

РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ МНОГОСТАДИЙНОЙ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ОТ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

*В.Б. Юферов¹, В.В. Катречко¹, В.О. Ильичева¹, С.В. Шарый¹, А.С. Свичкарь¹,
М.О. Швеиц¹, Е.В. Муфель¹, А.Г. Бобров²*

¹ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина;

²НТУ «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

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

Альтернативой пьюрекс-процессу, который применяется в промышленности при переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), являются технологии, использующие физические методы и способствующие уменьшению загрязнения окружающей среды. К таким методам относится плазменная переработка ОЯТ без увеличения объема радиоактивных отходов (РАО), где требуется только электроэнергия. Рассмотрена возможность очистки облученного UO_2 от продуктов деления (ПД) на стадиях магнитоплазменной переработки ОЯТ, где предусматривается разделение многокомпонентного состава ОЯТ как по массам, так и по различию физико-химических свойств.

1. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ И РАО

В 2000–2006 гг. в США, в Хэнфорде проводились исследования Archimedes Group по разработке плазменного масс-фильтра для выделения отходов с высокой активностью (ВАО) из РАО [1]. После радиохимической переработки в состав РАО входят: 98,9 % легких элементов (1...65 а.е.м.) с активностью 0,1%; 0,4 % актиноидов

с активностью 0,2 и 0,7 % продуктов деления (80...160 а.е.м.), в которых сконцентрирована основная радиоактивность – 99,7%. Выделяя легкие элементы (1...84 а.е.м.), можно уменьшить массу ВАО в 4 раза. Для решения этой задачи была разработана технологическая схема, приведенная на рис. 1. Плазменная часть заключалась в разработке фильтра масс для разделения тяжелой и легкой фракций в плазме, вращающейся в скрещенных электрическом и магнитном полях, со сбором ионов на соответствующих коллекторах.

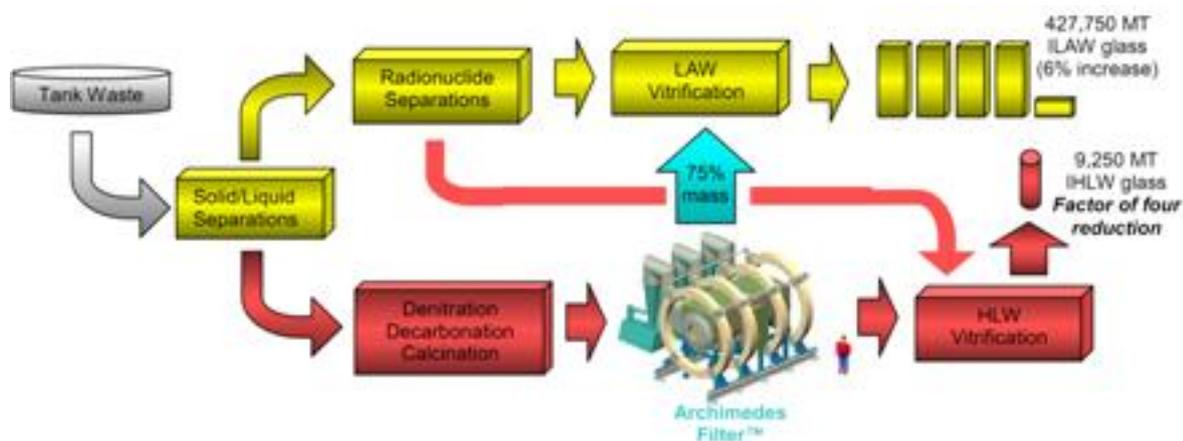
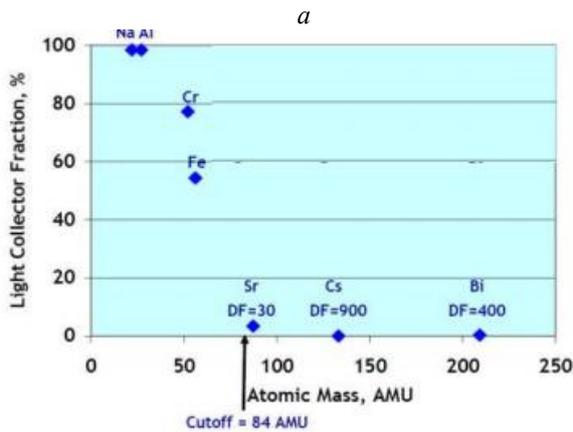
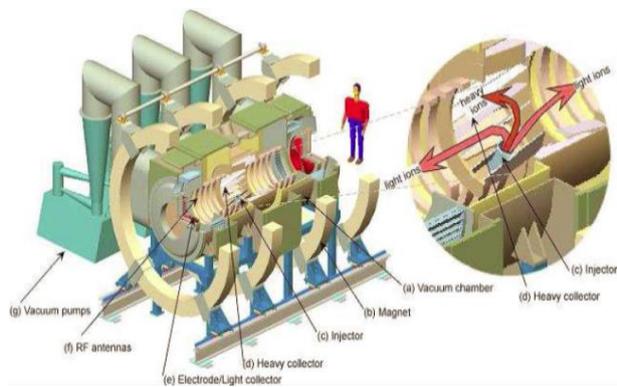


Рис. 1. Блок-схема процесса плазменной переработки РАО в Хэнфорде [1]

Сепарация в плазменном фильтре основана на разделении ионов по массам в бесстолкновительной плазме, вращающейся в скрещенных $E \perp H$ -полях с положительным потенциалом на оси вращения. Сбор тяжелых и легких ионов происходит на продольном и торцевом коллекторах соответственно. Расчетная производительность плазменной установки: ~ 1100 кг/сут при плотности плазмы $n_e = 3,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $T_e = 1,2 \dots 1,8 \text{ эВ}$ и $R = 40 \text{ см}$. На рис. 2 показаны устройство установки и результаты экспериментов [2, 3].

На модельной смеси была показана возможность пространственного разделения тяжелых (стронций, цезий, висмут) и легких (алюминий, магний, хром, железо) ионов, однако не все легкие элементы

удалось выделить полностью (рис. 2,б). Тяжелые ионы почти полностью вышли на продольный коллектор, тогда как легкие ионы (хром, железо) частично ушли вдоль магнитного поля на торцевой коллектор и частично – на боковую поверхность камеры. Это объясняется в [4], где теоретически доказано, что в данной системе легкие ионы могут выйти на коллектор тяжелых ионов. Кроме того, по нашим оценкам, при указанных выше параметрах плазма не будет полностью ионизована, и часть нейтралов выйдет на боковую стенку, снижая, таким образом, производительность системы. Как следствие, достигнутая величина производительности составила 440 кг/сут технологической смеси.



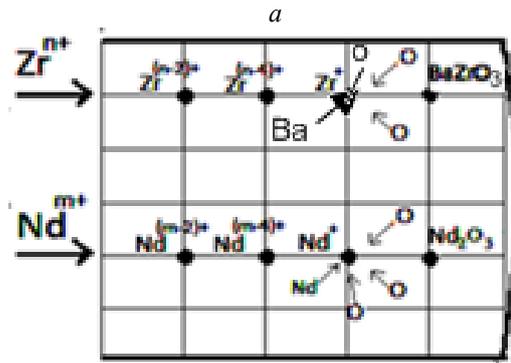
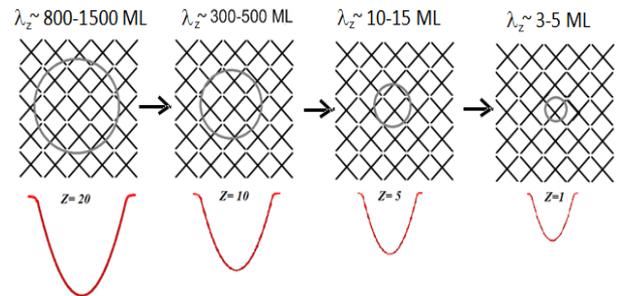
б

Рис. 2. Схематический вид установки Archimedes (Ohkawa) filter (а); результаты экспериментов по разделению модельной смеси (б)

В настоящее время в США продолжают исследования по плазменной переработке РАО [5–7], в частности для разделения во вращающейся плазме актиноидов и лантаноидов [8]. В Украине и России принципы плазменной сепарации получили дальнейшее развитие для переработки ОЯТ энергетических реакторов [9–15]. Преимуществом в данном случае является тот факт, что ОЯТ не содержит легкие (1...65 а.е.м.) элементы, присутствующие при использовании радиохимических технологий. ВАО предлагается захоранивать, а актиноиды – использовать для рецикла ЯТ.

Поскольку в энергетических реакторах широко используется урановое оксидное топливо, целесообразно учитывать физико-химические свойства не только элементов, но и оксидов, присутствующих в ОЯТ. В [16] были рассмотрены некоторые физико-химические процессы при торможении многозарядных ионов ПД в решетке

UO₂ (рис. 3), приводящие к образованию оксидных соединений, в том числе и многокомпонентных.



б

Рис. 3. Схематический вид движения многозарядного иона ПД в решетке UO₂ (а) и образования в монослоях (ML) химических соединений при торможении многозарядных ионов (б)

В частности, указывалось, что в пределах положительной потенциальной ямы многозарядного иона ПД, движущегося через решетку диоксида урана, энергия передается соседним молекулам, которые, в свою очередь, диссоциируют, рекомбинируют, перезаряжаются и ионизируются. В атомарном и ионном состояниях кислород, диффундируя намного быстрее, может окислять UO₂ и другие соединения ПД. Таким образом, после облучения большинство ПД в оксидном топливе содержится в виде оксидов, в том числе многокомпонентных (уранаты, плутонаты, оксигеллуриды, цирконаты и др.). Состояние ПД в ОЯТ отражено в табл. 1.

Исследования целесообразно проводить с материалами – имитаторами ОЯТ, в частности, SIMFUEL, который состоит из смеси естественных окислов с процентным составом, соответствующим ОЯТ (табл. 2).

Таблица 1

Состояние ПД в ОЯТ [17]

| Элемент | Группа | Выход атомов на один акт деления | Состояние |
|---------|------------------|----------------------------------|---------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Kr | Благородные газы | 0,02 | Пузыри и поры |
| Xe | | 0,21 | |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|----|---------------------------|------|---|
| Zr | Тугоплавкие металлы | 0,20 | ZrO ₂ , в твердом растворе |
| Mo | | 0,21 | Металлические включения, оксиды |
| Ru | Благородные металлы | 0,21 | Металлические включения |
| Pd | | 0,14 | |
| Rh | | 0,05 | |
| Tc | | 0,06 | |
| Ce | Редкоземельные металлы | 0,13 | Оксиды, могут полностью или частично растворяться растворяться в топливе |
| Nd | | 0,14 | |
| La | | 0,05 | |
| Pr | | 0,04 | |
| Cs | Щелочные металлы | 0,19 | Пар (при T > 1000 °C) могут образовывать уранаты |
| Rb | | 0,02 | |
| Ba | Щелочно-земельные металлы | 0,07 | Оксиды, могут образовывать уранаты |
| Sr | | 0,04 | |
| Te | Металлоиды | 0,03 | Оксид, может образовывать оксителлуриды |
| I | | 0,02 | |

Таблица 2

Состав SIMFUEL [18]

| Элементы | Оксиды | Процентный состав |
|-----------|--------------------------------|-------------------|
| U | UO ₂ | 95,254 |
| Y | YO ₂ | 0,107 |
| La | La ₂ O ₃ | 0,235 |
| Nd(Pr,Sm) | Nd ₂ O ₃ | 2,037 |
| Sr | SrO | 0,103 |
| Ba | BaO | 0,692 |
| Ru(Tc) | RuO ₂ | 0,575 |
| Sb | Sb ₂ O ₃ | 0,107 |
| Cs | CsCl | 0,892 |

2. МАГНИТОПЛАЗМЕННАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОЯТ

В настоящее время в ННЦ ХФТИ исследуется возможность очистки ОЯТ от ПД с использованием физических методов на трех стадиях: при нагреве, ионизации и выделении целевых ионов во вращающейся в ЕЛН-полях плазме [19]. Последовательность процесса отражена на рис. 4. Предполагается, что облученные твэлы в тепловыделяющих сборках предварительно подвергаются разделке, дроблению и измельчению. Для ускорения процесса термодесорбции ПД из ОЯТ на стадии нагрева необходимо проводить предварительное измельчение оксидного топлива до получения рабочего микропорошка 1...50 мкм. Исходя из анализа коэффициентов диффузии [20]

следует, что целесообразно вести диффузию ПД из жидкой (расплавленной) фазы. Для определения параметров процесса используем формулу Эйнштейна [21]:

$$2D = x^2/t, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии, x^2 – средний квадрат смещения молекулы за время t .

Оценки показывают, что при $x = 1...50$ мкм и $t = 1...3$ с величина D составляет $10^{-7}...10^{-5}$ см²/с. Формула (1) дает приближенный результат. В частности, для аморфных сплавов постоянный коэффициент в (1) представляет безразмерным параметр, определяемый его составом и механизмом диффузии.

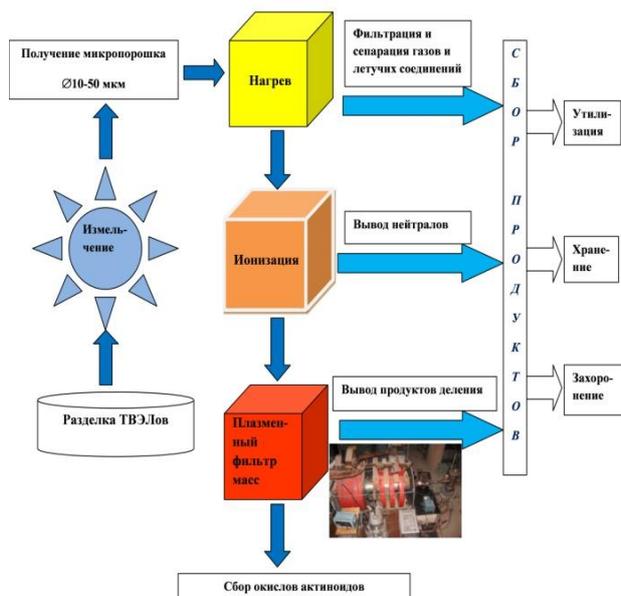


Рис. 4. Блок-схема процесса магнитоплазменной переработки ОЯТ

2.1. ДРОБЛЕНИЕ

Дробление оксидного топлива возможно проводить с помощью механической и/или термической обработки. В [22] рассматривались различные методы измельчения стеклообразных материалов, имитирующих ОЯТ. Наиболее эффективным оказался метод импульсной лазерной обработки, с помощью которого удалось получить частицы размером до 1 мкм. В свою очередь, в [23] проводились эксперименты по разрушению образцов ОЯТ ВВЭР-1000 в лабораторных условиях при температуре ~ 500 °С в кислородной среде, при этом кристаллическая решетка UO_2 разрушалась, окислялась до U_3O_8 , и топливо рассыпалось. Аналогичные результаты получались в предварительных экспериментах для выделения Cs путем термодесорбции [18, 24] при индукционном нагреве SIMFUEL в кислородной атмосфере до ~ 500 °С, где происходила рекристаллизация UO_2 с образованием порошка U_3O_8 .

2.2. НАГРЕВ

В отличие от SIMFUEL при индукционном нагреве облученного UO_2 до 2300 °С в Ar и Ar/ O_2 -среде исследования [18] показали идентичность результатов, т. е. топливо перед термообработкой уже находится в виде окиси-закиси ($O/U \geq 2$). Кроме того, с помощью компьютерного моделирования было показано, что при нагреве ОЯТ до 2300 °С происходят различные химические реакции с образованием окислов «серой фазы»: Cs_2MoO_4 , $Cs_2U_4O_{12}$, Cs_2ZrO_3 , $SrZrO_3$, $SrMoO_4$, $BaMoO_3$, $BaZrO_3$, $BaUO_3$, $Ba_2U_2O_7$, Ba_3UO_6 и др.

Следует заметить, что кроме оксидов и интерметаллидов в ОЯТ присутствует сравнительно небольшая доля элементов, не вступивших в химические связи. Как правило, элементы в отличие от окислов имеют более высокую упругость паров. В первую очередь при термодесорбции выделяются газы и легколетучие элементы (третий, йод и др.).

На рис. 5 приведены величины упругости паров [25] некоторых элементов и соединений.

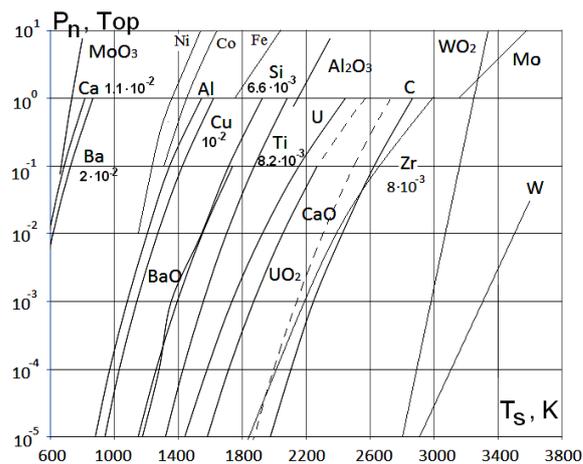


Рис. 5. Упругости паров некоторых элементов и окислов

При повышении температуры происходят термодесорбция легколетучих соединений и диссоциация ряда окисленных продуктов деления. В экспериментах [18] были получены десорбционные характеристики для элементов и соединений, в которые входят: йод, цезий, стронций, барий, молибден, уран (рис. 6).

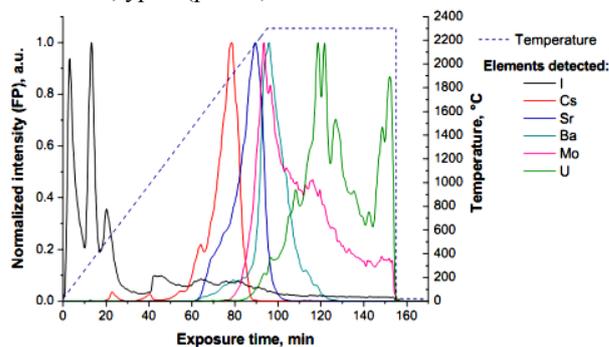


Рис. 6. Десорбционные характеристики при нагреве облученного оксидного топлива [18]

Анализ физико-химических свойств состава ОЯТ [26–30] показал, что ряд тугоплавких окислов, в том числе многокомпонентных (UO_2 , Nd_2O_3 , ZrO_2 , $BaZrO_3$, $BaUO_3$ и др.), не удается выделить на стадии нагрева. На рис. 7,а,б показаны энергии ионизации и диссоциации для окислов ПД до и оставшихся окислов после нагрева ОЯТ.

При нагреве ОЯТ до 2500 °С количество оксидов ПД можно значительно уменьшить за счет удаления ПД с энергией диссоциации (ϵ_i) меньшей, чем собственный потенциал ионизации (ϕ_i), величина которого, в свою очередь, меньше энергии диссоциации UO_2 (ϵ): $\epsilon_i < \phi_i < \epsilon$.

Таким образом, на стадии нагрева возможно выделить до 75% ПД, после чего уменьшаются количество компонентов рабочей смеси и соответственно энергозатраты при переводе ее в плазму.

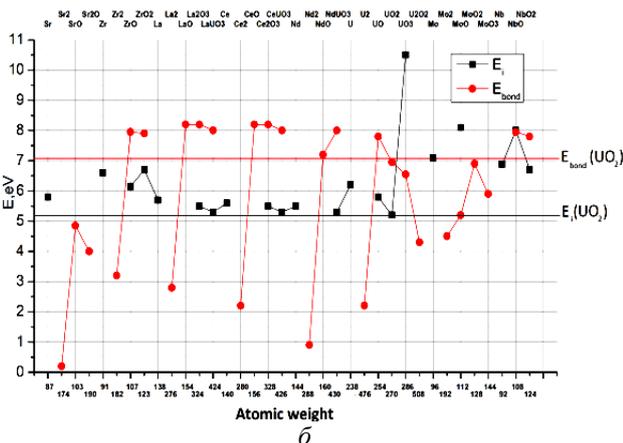
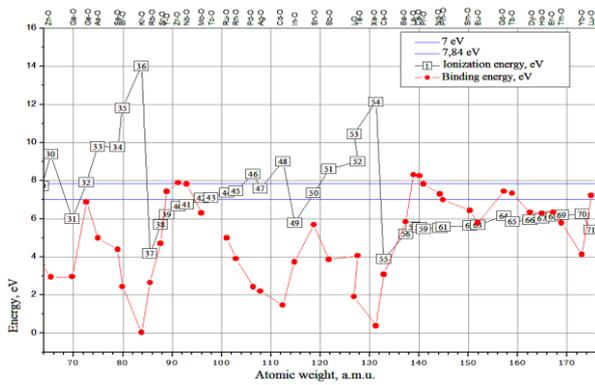


Рис. 7. Энергии ионизации и диссоциации для окислов ПД до (а) и оставшихся окислов после (б) стадии нагрева ОЯТ [26]

2.3. ИОНИЗАЦИЯ

Оставшиеся в ОЯТ после облучения и нагрева окислы, в том числе многокомпонентные, могут образовывать в плазменном источнике (ПИ) различные молекулярные ионы [19]. Исходя из

потенциалов ионизации основного компонента плазмы ОЯТ – молекулярных ионов UO_2^+ , энергия электронов в низкотемпературной плазме может находиться на уровне ~ 5 эВ. При этом часть компонентов плазмы может не ионизоваться. На стадии ионизации эти нейтралы можно вывести из ПИ, чтобы уменьшить поток нейтралов, поступающий в плазменный фильтр масс. Исходя из того, что степень ионизации плазмы в ПИ определяет производительность плазменного фильтра масс, в источнике должна создаваться столкновительная плазма с высокой плотностью [31]. Для создания плазмы с требуемыми параметрами разрабатывается двухступенчатый ПИ [32]. Трудность при определении оптимальных параметров ПИ составляет недостаток данных по ряду физико-химических величин в оксидной плазме. Некоторые вопросы по созданию плазмы смеси актиноидов и лантаноидов и их окислов рассмотрены в [16, 33]. В частности, для некоторых оксидов, присутствующих в ОЯТ, с использованием формулы Томсона (2) были получены зависимости сечений ионизации от энергии налетающих электронов для сравнения с известными значениями сечений ионизации щелочных металлов (рис. 8):

$$\sigma_i = \frac{\pi e^4}{E} \int \frac{dE}{E^2} = \frac{\pi e^4}{E} \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{E} \right) = 4\pi\alpha_0^2 \left(\frac{R_y}{I} \right)^2 \left(\frac{I}{E} - \frac{I^2}{E^2} \right), \quad (2)$$

где σ_i – сечение ионизации; e – заряд электрона; E – энергия налетающего электрона; I – потенциал ионизации; R_y – потенциал ионизации атома водорода; a_0 – борковский радиус.

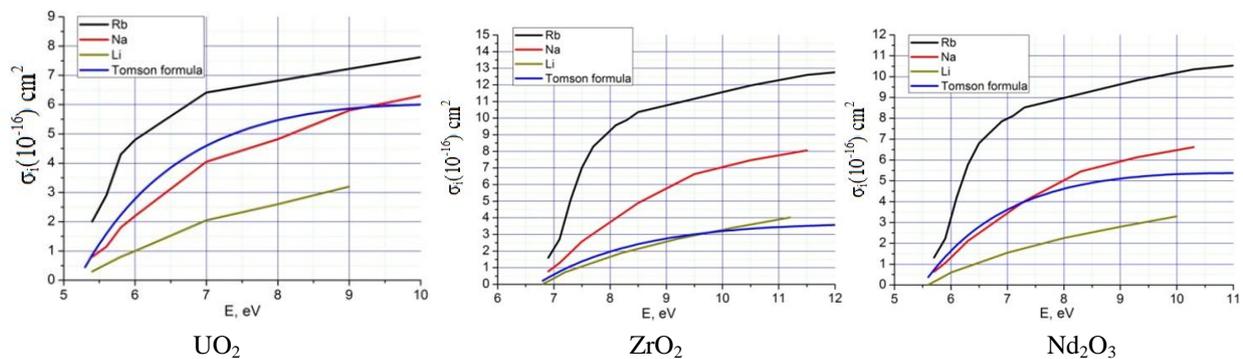


Рис. 8. Сечения ионизации ($\sigma_i \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$) для некоторых окислов, присутствующих в ОЯТ. Расчетное значение, как правило, находится между экстраполированными значениями сечений ионизации щелочных металлов [16]

2.4. МАГНИТОПЛАЗМЕННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ИОНОВ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ В ЕЛН-ПОЛЯХ ПЛАЗМЕ

Для разделения молекулярных ионов ОЯТ во вращающейся в ЕЛН-полях плазме рассматривается концептуальная схема демонстрационно-имитационного сепаратора с заданной конфигурацией магнитного поля [34]. Демонстрационно-имитационный сепаратор явля-

ется макетом плазменного фильтра масс облученного UO_2 (рис. 9).

Из ПИ с площадью инжекции $S \sim 80 \text{ см}^2$ столкновительная плазма ($n_e \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$) поступает в фильтр масс. При движении плазмы в убывающем магнитном поле плазменный поток расширяется, и в области сепарации с однородным магнитным полем плазма бесстолкновительна ($n_e \sim 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$). Для определения местоположения коллекторов проводились расчеты траекторий движения молекулярных ионов плазмы ОЯТ.

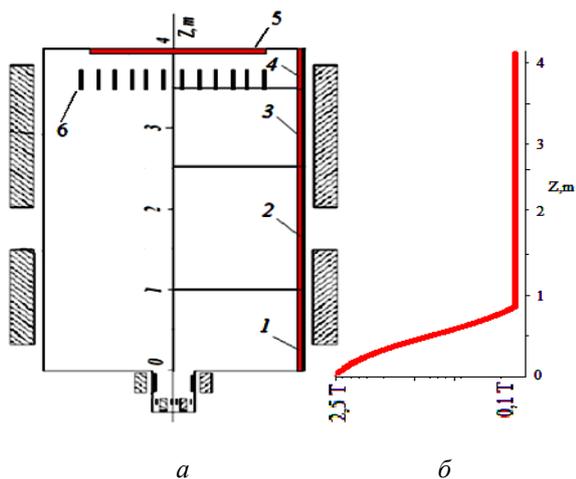


Рис. 9. Схема демонстрационно-имитационного сепаратора (серия ДИС). Секции продольного коллектора для сбора:
 1 – нейтралов,
 2, 4 – молекулярных ионов многокомпонентных окислов,
 3 – молекулярных ионов актиноидов,
 5 – торцевой коллектор для сбора ионов ПД;
 аксиальное распределение магнитного поля (б)

Соотношение электрических и магнитных полей задавалось таким образом, чтобы целевые ионы диоксида урана выходили на боковую поверхность камеры за один-два витка траектории в области сепарации. Это достигается (см. рис. 9) на радиусе $R = 1,3$ м при $E_0 = 400$ В/м, $B = 0,1$ Тл и добавлении переменной компоненты электрического поля, равной $0,6E_0 \sin(\omega t)$ при $\omega = 1/2 \omega_{ci}(UO_2)$ [35]. Продольный коллектор располагается по всей длине вакуумной камеры, при этом он секционирован для разделения областей выхода разных масс. Развитая поверхность продольного коллектора способствует уменьшению опасности возникновения самопроизвольной цепной реакции (в реальных условиях). Для заданных начальных условий были проведены расчеты (рис. 10), которые показали, что на радиусе 1,3 м ионы диоксида урана выходят на боковую поверхность камеры в локальной области 3 (см. рис. 9). В случае неполной ионизации плазмы нейтралы не удерживаются магнитным полем и должны выйти на продольный коллектор в области 1. Тяжелые молекулярные ионы ($M > 400$ а.е.м.) выходят на боковую поверхность камеры в области 2 и 4 (см. рис. 9). Молекулярные ионы, включающие лантаноиды: $Nd_2O_3^+$, $La_2O_3^+$ и др., осаждаются на торцевом коллекторе [35] так же, как и легкие ионы ПД: ZrO_2^+ , MoO_3^+ , Mo^+ и др.

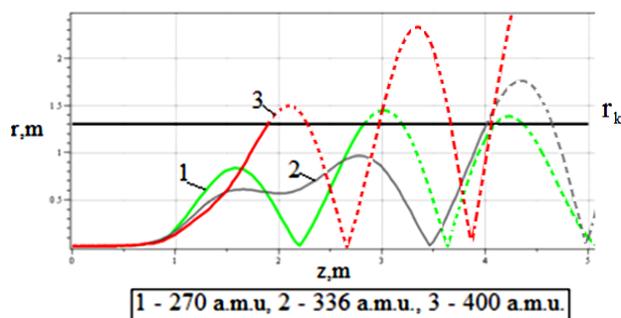


Рис. 10. Траектории ионов с начальными условиями:
 $W = 5$ эВ, $\alpha = 45^\circ$, $r = 0,01$ м, при добавлении переменной компоненты электрического поля, равной $0,6E_0 \sin(\omega t)$ при $\omega = 1/2 \omega_{ci}(UO_2)$:
 1 – 400 а.е.м.; 2 – 336 а.е.м. ($Nd_2O_3^+$);
 3 – 270 а.е.м. (UO_2^+)

Следует отметить, что в данном расчете не учтен разброс начальных параметров, однако предварительные оценки по разбросу удовлетворяют заданному расположению коллекторов. В свою очередь, многокомпонентность молекулярной плазмы ОЯТ может понизить степень разделения ЯТ и ПД, хотя количество примесей может быть незначительным (менее 1%), так как основными компонентами (более 90% по количеству частиц) в плазме ОЯТ являются молекулярные ионы, включающие актиноиды: UO_2^+ , PuO_2^+ , CmO_2^+ , UO^+ и др. Для этих ионов отношение m/z (m – масса и z – заряд иона) достаточно близко, и, как следствие, они должны выйти в одну и ту же область 3 на продольном коллекторе (см. рис. 9).

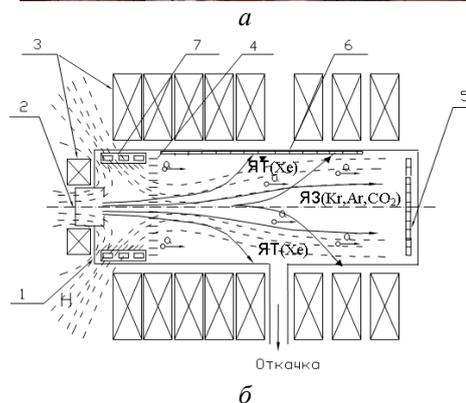


Рис. 11. Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) установки ДИС-1: 1 – вакуумная камера; 2 – плазменный источник; 3 – соленоиды для создания магнитного поля; 4 – коаксиальная система электродов для создания радиального электрического поля; 5 – коллектор для сбора легких ионов; 6 – коллектор для сбора тяжелых ионов; 7 – система откачки нейтрального газа

Оценка производительности плазменного сепаратора осуществляется по формуле [7]

$$F \approx m \cdot n \cdot A \cdot v_{th}/4, \quad (3)$$

где m – масса; n – плотность плазмы; A – сечение плазменного потока; v_{th} – тепловая скорость ионов.

При $R = 1,3$ м, $n_e \sim 2 \cdot 10^{11}$ см⁻³, $T_i = 3 \dots 5$ эВ расчетная оценка производительности $F \sim 15 \dots 20$ т/год рабочей смеси, что соответствует наработке ОЯТ в год реактора ВВЭР-1000.

Как отмечалось выше, исследования по разделению ионов в плазменном фильтре масс целесообразно проводить с использованием имитационной среды. Ранее [9], на демонстрационно-имитационном сепараторе ДИС-1 (рис. 11) проводились эксперименты по разделению ионов по массам в Хе-Кг-Аг- и Хе-Кг-СО₂-плазме, где Хе имитировал ЯТ, а другие компоненты – ядерную золу (по соотношению масс осколков 3:2:1 при делении урана).

В настоящее время на установке ДИС-1 проводятся эксперименты [26] по моделированию физико-химических процессов, происходящих в плазме ОЯТ.

ВЫВОДЫ

Рассмотрена последовательность стадий магнитоплазменной переработки ОЯТ и определено направление дальнейших исследований. Концепция магнитоплазменной переработки ОЯТ заключается:

- в применении физических методов (очистка ОЯТ от ПД осуществляется без использования химических реагентов на трех стадиях: нагрев, ионизация, магнитоплазменное разделение ионов во вращающейся плазме);

- учете физико-химических свойств оксидного уранового топлива (для исследований целесообразно использовать нерадиоактивную среду, близкую по физико-химическому составу к ОЯТ);

- определении сепарационных принципов (разделение элементов и соединений многокомпонентного состава ОЯТ осуществляется: на стадии нагрева – по различию физико-химических свойств, на стадии ионизации – по различию потенциалов ионизации, на стадии магнитоплазменного разделения ионов во вращающейся плазме – по массам).

Для обоснования выбора данной концепции очистки ОЯТ от ПД была рассмотрена возможность сепарации химических соединений (в частности, оксидов, в том числе многокомпонентных), присутствующих в ОЯТ на стадии нагрева, и молекулярных ионов, образующихся из окислов ОЯТ на плазменных стадиях. С целью развития данной концепции разрабатывается демонстрационно-имитационный сепаратор – макет плазменного фильтра масс облученного оксидного топлива. Ожидаемая производительность составляет 15...20 т/год рабочей смеси. Исследования возможно проводить с использованием SIMFUEL.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. John Gilleland, Tihiro Ohkawa, Stephen Agnew, Brian Cluggish, Richard Freeman, Robert Miller, Sergei Putvinski, Leigh Sevier, Karl Umstadter. *Application of Archimedes Filter for Reduction of Hanford HLW: WM'02 Conference*, February 24–28, 2002, Tucson, AZ, p. 1-8.
2. A. Litvak, S. Agnew, F. Anderegg, et al. Archimedes Plasma Mass Filter // *30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys.* St. Petersburg, 7–11 July 2003, ECA V. 27A, O-1.6A.
3. R. Freeman, S. Agnew, F. Anderegg, et al. Archimedes Plasma Mass Filter // *Radio Frequency Power in Plasmas: 15th Topical Conference*. AIP Conference Proceedings. 2003, v. 694, p. 403-410.
4. Yu.N. Yeliseyev. Ion motion in crossed fields and separation mechanism in “Archimedes plasma mass filter” // *Problems of Atomic Science and Technology. Series “Plasma Physics”* (22). 2016, N 6, p. 203-206.
5. A.J. Fetterman, N.J. Fisch. The magnetic centrifugal mass filter // *Phys. Plasmas*. 2011, v. 18, N 9, p. 09450392011; <http://doi.org/10/1063/1/3631793>.
6. A.J. Fetterman, N.J. Fisch. *Plasma mass filters for nuclear waste reprocessing*. 2011 // <http://dx.doi.org/10/102172/1014697>.
7. Renaud Gueroult, David T. Hobbs, Nathaniel J. Fisch. Plasma Filtering Techniques for Nuclear Waste Remediation // *Journal of Hazardous Materials*. 2015, v. 297, p. 153-159; <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.04.058>.
8. R. Gueroult and N.J. Fisch. Plasma Mass Filtering for Actinides // *Lantanides Separation Plasma Sources Sci. Technol.* 2013; <http://doi.org/10/1088/0963-0252/23/3/035002>.
9. A.M. Yegorov, V.B. Yuferov, S.V. Shariy, V.A. Seroshtanov, O.S. Druy, 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”* (15). 2009, N 1(59), p. 122-124.
10. Е.И. Скибенко, Ю.В. Ковтун. Конструктивные и технологические особенности концептуального проекта ионно-атомного сепарирующего устройства на основе пучково-плазменного разряда // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2009, в. 4(62), с. 286-292.
11. V.B. Yuferov, A.M. Yegorov, V.O. Pichova, S.V. Shariy, K.I. Zhivankov. Plasma Separation of Spent Nuclear Fuel – One of Possible Ways to Solve a Problem of Closed Fuel Cycle // *Problems of Atomic Science and Technology. Series “Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science”* (105). 2013, N 2(84), p. 148-151.
12. 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, в. 4, с. 755-759.
13. А.В. Тимофеев. О переработке отработавшего ядерного топлива плазменным методом // *Физика плазмы*. 2007, т. 33, в. 11, с. 971-987.

14. В.П. Смирнов, А.А. Самохин, Н.А. Ворона, А.В. Гавриков, А.И. Морозов, В.В. Савельев. Осесимметричные плазмооптические масс-сепараторы // *Физика плазмы*. 2005, т. 31, в. 5, с. 458-465.
15. S.D. Bardakov, A.V. Ivanov, N.A. Kazantsev, N.A. Strokin. Plasma-optical Mass Separator for Separating Substances of Complex Composition: Review // *Вестник ИргТУ. Физико-математические науки*. 2014, №3(86), с. 128-135.
16. V.B. Yuferov, V.V. Katrechko, V.O. Ilichova, S.V. Shariy, A.S. Svichkar, M.O. Shvets, I.V. Buravilov, S.N. Khizhnyak. The formation of complex chemical compounds in the spent fuel and their influence on separation processes // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"* (68). 2017, N 3(109), p. 31-34.
17. Е.А. Кинев. Влияние облучения на материалы твэлов с урановым и уран-плутониевым оксидным топливом при эксплуатации в реакторе БН-600: Дис. ... канд. техн. наук. ДТН, РФ, Заречный, 2008.
18. Niko Kivel, Natalia Shcherbina, Ines Gunter-Leopold. Development of a high temperature treatment device for spent nuclear fuel // *J. Radioanal Nucl. Chem.* DOI 10.1007/s 10967-012-2046-x.
19. V.B. Yuferov, S.V. Shariy, T.I. Tkachova, V.V. Katrechko, A.S. Svichkar, V.O. Ilichova, M.O. Shvets, E.V. Mufel. The Magnetoplasma Separation Method of Spent Nuclear Fuel // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Physics"* (23). 2017, N 1(107), p. 223-226.
20. В.Б. Юферов, В.В. Катречко, С.В. Шарый, А.С. Свичкар, Т.И. Ткачёва, Е.В. Муфель, В.О. Ильичева, С.Н. Хижняк. Физические принципы разделения многокомпонентных сред при термонагреве // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2015, №2(96), с. 43-47.
21. И.В. Радченко. Молекулярная физика. М.: «Наука», 1965.
22. D.V. Vinnikov, N.A. Shulgin, V.V. Katrechko, V.B. Yuferov, V.I. Sokolenko, V.I. Tkachev, A.N. Ponomarev, I.V. Buravilov. Grinding the Spent Nuclear Fuel Simulating Materials for the Magnetoplasma Separation // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science"* (108). 2016, N 4(104), p. 54-57.
23. M.M. Metalidi, S.V. Shapovalov, R.V. Ismailov, M.I. Skriplev. Thermochemical embrittlement of the zirconium cladding of a fuel rod and oxidative recrystallization of the fuel material in the course of spent nuclear fuel reprocessing // *Radiochemistry*. 2015/ISSN: 1066-3622 (Print) 1608-3288 (Online).
24. J. Svedkauskaitė-Le Gore, N. Kivel, J.J. Gunter-Leopold. Real time measurement of fission products released from spent fuel by thermal treatment // *J. Radioanal Nucl. Chem.* DOI 10.1007/s 10967-012-2046-x.
25. *Таблицы физических величин: Справочник* / Под ред. Кикоина И.К. М.: «Атомиздат», 1976, 1008 с.
26. V.B. Yuferov, S.V. Shariy, T.I. Tkachova, V.V. Katrechko, A.S. Svichkar, V.O. Ilichova, M.O. Shvets, E.V. Mufel. Calculations of Ion Trajectories at Magnetoplasma Separation and Experiments With Polyatomic Gases // *Acta Polytechnica*. 57(1):71-77, 2017 doi:10.14311/AP.2017.57.0071.
27. V.B. Yuferov, S.V. Shariy, E.V. Mufel, V.O. Ilichova. Peculiarities of the Magnetoplasma Separation of the Groups of Heated and Ionized Elements // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2014, N 3(91), p. 222-226.
28. V.B. Yuferov, S.V. Shariy, V.V. Katrechko, E.V. Mufel, A.S. Svichkar, V.O. Ilichova, S.N. Khizhnyak. Features of molecular plasma SNF after heating and ionization // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"* (63). 2014, N 5(93), p. 63-68.
29. V.B. Yuferov, V.V. Katrechko, T.I. Tkachova, S.V. Shariy, A.S. Svichkar, E.V. Mufel, V.O. Ilichova, M.O. Shvets. Some questions of SNF reprocessing at the stages of ionization and magnetoplasma separation in crossed fields // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Electronics and New Methods of Acceleration"*. 2015, N 4(98), p. 345-349.
30. V.B. Yuferov, V.V. Katrechko, A.S. Svichkar, S.V. Shariy, T.I. Tkachova, E.V. Mufel, V.O. Ilichova, A.Yu. Pakhomov. Problems of Impurities Deducing from Multicomponent Media at Thermal Heating, Ionization and Rotation of Plasma in Crossed Fields // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Vacuum, Pure Materials, Superconductors"*. 2016, N 1(101), p. 124-130.
31. V.B. Yuferov, S.V. Shariy, M.O. Shvets, A.N. Ozerov. Gas-metal plasma source project for the separation technology // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"* (63). 2014, N 5(93), p. 184-187.
32. S.V. Shariy, V.B. Yuferov, M.O. Shvets, V.I. Tkachov, V.V. Katrechko. Magnetic field influence on the discharge parameters of two-stage gas-metal plasma source // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Physics"* (22). 2016, N 6(106), p. 191-194.
33. V.V. Katrechko, V.B. Yuferov, T.I. Tkachova, A.S. Svichkar, S.V. Shariy, V.O. Ilichova. Features of Plasma Formation at Ionization Stage for Magnetoplasma Reprocessing // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Physics"* (22). 2016, N 6(106), p. 238-240.
34. T. Ohkawa, R. Miller. Band gap ion mass filter // *Physics of Plasmas*. 2002, v. 9, N 12, p. 5116-5120.
35. V.B. Yuferov, T.I. Tkachova, V.V. Katrechko, A.S. Svichkar, V.O. Ilichova, S.V. Shariy. The Calculations of Uranium And Lanthanum Oxides Trajectories at Magnetoplasma Separation Stage // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Plasma Physics"* (23). 2017, N 1(107), p. 207-210.

Статья поступила в редакцию 23.11.2017 г.

РОЗВИТОК КОНЦЕПЦІЇ БАГАТОСТАДІЙНОЇ ОЧИСТКИ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ВІД ПРОДУКТІВ ПОДІЛУ ФІЗИЧНИМИ МЕТОДАМИ

*В.Б. Юферов, В.В. Катречко, В.О. Ільчова, С.В. Шарій, О.С. Свічкарь, М.О. Швець,
Є.В. Муфель, О.Г. Бобров*

Альтернативою пьюрекс-процесу, який застосовується в промисловості при переробці відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), є технології, що використовують фізичні методи і сприяють зменшенню забруднення навколишнього середовища. До таких методів відноситься плазмова переробка ВЯП без підвищення об'єму радіоактивних відходів (РАВ), де потрібна тільки електроенергія. Розглянуто можливість очищення опроміненого UO_2 від продуктів поділу (ПП) на стадіях магнітоплазмової переробки ВЯП, де передбачається поділ багатокomпонентного складу ВЯП як по масах, так і по відмінностях фізико-хімічних властивостей.

DEVELOPING THE CONCEPT OF MULTI-STAGE SPENT FUEL CLEANING FROM FISSION PRODUCTS BY PHYSICAL METHODS

*V.B. Yuferov, V.V. Katrechko, V.O. Ilchova, S.V. Shariy, A.S. Svichkar, M.O. Shvets,
E.V. Mufel, A.G. Bobrov*

An alternative to the PUREX process, which is used in industry for reprocessing of spent nuclear fuel, is technology that uses physical methods and contributes to reducing environmental pollution. Such methods include plasma spent fuel reprocessing, without increase of radioactive waste volume, where only electricity is required. The possibility of fission products removal from irradiated UO_2 at the stages of magnetoplasma reprocessing of spent fuel is considered, which provides separation of the multicomponent SNF composition both by mass and by the difference in physicochemical properties.