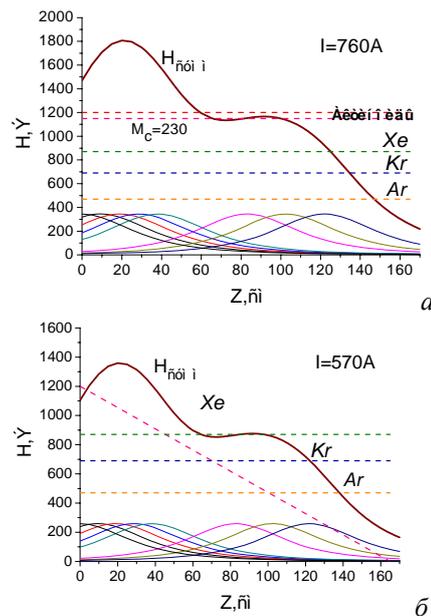


Рис.4. Аксиальное распределение магнитного поля для выделения группы актиноидов (а); для выделения ксенона (б)

Значению B_{zc} соответствует продольный участок однородного магнитного поля $B(Z) = B_{zc}$, где обеспечиваются резонансные условия для ионов с массой $M_c \approx M_{\text{Xe}}$, в результате чего происходит пространственное отделение ионов ксенона из потока многокомпонентной плазмы и движение их в заданную локальную область на боковой стенке вакуумной камеры при $r_{ci} = r_k$. Длина области сбора селективных ионов в зависимости от местоположения иона в слое плазмы (по радиусу и по фазе) может составлять: $L < 2\pi r_{ci}(r_p/r_{ci})$ или $L \leq 3r_p$. Для ионов криптона и аргона ($M < M_{\text{Xe}}$) резонансные условия не выполняются, и они продолжают движение в спадающем магнитном

поле на торцевой коллектор. Таким образом, локализуется область выхода ионов Хе, что позволяет отделить их от ионов Кг и Аг на ограниченной длине установки.

Однако, при работе с газовой ИС при неполной ионизации газа в плазменном источнике (степень ионизации ~15 %) в процессах сепарации и транспортировки растет роль ион-нейтральных столкновений за счет процесса рециклирования. Исходя из этого, целесообразен переход к газометаллическим ИС с коэффициентом рециклирования $\rightarrow 0$. Например, возможно подобрать металлы с потенциалом ионизации: W ~7,98 В, Мо ~7,1 В, Fe ~7,9 В, которые будут имитировать актиноиды (^{182}W) и два пика продуктов распада ЯТ (^{95}Mo и ^{64}Cu , или ^{55}Fe). Этот состав по потенциалам ионизации отличается от актиноидов, где у основного (по концентрации) элемента потенциал ионизации составляет ~6 В.

Поэтому была выбрана газометаллическая смесь: Ca, Cl, Na, Li, O_2 , в которой компоненты, кроме подобия по массам, выбирались по близости потенциалов ионизации ЯТ, подобию свойств образующих окислов и процессов рециклирования кислорода. Использование щелочных металлов целесообразно из-за близости их потенциалов ионизации к потенциалам ионизации урана (не только первого ~6 В, но и второго ~12 В). Поскольку двукратно ионизованный продукт удаляется с примесями, температура электронов должна быть значительно меньше 12 эВ, то есть около 3...5 эВ. В плазме преимущественно ионизируются металлы, в то время как кислород находится в атомарно-молекулярном состоянии.

При ионно-плазменном осаждении щелочных металлов и наличии остаточных газов имеется сравнительно слабая связь конденсируемого слоя с материалом подложки, что может привести к значительному самораспылению, а потому и к определенному расплыванию слоя за заданную область осаждения за счет "распылительного рециклинга". Потому ионно-плазменное осаждение требует понижения энергии осаждающихся ионов, что может быть получено путем подачи замедляющего положительного потенциала на поверхность осаждения. Основной составляющей остаточной атмосферы является атомарный кислород, количество которого превышает количество атомов кальция. Поэтому процесс окисления кальция будет происходить одновременно с процессом его осаждения, аналогично процессу окисления уранового топлива, где кислород в газовой фазе будет образовывать двуокись урана прямо на стенках. С практической точки зрения, целесообразно тратить на удаление пленок – конденсатов, минимальную энергию, поэтому необходимо, чтобы слои кальция имели порошкообразную консистенцию и слабую адгезию с поверхностью. В этом случае окислы кальция могут быть легко удалены с поверхности камеры для дальнейшего использования.

Путем некоторых изменений в конструкции установки "ДИС-1" (Рис.5,а) её можно перевести в разряд ИЦР-сепараторов (Рис.5,в).

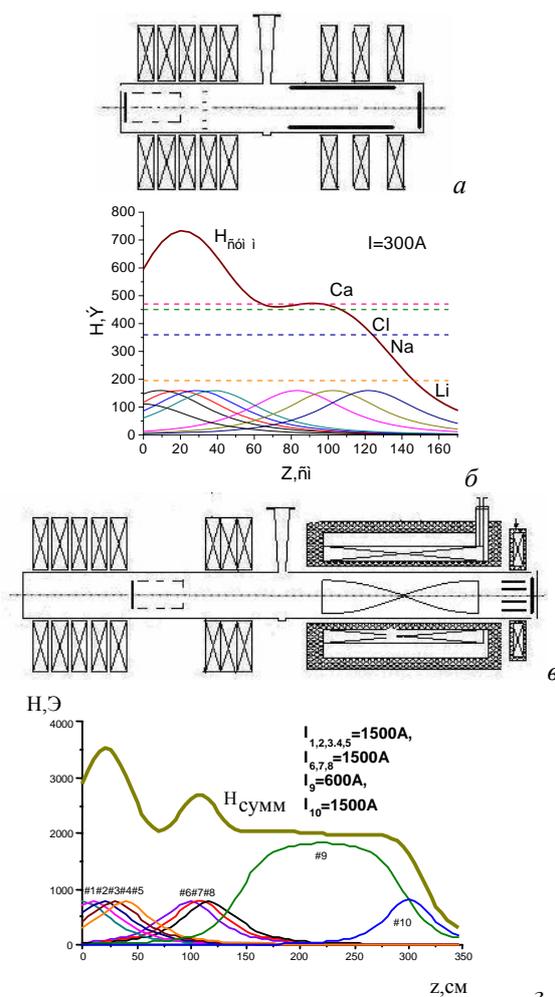


Рис.5. Схема конструкции и аксиальное распределение магнитного поля: для E×B-сепаратора "ДИС" (а,б); для ИЦР-сепаратора "ДИС" (в,г)

Для ИЦР-разделения ОЯТ величины $\Delta M/M \approx 10^{-1}$, поэтому такие условия возможны для неоднородных магнитных полей и широкополосных ВЧ-генераторов [9]. По этим параметрам эксперименты по сепарации ^7Li и ^6Li ИЦР-методом [10] можно отнести к имитационному разделению ОЯТ. В работе [11] приведен расчет параметров магнитной системы ИЦР-сепаратора легких масс (в частности, для разделения изотопов лития). Для разделения с помощью ИЦР-метода широкого спектра масс, имеющихся в ОЯТ, необходимы магнитные поля на уровне 2...3 Тл, что возможно при использовании сверхпроводящей (СП) обмотки. В [12] описана конструкция СП магнитной системы сепаратора изотопов широкого диапазона масс, имеющего распределение магнитного поля, подобное для ИЦР-разделения легких масс (Рис.5,г) с "пробочной" конфигурацией магнитного поля в области плазменного источника. Длина магнитной системы ИЦР-сепаратора составляет ~3 м, что почти в два раза превышает длину E×B-сепаратора "ДИС-1".

Способ образования плазмы в сепараторах обоих типов одинаков, и оба типа сепараторов должны работать в условиях бесстолкновительной замагниченной плазмы. Условие бесстолкновительности для обеих систем выполняется при различных длинах свободного пробега (λ_{ei}). Для ИЦР-сепаратора бесстолкнови-

тельность плазмы должна осуществляться на длине ускорения резонансных ионов L :

$$\lambda_{ei} = L \approx \pi d_{cp} N + L_{одн}, \quad (2)$$

где πd_{cp} – средняя длина ларморовской окружности, N – число оборотов при ускорении иона, $L_{одн}$ – длина однородного участка магнитного поля, в котором происходит ИЦР-нагрев иона.

При одинаковой производительности, зависящей от n, v, S , возможно провести сравнение магнитных и плазменных характеристик ИЦР- и Е×В-сепараторов. Для Е×В-сепаратора бесстолкновительность должна иметь место в области радиального движения селективного иона и выхода его на боковую поверхность. Здесь $\lambda_{ei} \leq 2r_k$, что в 3-5 раз меньше длины свободного пробега ионов в ИЦР-сепараторе. Благодаря этому условию величина плотности плазмы для Е×В-сепараторов оказывается выше, так как:

$$\lambda_e = 3 \cdot 10^4 T_e^2 / n, \quad (3)$$

где T_e – температура электронов в плазме, n – плотность плазмы.

Однако для этого типа систем ограничение связано с температурой коаксиальных электродов, создающих радиальное электрическое поле. При положительном потенциале на электродах, последние интенсивно нагреваются электронами плазмы.

Производительность сепараторов [12] обоих типов определяется параметрами n и S , которые можно существенно изменять, в отличие от параметра V_{II} , который имеет ограничение, связанное с образованием двухзарядных ионов U^{2+} , уходящих с

примесями.

Оценка производительности сепаратора "ДИС-1" для различных масс приведена в Табл.1.

Таблица 1

Расчетная производительность установки "ДИС-1"
($v \approx 10^5$ см/с, $n_i \approx 10^{11}$ см⁻³, $S \approx 10^3$ см²)

| М, а.е.м. | ~6 (литий) | ~23 (натрий) | ~36 (хлор) | ~40 (кальций) |
|------------|----------------|------------------|------------------|-----------------------------|
| М (кг/год) | 21,5 | 42 | 53 | 55,5 |
| М, а.е.м. | ~40 (аргон) | ~83 (криптон) | ~132 (ксенон) | ~240 (уран, плутоний) |
| m (кг/год) | 55,5 | 80,5 | 101,5 | 137 |

Поскольку длина свободного пробега ионов в Е×В-сепараторе в 3-5 раз меньше, чем длина свободного пробега ионов в ИЦР-сепараторе, то и величина плотности плазмы в ИЦР-сепараторе будет, соответственно, во столько же раз меньше. Поэтому равенство производительности обоих типов сепараторов может быть получено при увеличении величины S , то есть при увеличении диаметра плазменной камеры ИЦР-сепаратора, а значит, и материалоемкости системы в целом.

В Табл.2 приведены параметры исследовательских магнитоплазменных сепарационных установок, разработанных в ННЦ ХФТИ, использующие для создания плазмы дуговой и ВЧ-разряды. Плазменно-лучевой разряд не рассматривается.

Таблица 2

Научно-исследовательские установки

| Экспериментальные установки | ДИС-1 2006 | ДИС-1-ИЦР 2005 | ДИС-2-СП 2012 |
|--|--|----------------------------------|---|
| Назначение установки | разделение | обогащение, разделение | разделение |
| Статус установки | действующая | концептуальный проект | концептуальный проект |
| размеры, L – длина, r_p – радиус плазмы | L – 1,65 м, $2r_p$ – 38 см | L – 3,2 м, $2r_p$ – 38 см | L – 3,2 м, $2r_p$ – 50 см |
| магнитная система H , кЭ | тепловая $\leq 2,0$ | комбинированная $\sim 6,0$ | сверхпроводящая 30...50 |
| Однородность: $\Delta H/H$ | 8×10^{-2} | 2×10^{-2} | 5×10^{-3} |
| Способ создания плазмы | дуговой и ВЧ-разряды | дуговой и ВЧ-разряды | дуговой и ВЧ-разряды |
| Диапазон частот, Гц | $< 1 \cdot 10^5$ | $(1...3,75) \cdot 10^5$ | $(3...6,6) \cdot 10^5$ |
| Плотность, см ⁻³ | $10^{10}...10^{12}$ | $10^{10}...10^{11}$ | 10^{11} |
| Температура, эВ | 3...10 | 1...5 | 3...10 |
| Удельные затраты на ионизацию/нагрев, эВ | $\geq 500/100$ | 500/100 | $\geq 500/100$ |
| Рабочее вещество | Хе, Кг, Аг, СО ₂ Са, Na, Li, Cl, C, O ₂ | ⁶ Li, ⁷ Li | Ca, Na, Li, Cl, C, O ₂ , Cr, Zn, ¹²² Ba, ¹⁵⁷ Gd |

При сравнении основных характеристик экспериментальных сепараторов обоих типов можно отметить их преимущества и недостатки, которые сохраняются для реализации магнитоплазменной регенерации ОЯТ:

1. Способы получения плазмы и параметры плазмы идентичны: замагниченная низкотемпературная (3...5 эВ) плазма в бесстолкновительном режиме.

2. В Е×В-сепараторах греются ионы ЯТ (~90 % ОЯТ), а в ИЦР-сепараторах греются ионы ЯЗ (~10 % ОЯТ).

3. Уровень полей для разделения тяжелых масс в ИЦР-сепараторах ≤ 3 Тл; в Е×В-сепараторах $\leq 0,15$ Тл.

4. Длина ИЦР-сепаратора (~3 м) превосходит длину Е×В-сепаратора (~2 м), что требует уменьшения плотности плазмы для выполнения условия бесстолкновительности плазмы.

5. Плотность плазмы в Е×В-сепараторах $\sim 10^{12}$ см⁻³ и ограничена величиной тепловыделения на электродах. Плотность плазмы в ИЦР-сепараторах $\sim 10^{11}$ см⁻³ и ограничена выполнением условия бесстолкновительности плазмы.

6. Для повышения производительности ИЦР-сепаратора необходимо увеличивать сечение и, следовательно, габариты установки, а значит, увеличивается материалоемкость и стоимость сепаратора.

7. Для ИЦР-сепаратора со СП-обмоткой требуется радиационная защита магнитной системы, что требует дополнительных затрат.

Величины энергозатрат 500 эВ на ион-электронную пару [4] и получаемые отсюда 56 кВт·ч/кг уранового топлива являются минимальными. Для плазмы ОЯТ с 5...8 % ионов средних масс и 4...5 % ионов малых актиноидов, энергозатраты, связанные с излучательной мощностью при низких температурах электронов, могут существенно отличаться.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И.М. Неклюдов и др. *Ядерная энергетика. Обращение с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами*. Киев: «Наукова думка», 2006, 253 с.
2. А.Н. Довбня, О.С. Друй, А.М. Егоров, В.О. Ильичева, В.И. Лапшин, М.В. Сосипатров, О.М. Швеиц, В.Б. Юферов, Д.В. Винников, Ю.В. Ковтун. Сравнительный анализ проектов плазменных сепараторов изотопов с внешними и внутренними самовозбуждающимися колебаниями на циклотронных частотах // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2004, №4, с.51-57.
3. A. Litvak, S. Agnew, F. Anderegg, et al. Archimedes Plasma Mass Filter // *30-th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys.* St. Petersburg (Russia). 2003, v.27A, O-1.6A.
4. В.А. Жильцов, В.М. Кулыгин, Н.Н. Семашко и др. Применение методов плазменной сепарации элементов к обращению с ядерными материалами // *Атомная энергия*. 2006, т.101, №4, с.411-419.
5. A.M. Yegorov, V.B. Yuferov, S.V. Shariy, V.A. Seroshtanov, O.S. Druy, E.V. Ribas, V.V. Yegorenkov, S.N. Khizhnyak, D.V. Vinnikov. Preliminary study of the demo plasma separator // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Physics»*. 2009, №1(59), с.122-124.
6. Патент RU 2229924 С2. Плазменный фильтр масс и способ отделения частиц малой массы от частиц большой массы / Охкава Тихиро // *Открытия. Изобретения*. 2001.
7. 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 развитой резонансной ионной циклотронной неустойчивости // *Письма ЖЭТФ*. 1978, т.27, в.5, с.264-267.
8. Патент №714997. Способ разделения по массам смесей изотопов, элементов и соединений, находящихся в плазменном состоянии / В.В. Власов, И.И. Залюбовский, М.Г. Кривонос, А.М. Рожков, М.В. Сосипатров, К.Н. Степанов, В.И. Фареник // *Открытия. Изобретения*. 1979.
9. А.В. Тимофеев. О переработке отработанного ядерного топлива плазменным методом // *Физика плазмы*. 2007, т.33, №11, с.921-927.
10. Ю.А. Муромкин. Разделение изотопов в плазме с помощью ионно-циклотронного нагрева // *Итоги науки и техники. Физика плазмы*. 1991, т.12, с.83.
11. V.O. Ilchova, O.S. Druj, V.B. Yuferov, S.V. Sharij. Development of The Superconducting Magnetic System of Plasma Mass-Separator // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations»*. 2006, №2 (46), с.110-112.
12. В.Б. Юферов, А.М. Егоров, С.В. Шарый, О.С. Друй, В.О. Ильичева, М.О. Швеиц, Т.И. Ткачева, А.С. Свичкарь, С.Н. Хижняк. Магнитоплазменная регенерация ОЯТ // *Вестник «НТУ ХПИ»*. 2010, №55, с.129-149.

Статья поступила в редакцию 06.04.2012 г.

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF SEPARATORS FOR MAGNETOPLASMA REGENERATION OF IRRADIATED NUCLEAR FUEL

V.O. Ilchova, V.B. Yuferov, O.S. Druy, S.V. Shariy

Comparison of plasma separators which use the systems with rotated in crossed electric and magnetic fields plasma and the systems with external HF-fields is performed for the purpose of spent nuclear fuel separation; the advantages and limitations are considered.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СЕПАРАЦІЙНОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ МАГНІТОПЛАЗМОВОЇ РЕГЕНЕРАЦІЇ ОПРОМІНЕНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

V.O. Ільчова, В.Б. Юферов, О.С. Друй, С.В. Шарий

Проведено порівняльний аналіз плазмових сепараційних пристроїв, які використовують системи з плазмою, що обертається в схрещених Е×В полях, та системи із зовнішніми ВЧ-полями, для розділення відпрацьованого ядерного палива; розглянуті переваги та недоліки.