

## О ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИИ ИОННЫХ ПОТОКОВ В ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО МАГНИТОПЛАЗМЕННОЙ СЕПАРАЦИИ

*В.Б. Юферов, А.С. Свичкарь, С.В. Шарый, Т.И. Ткачева, В.О. Ильичева, В.В. Катречко,  
А.И. Шаповал, С.Н. Хижняк*

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

*E-mail: v.yuferov@kift.kharkov.ua*

Рассмотрена третья стадия переработки ОЯТ магнитоплазменным методом с использованием имитационных сред. Представлены траектории движения селективных ионов в одночастичном приближении. Представлена схема сепаратора ОЯТ.

В работе [1] были предложены четыре стадии магнитоплазменной переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ), на которых возможно последовательно разделять ядерное топливо (ЯТ) и продукты деления (ПД). В данной работе более подробно рассмотрены результаты экспериментов, относящиеся к третьей стадии переработки ОЯТ, где в качестве рабочего вещества использовалась плазменная среда, имитирующая ОЯТ.

Для имитации магнитоплазменного разделения ОЯТ в ННЦ ХФТИ был разработан и создан демонстрационно-имитационный сепаратор ДИС-1 [2], использующий принцип разделения тяжелых и легких фракций ионов во вращающейся плазме с положительным потенциалом на оси цилиндрической системы с продольным магнитным и радиальным электрическим полями (система  $E \times B$ ).

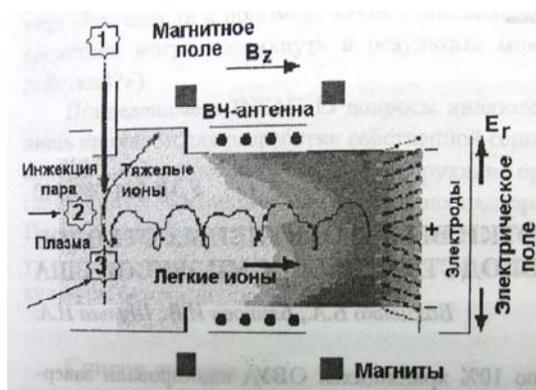
Подобный метод разделения тяжелой и легкой фракций ионов был предложен в [3, 4] при создании масс-фильтра «Архимед», где предполагалось, что газопаровая струя ОЯТ инжектируется радиально в центральной плоскости магнитной системы с «колоколообразной» конфигурацией магнитного поля. В области его максимума она при помощи 4 МВт ВЧ-генератора переводится в плазму и вращается в  $E \times B$ -полях. При этом «тяжелые» ионы ЯТ должны уходить на стенку вакуумной камеры, а «легкие» ионы ядерной золы (ЯЗ) движутся по силовым линиям магнитного поля на приемные пластины в торце системы (рис. 1). Такой характер движения частиц различных масс определялся в одночастичном приближении соотношением:

$$M_c = e r_k (H_c)^2 / (4c^2 E_{rc}), \quad (1)$$

где  $M_c$  – пороговая масса, разделения частиц на два сорта:  $M > M_c$  и  $M \leq M_c$  [4]. Более подробно сценарий эксперимента и его результаты приведены в [2, 5, 6].

В масс-фильтре «Архимед» (см. рис. 1) области создания плазмы и сепарации совмещены. В таких условиях при плотности плазмы  $\sim 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и диаметре установки 0,8 м нельзя осуществить 100 % ионизацию рабочего вещества и его разделение. Пары ЯТ и ЯЗ будут осаждаться на

боковой стенке камеры совместно, т. е. процесс разделения не будет одноступенчатым.



*Рис. 1. Схема плазменного масс-фильтра «Архимед» (правая часть установки аналогична левой):  
1 – инжекция материалов в вакуумную камеру;  
2 – нагрев плазмы ВЧ-источником и разделение ионов в  $E \times B$ -полях; 3 – перемещение «тяжелых» ионов к коллекторам на стенки камеры, а «легких» – к электродам [7]*

Существенным моментом являлся выбор имитационных сред. В [3] выбор аргоновой плазмы в качестве материала-имитатора и задание рабочих величин магнитного поля в 1,5 кЭ требует для обеспечения процесса сепарации больших величин электрического поля  $E_r$ , что, как показано в работе [6], приводит к тепловым проблемам на электродах, создающих радиальное электрическое поле. Кроме того, для выделения тяжелых компонентов требуются меньшие магнитные и электрические поля [6]. Для селективных ионов согласно (1) рассчитаны соотношения продольного магнитного и радиального электрического полей, обеспечивающие их сепарацию (рис. 2).

С учетом вышесказанного конструкция установки ДИС-1 имеет ряд особенностей, обеспечивающих протекание процессов ионизации, формирования потока многокомпонентной плазмы, селективного нагрева групп ионов в заданном диапазоне масс и их пространственного отделения от ионов других сортов [6].

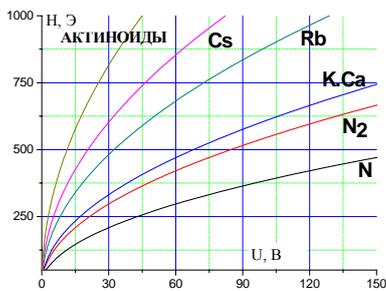


Рис. 2. Резонансные условия для выделения актиноидов и компонентов имитационных сред

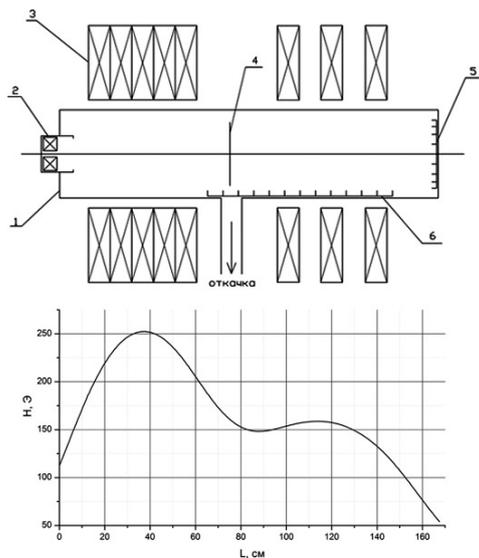


Рис. 3. Схематический вид установки ДИС-1: 1 – вакуумная камера ( $D = 0,38$  м,  $L = 1,65$  м); 2 – плазменный источник (эквивалентный ток 2 А); 3 – магнитная система; 4 – коаксиальная система электродов радиального электрического поля; 5 – торцевой коллектор; 6 – продольный коллектор

Из рис. 3 видно, что в конструкции установки ДИС-1 источник плазмы удален от области осаждения сепарируемого продукта путем создания области дрейфа плазмы вдоль магнитного поля. Особенностью установки является также создание определенной конфигурации магнитного поля. Ранее в большинстве работ [3, 4, 7] не выдвигались особые требования к конфигурации магнитного поля, и использовалась конфигурация магнитного поля с почти однородным участком в центральной области, симметрично убывающая по сторонам. В установке «Архимед» такая конфигурация должна увеличивать производительность сепарации вдвое. Для установки ДИС-1, решающей задачу разработки принципов разделения, была выбрана конфигурация магнитного поля с учетом того, что плазменный источник должен создавать плазму с максимальным коэффициентом перевода ОЯТ в ионы и минимальным осаждением его на стенках (пока это не сделано, поскольку требует значительных затрат). Плазменный источник (ПИ) должен создавать достаточно высокую плотность плазмы для получения максимальной производительности при ее бесстолкновительности

в области разделения [5]. Это выгодно отличает разделительные установки с вращающейся в  $E \times B$ -полях плазмой от ИЦР-установок, в которых бесстолкновительность плазмы требуется на всей длине ускоряющей части:  $L \gg R_{\pi}$  ( $R_{\pi}$  – радиус плазмы), тогда как в сепараторах с вращающейся в  $E \times B$ -полях плазмой  $L \approx R_{\pi}$ . Выбор величины магнитного поля  $H$  определяется необходимостью получения замагниченной плазмы с ларморовским радиусом ионов  $R_{\perp} \ll R_{\pi}$  для выбранной имитационной среды в области транспортировки плазмы от ПИ к области разделения и немагнитности выделяемых ионов в области разделения, где ларморовский радиус выделяемых ионов  $R_{\perp} \approx R_k$  ( $R_k$  – радиус вакуумной камеры), т. е. селективные ионы выходят на стенки вакуумной камеры.

Для бесстолкновительного случая на рис. 4 показаны проекции траекторий селективных ионов для сечений 1–4 в одночастичном приближении. В сечении 4 ожидается выход ионов на боковую стенку.

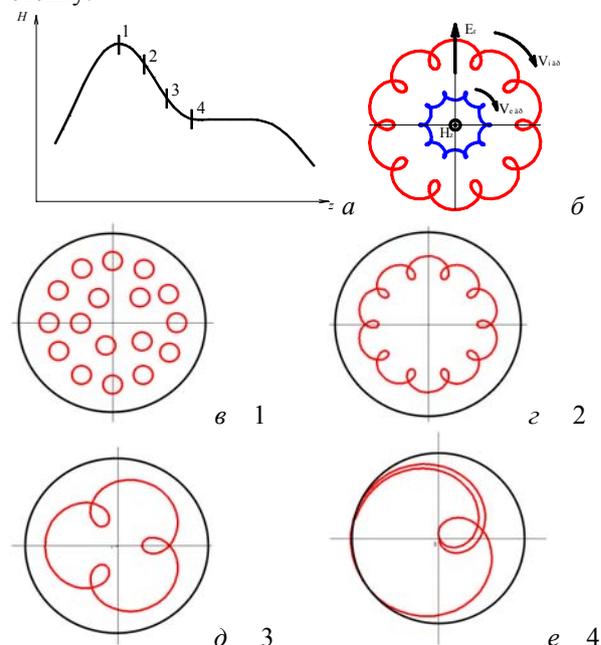


Рис. 4. Схематические распределения аксиального магнитного поля установки ДИС-1 (а); движение электронов (б); параметры траекторий селективных ионов в поперечных сечениях 1–4 (в, г, д, е)

В [6] указывалось, что во вращающейся плазме возможно выведение любого элемента при выборе величин  $E$  и  $B$ . Поэтому была выбрана плазма из азота  $N_2$ , что снизило величину  $B$  (см. рис. 2).

Динамика потоков молекулярных ионов  $N_2^+$  на продольные и торцевые коллекторы при монотонном изменении радиального электрического поля до величин, больших  $E_{кр}$  ( $B_{\perp} = \text{const}$ ), представлена на рис. 5. Наблюдается два режима работы установки ДИС-1. В ходе эксперимента плазменный источник (плазменный столб) находился под положительным потенциалом.

В первом режиме (см. рис. 5,а), при достижении резонансных условий, происходит перераспределение потоков ионов  $N_2^+$ ; после резонансных условий наблюдается увеличение их выхода в радиальном направлении на стенки камеры в определенных ее поперечных сечениях (определенных величинах  $V_{\perp}$ ). Данный режим является промежуточным при переходе на второй режим работы и сопровождается значительными колебаниями давления в ходе эксперимента.

Во втором режиме (см. рис. 5,б) при достижении резонансных условий происходит перераспределение потоков ионов, после резонансных условий наблюдается увеличение их выхода в осевом направлении. В данном режиме колебаний давления в ходе эксперимента замечено не было.

При достижении резонансных условий как в первом, так и во втором режимах работы установки ДИС-1 наблюдается сохранение токового баланса в разряде, т. е. изменение ионного тока на торцевом коллекторе равно изменению ионного тока на продольном коллекторе.

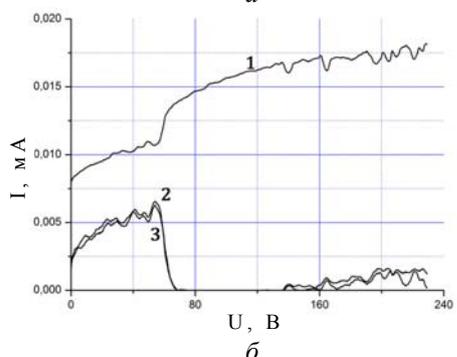
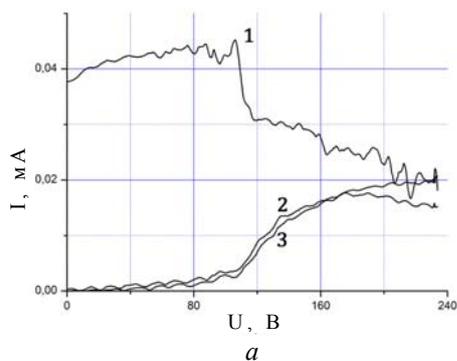


Рис. 5. Изменение токов, регистрируемых на торцевом (1) и продольном коллекторах (2, 3) (две первых ламели продольного коллектора), при изменении величины  $E_r$  ( $H_{\perp} = const$ ):  
а – первый режим;  
б – второй режим работы установки

Таким образом, если исходить из результатов рис. 5,а, в конструкции разделительной установки должно быть учтено следующее. Поток паров ОЯТ на стенки отсутствует, т.е. близок к полной ионизации при плотностях около  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и толщине плазмы  $\sim 10 \dots 15 \text{ см}$ . В то же время на последнем участке движения частиц бесстолкновительность плазмы должна быть на участке радиального выхода резонансных ионов,

поэтому в этой области плотность плазмы может быть на уровне  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

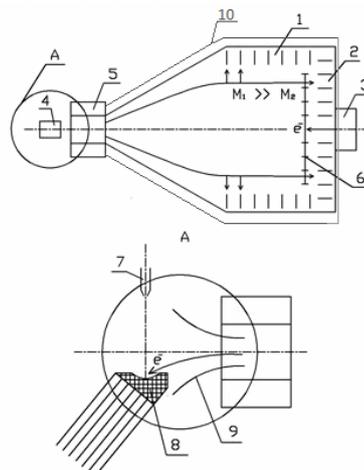


Рис. 6. Схема сепаратора для ОЯТ: 1 – вакуумная камера и продольные коллекторы; 2 – торцевые коллекторы; 3 – электронная пушка; 4 – приемник пучка-испарителя твэлов; 5 – магнитная система ПИ с полем около 3 Тл; 6 – система радиального электрического поля  $E$ ; 7 – сопло для порошкового ОЯТ; 8 – тигель плавления ОЯТ и подача твэлов (2-й вариант); 9 – силовые линии магнитного поля; 10 – магнитное поле сепаратора величиной  $\approx 0,1 \text{ Тл}$

Как видно из рис. 6, плазма, вышедшая из ПИ, расширяется до цилиндрической области, где может возникнуть непрерывное ускорение резонансных ионов электрическим полем и их выход на стенку согласно рис. 5,б. Электронный пучок из пушки (почти параксиальный) испаряет ОЯТ (либо в виде порошка, либо в виде стержня). Условие сохранения магнитного потока ( $H_1 S_1 = H_2 S_2$ ,  $n_1 v_1 S_1 = n_2 v_2 S_2$ ) определяет соотношение плотностей плазмы в области ПИ и в области сепарации.

Дополнительное условие для ограничения плотности плазмы  $n_e$  вытекает из необходимости исключить в процессе нагрева деселектирующее влияние столкновений ионов (рис. 7), частота соударений которых определяется следующим образом:

$$v_{ii} = 5 \cdot 10^{-7} n_i T_i^{1.5} M^{0.5}, \quad (2)$$

где  $n_i$  – плотности ионов,  $\text{см}^{-3}$ ;  $T_i$  – температура ионов, эВ;  $M$  – атомный вес, а. е. м.

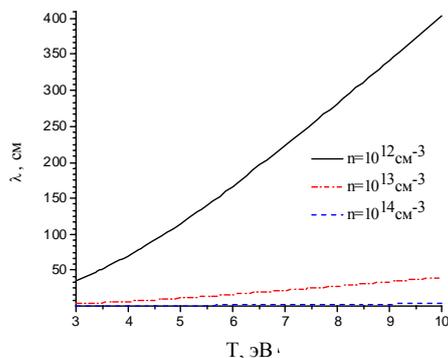


Рис. 7. Зависимость длины свободного пробега электронов  $\lambda_{ei}$  от температуры для различной плотности плазмы

Исходя из частоты ион-ионных и ион-электронных столкновений для обеспечения бесстолкновительного режима плазмы в области сепарации установки ДИС-1 при температуре плазмы 1...10 эВ плотность плазмы должна находиться на уровне  $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Бесстолкновительность действует только в области ускорения ионов радиальным электрическим полем.

Поскольку выбор параметров плазменного источника проводился с учетом практически полной ионизации вводимых паров ОЯТ, то для указанных выше параметров ожидаемая производительность такой системы может составить:

$$m = MV_{\parallel} n_i \alpha St \approx 800 \text{ т/год}, \quad (3)$$

где  $M$  – атомный вес элемента или изотопа;  $V_{\parallel}$  – продольная скорость плазмы;  $n_i$  – концентрация ионов плазмы;  $S$  – сечение плазмы;  $\alpha \leq 1$  – КПД сепарации ионов;  $t$  – время работы. Коэффициент  $\alpha$  является составным и зависит от ряда параметров.

Уточнение наших расчетов [1] в получении магнитного поля привело к снижению энергозатрат с величины  $\sim 10^4$  до  $5 \cdot 10^3$  эВ/атом, что, по-видимому, не является пределом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.Б. Юферов, В.О. Ильичева, С.В. Шарый, А.С. Свичкар, М.О. Швец, К.И. Живанков, Т.И. Ткачева. Плазменная сепарация ОЯТ – один из возможных путей решения проблемы замкнутого ядерного топливного цикла // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2013, №2(84), с. 148-151.

2. А.М. Yegorov, V.B. Yuferov, S.V. Shariy, V.A. Seroshtanov, O.S. Druy, V.V. Yegorenkov, E.V. Ribas, 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), p. 122-124.

3. A. Litvak, S. Agnew, F. Anderegg, B. Cluggish, R. Freeman, J. Gilleland, R. Isler, W. Lee, R. Miller, T. Ohka, 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, O-1.6A

4. Охкава Тихиро. *Описание изобретения к патенту Российской Федерации*. 2001 122 156 /15, 07.08.2001.

5. В.О. Ильичева, В.Б. Юферов, О.С. Друй, С.В. Шарый. Сравнительный анализ сепарационных устройств для магнитоплазменной регенерации облученного ядерного топлива // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2012, №4(80), с. 112-116.

6. В.Б. Юферов, А.М. Егоров, С.В. Шарый, О.С. Друй, В.О. Ильичева, М.О. Швец, Т.И. Ткачева, А.С. Свичкар, С.Н. Хижняк. Магнитоплазменная регенерация ОЯТ // *Вестник НТУ ХПИ*. 2010, №55, с. 129-149.

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 в ЖЭТФ*. 1978, т. 27, в. 5, с. 264-267.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013 г.

#### ПРО ПЕРЕРОЗПОДІЛ ІОННИХ ПОТОКІВ У ІМІТАЦІЙНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАХ ПО МАГНІТОПЛАЗМОВІЙ СЕПАРАЦІЇ

**В.Б. Юферов, О.С. Свичкар, С.В. Шарый, Т.И. Ткачева, В.О. Ильичова, В.В. Катречко, А.И. Шаповал, С.М. Хижняк**

Розглянута третя стадія переробки ОЯТ магнитоплазмовим методом з використанням імітаційних середовищ. Розраховані траєкторії руху селективних іонів у одночастковому наближенні. Представлена схема сепаратора ОЯТ.

#### ABOUT REDISTRIBUTION OF IONIC STREAMS IN IMITATION EXPERIMENTS ON PLASMA SEPARATION

**V.B. Yuferov, A.S. Svichkar, S.V. Shariy, T.I. Tkachova, V.O. Ilichova, V.V. Katrechko, A.I. Shapoval, S.N. Khizhnyak**

The third stage of spent nuclear fuel (SNF) reprocessing by plasma methods with use of imitation environments is considered. The trajectories of motion of selective ions in the one-particle approaching are calculated. The scheme of SNF separator is presented.