

PACS: 25.75.-q

OF THE POSSIBILITY OF SEPARATION OF ELEMENTS IN MULTICOMPONENT MIXTURE UNDER HEATING

V.B. Yuferov, V.V. Katrechko, S.V. Shariy, E.V. Mufel, V.O. Ilichova, A.S. Svichkar, K.I. Zhivankov, T.I. Tkachova, S.N. Khizhnyak

NSC "Kharkiv Institute of Physics and Technology" NASU

Kharkiv, 61108, st. Akamemicheskaya 1, Ukraine

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

Received October 12, 2014

Considered the elemental and isotopic composition of fission products in spent nuclear fuel. Analyzed thermal characteristics (melting point, evaporation temperature, the binding energy, the value of the vapor pressure) of the elements of spent nuclear fuel, and consider the possibility of removing impurities at the stage of thermal heating. Proposed simulation environment for the separation of spent nuclear fuel.

KEY WORDS: spent nuclear fuel, the binding energy, dimer, fision product, actinoids, mass separation.

ПРО МОЖЛИВІСТЬ РОЗДІЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ СУМІШІ ПРИ НАГРІВІ

В.Б. Юферов, В.В. Катречко, С.В. Шарій, Є.В. Муфель, В.О. Ілічова, О.С. Свічкарь, К.І. Живанков, Т.І. Ткачова, С.М. Хіжняк

Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України

Харків, 61108, вул. Академічна, 1

Розглянутий ізотопний склад продуктів ділення у відпрацьованому ядерному паливі. Проведений аналіз теплофізичних характеристик (температури плавлення, випаровування, енергії зв'язку, величини пружності парів) елементів відпрацьованого ядерного палива, розглянута можливість видалення сумішей на стадії термічного нагріву. Для моделювання процесу розділення відпрацьованого ядерного палива запропоновані імітаційні середовища.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: відпрацьоване ядерне паливо, енергія зв'язку, димер, продукти ділення, актиноїди, мас-сепарація

О ВОЗМОЖНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ ПРИ НАГРЕВЕ

В.Б. Юферов, В.В. Катречко, С.В. Шарий, Е.В. Муфель, В.О. Ильичева, А.С. Свичкарь, К.И. Живанков, Т.И. Ткачева, С.Н. Хижняк

ННЦ "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины

Харьков, 60108, ул. Академическая, 1

Рассмотрен элементный и изотопный состав продуктов деления в отработанном ядерном топливе. Проведен анализ теплофизических характеристик (температура плавления, температура испарения, энергия связи, величина упругости паров) элементов отработанного ядерного топлива, и рассмотрена возможность удаления примесей на стадии термического нагрева. Для моделирования процесса разделения отработанного ядерного топлива предложены имитационные среды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: отработанное ядерное топливо, энергия связи, димер, продукты деления, актиноиды, масс-сепарация

Переработка ОЯТ является одной из составляющих стратегии замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) в Украине, которая будет способствовать повышению ее энергетической и экономической независимости. В настоящее время переработка отработанного ядерного топлива (ОЯТ) проводится при использовании радиохимических методов, в частности с помощью пьюрек-процесса, который применяется во Франции, Англии, Японии, РФ. Однако, при этом образуется большое количество радиоактивных растворов, требующих дополнительной обработки перед захоронением [1]. Существующие газофторидные технологии создают значительно меньшее количество отходов, но они пока не отработаны. Развивается магнитоплазменная (МП) переработка ОЯТ, включающая МП разделение во вращающейся плазме на ядерное топливо (ЯТ) и продукты деления (ПД). Магнитоплазменная переработка осуществляется только физическими методами, не требующими химических реагентов, что в значительной степени снижает увеличение объемов радиоактивных отходов, несущих 90% радиоактивности. При отделении от ЯТ - ПД, актиноиды могут быть использованы вторично, а ПД подлежат захоронению.

Целью настоящей работы является исследование физических принципов разделения многокомпонентной смеси (ОЯТ) при её нагреве. Наиболее перспективной технологией для разделения ОЯТ на ПД и ЯТ, с нашей точки зрения, является магнитоплазменный метод разделения. Для реализации МП переработки ОЯТ были предложены последовательные стадии, которые включают нагрев до определенных температур, ионизацию (разделение, использующее различие в упругости паров, энергиях связи атомов в молекулах и потенциалов ионизации различных элементов) и собственно МП разделение на ЯТ и ПД во вращающейся в ЕхН полях плазме. Исследования по МП разделению ОЯТ проводятся в ННЦ ХФТИ [2-5]. В настоящее время исследуются физические принципы МП разделения, при умеренных геометрических параметрах сепарационной установки.

© Yuferov V.B., Katrechko V.V., Shariy S.V., Mufel E.V., Ilichova V.O.,

Svichkar A.S., Zhivankov K.I., Tkachova T.I., Khizhnyak S.N., 2014

Для этого определена возможность имитировать ОЯТ элементами различных масс с подбором физико-химических свойств элементов при различных параметрах разделительного устройства. В сепарационной установке проведены эксперименты по разделению инертных газов, имитирующих различие масс в ЯТ и ПД в пропорции 3:2:1 (Xe,Kr,Ar). При МП разделении групп элементов необходимо наличие следующих условий: столкновительный режим плазмы в области плазменного источника и области транспортировки плазмы при бесстолкновительном режиме в области разделения элементов по массам. Для уменьшения опасности возникновения самопроизвольной цепной реакции (СЦР) в реальных условиях предложены параметры плазменного источника (ПИ). Удельные энергозатраты магнитоплазменного разделения групп элементов оказываются умеренными. Поэтому МП переработка ОЯТ может стать весьма перспективной для Украины с достаточно плотно заселенной территорией и ограниченными водными и энергетическими ресурсами.

Многокомпонентный состав ОЯТ. Элементный состав ТВЭЛОВ при выгрузке из реактора простирается от 1 до ~100, а количество изотопов достигает ~2000. На рис.1 представлены наиболее распространенные элементы, составляющие ПД, в диапазоне порядковых номеров от 30 до 72 (по вертикальной оси) и атомными массами от 70 до 178 по горизонтальной оси, соответственно.

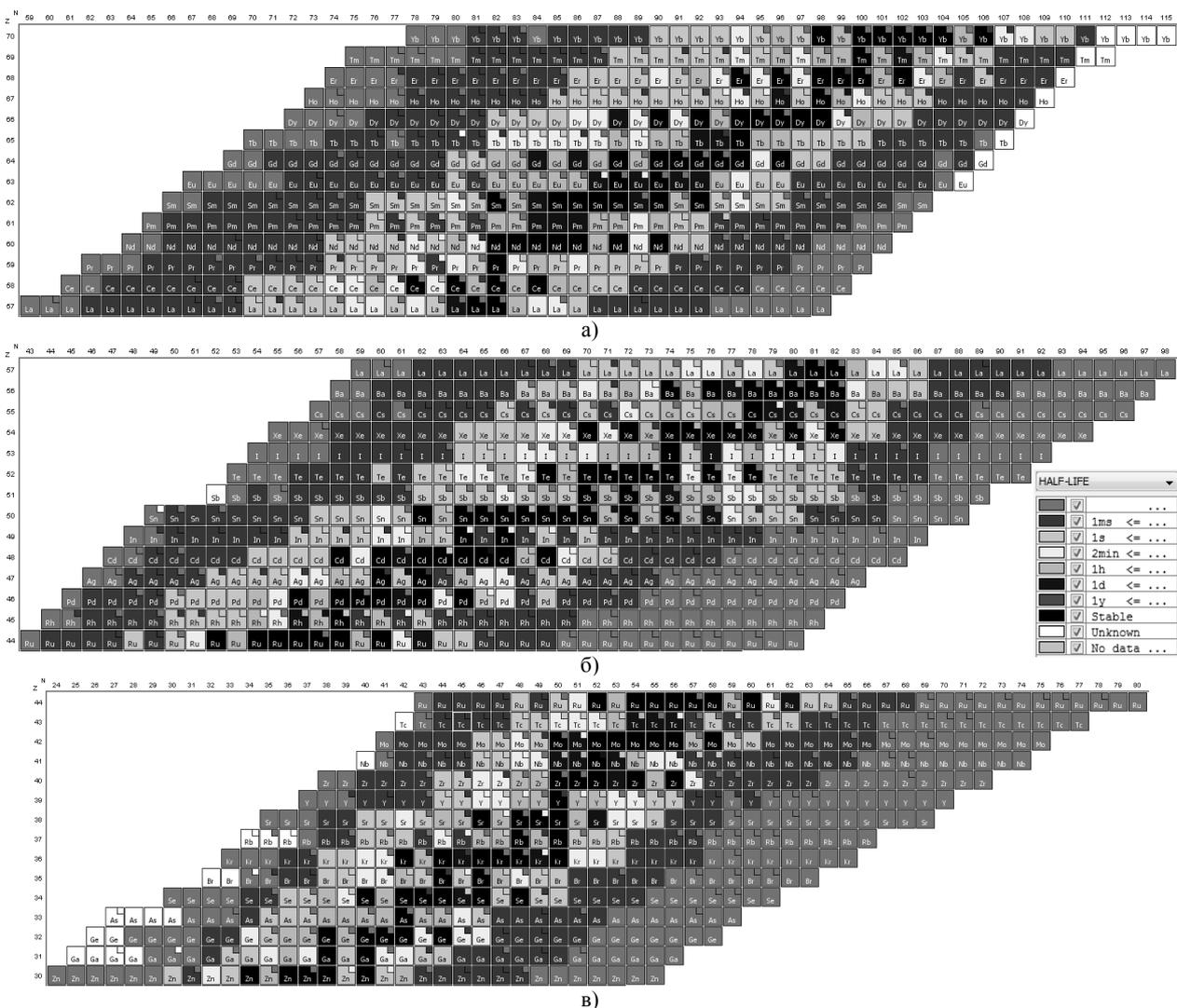


Рис. 1. Элементы и их изотопы с порядковыми номерами а) 57 до 70, б) 44-57, в) 30-44 (По вертикальной оси - число протонов, по горизонтальной – число нейтронов)

Из рис.1 видно, что у лантаноидов (рис.1а) имеется больше стабильных изотопов (темные квадраты), а более легкие элементы ПД (рис.1б,в) – имеют меньшее количество стабильных изотопов. В процессе 1-3х годичной выдержки ТВЭЛОВ в водных бассейнах за счет короткоживущих изотопов (β^+ , β^- переходов и захвате ядром внутренних орбитальных электронов) их общее количество сокращается, и радиоактивность 1 кг ОЯТ в приреакторных бассейнах приближается к ~1 тыс. Ки в сравнении с 25-170 тыс. Ки при извлечении ОЯТ из реактора [1].

В таблице 1 представлены основные радионуклиды, определяющие величину излучения [6] в ОЯТ.

Таблица 1

Радионуклиды, определяющие активность и токсичность ОЯТ.

Временной интервал, год	Определяющие радионуклиды
До 100	Fe-55, Co-58, Ni-59, Sr-90, Ru-106, Sb-125, Cs-134,137, Ce-144, Pm-147, Eu-154,155
100-1000	Sm-151, Co-60, Cs-137, Ni-59,63
1000-10000	Pu-239,240, Am-241
10^4 - 10^5	Np-237, Pu-239,240, Am-243, C-14, Ni-59, Zr-93, Nb-94
$>10^5$	I-129, Tc-99, Pu-239

На рис.2 представлен количественный состав ПД с массами от ~ 70 до 170, актиноидов и их окислов с массами от ~ 235 до 280. К актиноидам добавлена величина кратная 16(атомная масса кислорода). Высота пиков урана и малых актиноидов, МА, представлена в произвольных единицах.

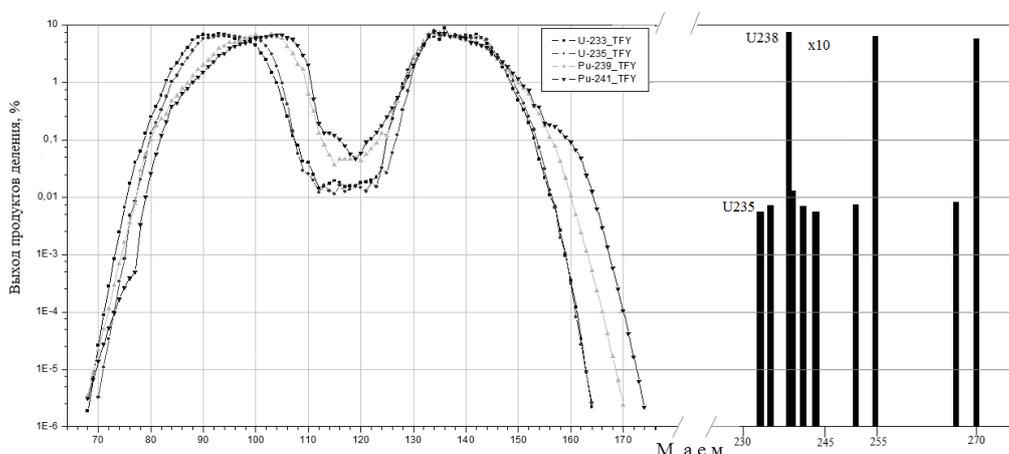


Рис.2. ЯТ и продукты деления ОЯТ как функция атомной массы[9]

Из таблицы 1 видно, что радионуклиды Fe,Co,Ni имеют высокую степень активности, однако, как следует из рисунка 2, они должны присутствовать в ОЯТ в малом количестве.

В [5,7] рассматривался процесс очистки ОЯТ от ПД путем нагрева и ионизации, что возможно при использовании топлива в виде металлического урана, однако, в большинстве энергетических реакторов Украины (Таблица 2), в основном, используются окислы урана, и изотопы урана в топливе, как правило, находятся в процентном соотношении: ^{238}U - 95...96,5%, а ^{235}U - 3,5...5%.

Таблица 2.

Тип реакторов и вид топлива [6]

Легководные ВВЭР	Тяжеловодные SGHWR	Газовые HTGR	РБМК	Быстрые
UO ₂	UO ₂	U, ThO ₂	U, UO ₂	U, UO ₂ ,PuO ₂

При облучении ЯТ нейтронами U-235 и Pu-239 делится, в основном, на два осколка и превращаются в такое же (по весу) количество ПД. Часть U-238, поглощая нейтроны, превращается в делящийся плутоний, вклад которого в энергетику реактора достигает ~30%. Появление Pu-239 сдвигает функцию распределения ПД в сторону больших масс, но на МП разделение ОЯТ это не должно повлиять, так как речь идет о разделении групп элементов, сильно различающихся по массам ($\Delta M \sim 70$ а.е.м.)

При выгорании 3-5% U-235 появляется 6-10 % ПД (по количеству ядер). Дополнительно к примесям нужно отнести и ПД плутония и малые актиноиды (МА) - Np, Am, Cm, то есть в ОЯТ появляется около 12-15% примесей (по количеству ядер), которые относительно равномерно распределены по объему топлива. Известно, что в ТВЭЛы загружается, прессуется и спекается порошкообразная двуокись урана, имеющая гранцентрированную кубическую структуру с 8-ю ближайшими соседями урана, которая может существенно изменяться при радиационном воздействии, и, исходя из общего количества ПД и ЯТ, рядом с 8-ю молекулами ЯТ практически везде оказываются ПД.

В процессе распада ядер U-235 и Pu-239 появляются разлетающиеся осколки деления, имеющие разнонаправленные, одинаковые импульсы, с кинетической энергией легкого и тяжелого осколков деления (в среднем) ~ 98 и ~67 для U-235 и ~100 и ~72 МэВ для Pu-239 (рис.3). Остальная энергия (17%) от общей, составляющей ~214МэВ для U-235 и ~201 МэВ для Pu-239 на акт деления соответственно, распределяется

приблизительно равномерно между мгновенным излучением γ -квантов, нейтронами деления, β^+ излучением, γ -излучением ПД, γ -излучением при захвате нейтронов и энергией, уносимой нейтрино. Однако на величину радиационных повреждений мишени влияет в основном энергия осколков ПД, а остальная часть энергии будет иметь на несколько порядков меньшее воздействие, в основном за счёт больших длин пробега частиц. Сечение лобовых столкновений ионов ПД с ядрами мишени (в основном, урана), на 6-10 порядков меньше сечений ионизации, диссоциации и возбуждения, поэтому ионы ПД практически не меняют своего направления при торможении. Остановившийся осколок деления, ПД, продолжает излучать проходя изотопные и элементные превращения.

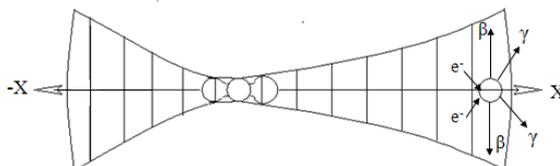
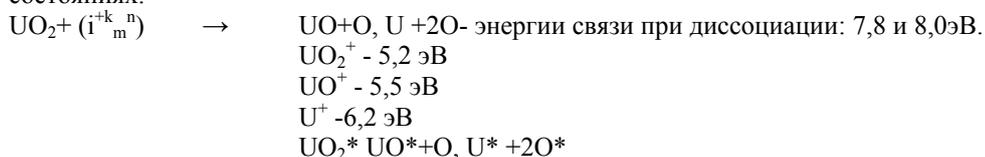


Рис.3. Схематический вид треков торможения ПД и последующее их излучение

Ионы ПД (ионизированные осколки деления) многозарядны, их ядра имеют избыток нейтронов, поэтому за времена $\sim 10^{-17}$ с ПД испускают нейтроны и гамма-кванты $\sim 10^{-14}$ с. Вначале заряд ионов ПД может достигать 10-20, и часть орбитальных электронов остается в треке торможения, (которое длится около 10^{-9} с) создавая условия для электропробоев и разрядов в треке. За это время осколки могут проходить в воздухе около 1см, а в плотных средах $\sim 10^{-3}$ см (что в 10^3 раз меньше диаметра ТВЭЛа). Заряд осколков определяется процессами в ядре (ряд бета-распадов) и электронной оболочке при торможении в мишени. Проходя через среду осколки теряют свою энергию на ионизацию, диссоциацию и возбуждение атомов среды, образуя до $5 \cdot 10^6$ ион-электронных пар (ei), при $E_{cp} \approx 34$ эВ/ei. Первичные электроны ионизации, образованные ПД, могут иметь энергию до $(4m/M)E$, где m – масса электрона, M – масса осколка деления, E – энергия осколка деления, т.е. около 10^3 эВ и, в свою очередь, проводят ионизацию мишени. В процессе торможения ПД в мишени молекул UO_2 , происходит диссоциация молекул на составляющие U, O, UO , O_2 в возбужденном и ионизированном состояниях.



Кинетическая энергия фрагментов молекул при их разлете может быть также вычислена из соотношения $(4m/M)E$. Энергия возбуждения для электронных уровней урана составляет $\sim 1-4$ эВ, колебательных и вращательных, соответственно $\sim 0,2$ эВ и $0,01$ эВ. Для равновесных условий суммарные энергии уровней приблизительно равны и составляют: $3/2kT$; $5/2 kT$; $7/2kT$.

В UO_2 матрице накапливаются радиационные повреждения: вакансии, междоузельные атомы, примеси, дислокации и т.д. В процессе охлаждения трека продукты диссоциации могут связываться с ПД, образуя новые соединения: ZrO , UJ , CeO , UO , CsH , UCe , PuO , $NpZr$ и др., рассеянные по топливу. Атомы газов, образующиеся в ОЯТ такие, как $H-1,2,3$, He , Kr , Xe , J , (при повышенной температуре ТВЭЛа), в основном, превращаются в пузырьки, создавая газовую пористость и увеличивая распухание. Эти соединения имеют разные энергии связи и потенциалы ионизации. В связи с длительным облучением при достаточно высокой температуре диффузионные процессы могут приводить к сегрегации примесей, как в виде окислов, соединений, так и элементов (молекул и атомов). Энергии связи различных димеров представлены в таблицах 3,4 [8].

В таблице 4 величины потенциалов взаимодействия отличающихся атомов (1 и 2), обозначенные *, были получены расчётным путём, используя известный прием молекулярной физики определения неизвестного потенциала взаимодействия молекул- ϕ_{12} по известным потенциалам ϕ_{11} и ϕ_{22} : $\phi_{12} = (\phi_{11} \phi_{22})^{0,5}$. Энергия связи димеров-атомов урана- U_2 : $\phi_{11} = 2,31$ эВ. Таким образом, энергия связи одного атома при 8-ближайших соседях урана в идеальной гранецентрированной решетке составит $\sum \phi_{11} \approx 18,5$ эВ. Вторые и третьи ближайшие соседи добавляют еще около 30% и полная энергия связи его в твердом теле составит около 30 эВ. В то же время выгорание топлива ($U+Pu$) составляет $\sim 4\%$. То есть около 800 МэВ на 100 ядер урана или 8 МэВ на каждый атом, что может обеспечить около $2,7 \cdot 10^5$ смещений на атом(сна) в ОЯТ. В конструктивных элементах современных реакторов эта величина находится на уровне 50 сна и в будущих реакторах на быстрых нейтронах предполагается на уровне 150 сна.

Как видно, соединения с кислородом имеют наиболее высокую энергию связи. Энергия связи соединений с водородом и некоторых димеров металлов ($W-W, Nb-Nb$) также имеют существенную величину, в то время как инертные газы создают димеры с энергией связи не более 0,45 эВ. Разноатомные димеры занимают по энергии промежуточное положение. В дальнейшем, за время выгорания ТВЭЛОВ димеры, диффундируя в матрице UO_2 , могут соединяться в кластеры больших размеров. Особенно это относится к благородным газам

(He,Kr,Xe), имеющим малые энергии связи с матрицей. Т.е. при нагреве и ионизации ОЯТ могут десорбироваться газы, элементы и соединения с большими упругостями пара, малыми потенциалами ионизации и меньшими, чем у окислов урана, энергиями диссоциации молекул. Реально процесс десорбции и испарения будет более сложным, и температуры будут не соответствовать упругостям паров для многих простых соединений, что видно из таблиц димеров.

Таблица 3

Энергии связи различных димеров

A-B	Cs ₂	Na ₂	Sn ₂	U ₂	Au ₂	Ta ₂	Mo ₂	Nb ₂	W ₂
eV	0,46	0,66	1,94	2,31	3,3	4,05	4,52	5,33	6,92
A-B	Y ₂	In ₂	Ga ₂	Zr ₂	Li ₂	Cd ₂	Ge ₂	Pt ₂	Xe ₂
eV	1,63	0,83	1,18	1,5	1,05	0,04	2,5	0,93	0,024

Таблица 4

Энергии связи различных соединений с водородом,кислородом и ураном

A-B	eV	A-B	eV	A-B	eV	A-B	eV	A-B	eV
Hg-H	0,41	S-H	3,67	F-O	2,28	O-O	5,18	U-Zr	1,87*
Hg-D	0,44	Br-H	3,77	Zn-O	2,6	Nd-O	7,3	U-J	1,9*
Hg-T	0,45	Cl-H	4,46	Na-O	2,8	Gd-O	7,42	U-Nb	3,58*
Mg-H	1,32	H-H	4,52	K-O	2,82	Nb-O	7,54	U-Mo	3,1*
Na-H	1,93	H-T	4,57	Mg-O	3,72	Np-O	7,59	U-Cs	1,03*
Nb-H	2,3	N-H	4,59	Ca-O	3,98	Pr-O	7,68	U-Cd	0,3*
Bi-H	2,94	D-D	4,6	Mg-O	4,03	U-O	7,84	U-Fe	1,45*
J-H	3,07	D-T	4,62	Be-O	4,07	Zr-O	7,96	U-Ni	2*
Pt-H	3,43	F-H	5,85	Fe-O	4,23	Ce-O	8,2	Zr-Nb	2,87*

На рис.4 схематически представлены элементы ЯТ и ОЯТ размером в $4 \times 5 \times 5$ элементарных ячеек UO_2 мишени-матрицы с примесями ПД, образованными в нем. Для упрощения модели все атомы и молекулы в ячейке имеют одинаковый размер. Белые и черные квадраты, соответственно молекулы UO_2 и ПД, а заштрихованные – малые актиноиды (МА). При равномерном распределении, в первом монослое из 20 молекул должны присутствовать приблизительно $\sim 2,5$ атома ПД, и $\sim 0,3$ атома МА (присутствует один), т.е. в 2-3 последующих слоях атомы МА не присутствуют. Одновременно с этим могли появиться 2 атома кислорода (перечеркнутые квадраты), ранее связанные с атомом разделившегося урана, однако, энергия разлета ПД намного превышает энергию молекулярной связи. Такие атомы кислорода молекул UO_2 приобретают энергию при распаде, тормозятся и диффундируют в матрице молекул UO_2 . Энергия, выделенная в области распада ядер приводит к диссоциации, ионизации и возбуждению ближайших соседних атомов в структуре мишени и создает здесь область радиационных повреждений. Замедленные атомы ПД, кислорода, МА, диффундируя, могут далее соединяться в димеры (химические реакции) и далее кластеризоваться. В связи с большей или меньшей энергией связи у соседних атомов, кислород может переходить к атомам или молекулам других элементов, т.е. и далее могут происходить химические реакции.

Распад ядер U-235 и Ри-239 происходит практически в каждом монослое. Однако продукты деления этого ядра оказываются на расстояниях в десятки тысяч атомных слоев от места возникновения, импульсно нагревая трек своего замедления на десятки тысяч градусов выше температуры ТВЭЛа. Благодаря этому величины процессов диффузии могут многократно возрастать (рис.4). Количество образованных ион-электронных пар (dE/dx) возрастает по мере уменьшения энергии осколка E, в связи с ростом сечений ионизации σ_i , диссоциации $\sigma_{дис}$ и возбуждения σ^* , суммарная величина будет равна: $\sigma_{\Sigma} = \sigma_i + \sigma^* + \sigma_{дис} \sim 1/E$.

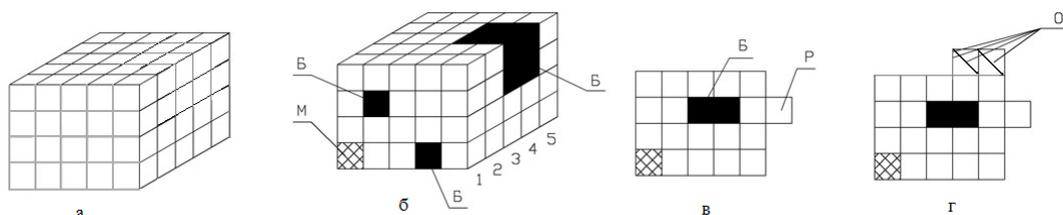


Рис.4. Элемент условной решетки ТВЭЛа до и после выгорания ЯТ и торможения осколков ПД.

а – элемент до облучения, б – после облучения, в – кластеризация примесей деления и увеличение объема – распухание, из-за появления двух ядер вместо одного, г – появление атомов кислорода после реакции деления и уходе осколков ПД и возможные химические реакции кислорода с некоторыми пришедшими осколками

Выведение примесей ПД из ОЯТ на стадии нагрева. На рис. 5 представлены температуры плавления и испарения чистых элементов [9], а также плавления их окислов. В связи с наличием у многих элементов нескольких соединений с кислородом (по числу атомов) и, соответственно, нескольких энергий связи и температур плавления, введены вертикальные прямые, соединяющие между собой эти окислы (количество атомов кислорода в них различно).

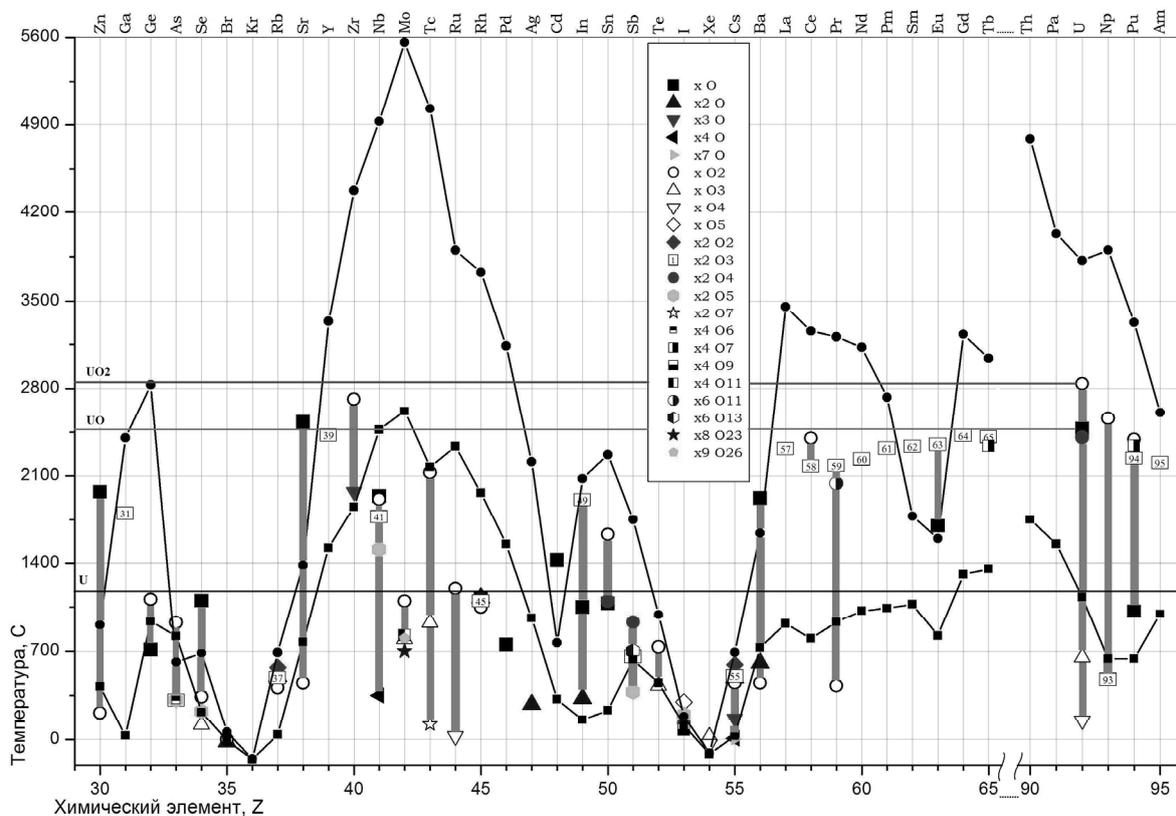


Рис. 5. Температуры плавления – ■ и испарения – ● чистых атомов, а также их окислов

Как видно, переход от металлов к оксидам несколько изменяет ситуацию при нагреве ОЯТ. Для первого пика, от Zn до As наблюдается уменьшение температур плавления. Для второго, от Rb до Sr это имеет место только для 3-х элементов, у Sr, Y, Zr температуры оказались выше. Для Nb, Mo, Tc, Ru – температуры стали существенно ниже. Для пика Cd-J, элементов Cd, In, Sn, температуры стали существенно выше. Существенным стало увеличение температуры у Ba и лантаноидов. Но, главное, появилась зависимость от валентности металла, т.е. количества присоединенных атомов кислорода. В отличие от единой точки плавления металла, окислы могут иметь разброс в температурах плавления ~1000С. Распад ядер урана в замкнутой системе ТВЭЛа (по числу частиц) способствует появлению свободного кислорода, который может связаться со Sr, Zr и лантаноидами: La, Ce (энергия связи-близка к связям урана), но этих последних ядер меньше, чем образовалось кислорода, а для урана это эквивалентно образованию $UO_{2,25}$; либо некоторого количества U_3O_7 , U_3O_8 , UO_3 .

Об усложнении ситуации может свидетельствовать и рис.6 [7], где представлены энергии диссоциации окислов. Сравнение рис.6 и рис.5 показывает отличие термического отделения части элементов с номерами 38-72 от актиноидов для металлического ЯТ. Температуры плавления металлов, окислов и их энергии связи имеют различные величины, что может свидетельствовать о различной их испаряемости при одинаковых температурах из их смесей. Существенно ниже энергии связи и у Fe, Ni, Co, поэтому этих окислов быть не должно и они будут диффундировать в виде атомов. В смеси вместе с металлическим U останутся металлы Zr, Mo, Nb, Tc, лантаноиды и малые актиноиды, которые составят плазму и рабочий материал для МП разделения ОЯТ для металлического ЯТ.

В [7] рассматривались энергии диссоциации различных окислов, где был сделан вывод, что небольшое количество окислов ПД имеют энергии диссоциации, близкие и превосходящие величины связи окислов урана. Это элементы, относящиеся к четырем заштрихованным участкам (рис.6): 1-ый- Ge, 2-ой -Zr, Mo, Nb, Tc и 3,4-ый - лантаноиды – La, Ce, Nd, Pr; Sm, Eu, Gd. Однако, в ПД количество элементов 1-ого и 4-ого участков находится на уровне ~ 3-10⁻³%, и их примеси в ЯТ могут не учитываться. По этой же причине можно не учитывать и жаростойкие W, Os и Th. Таким образом, из рис.5 видно, что отделение ПД 2-го и 3-го участков от ЯТ по этому принципу неэффективно, то есть они будут находиться в смеси вместе с окислами актиноидов, и для их отделения от ЯТ потребуется МП-разделение групп элементов во вращающейся плазме. Таким образом,

если для металлического топлива можно рассматривать результаты рис.5, то для окисного топлива важны результаты рис. 4, где оказываются важными значения упругости пара соединений с различным числом атомов, то есть имеется некоторое различие при выборе имитационной среды для окисного и металлического топлива.

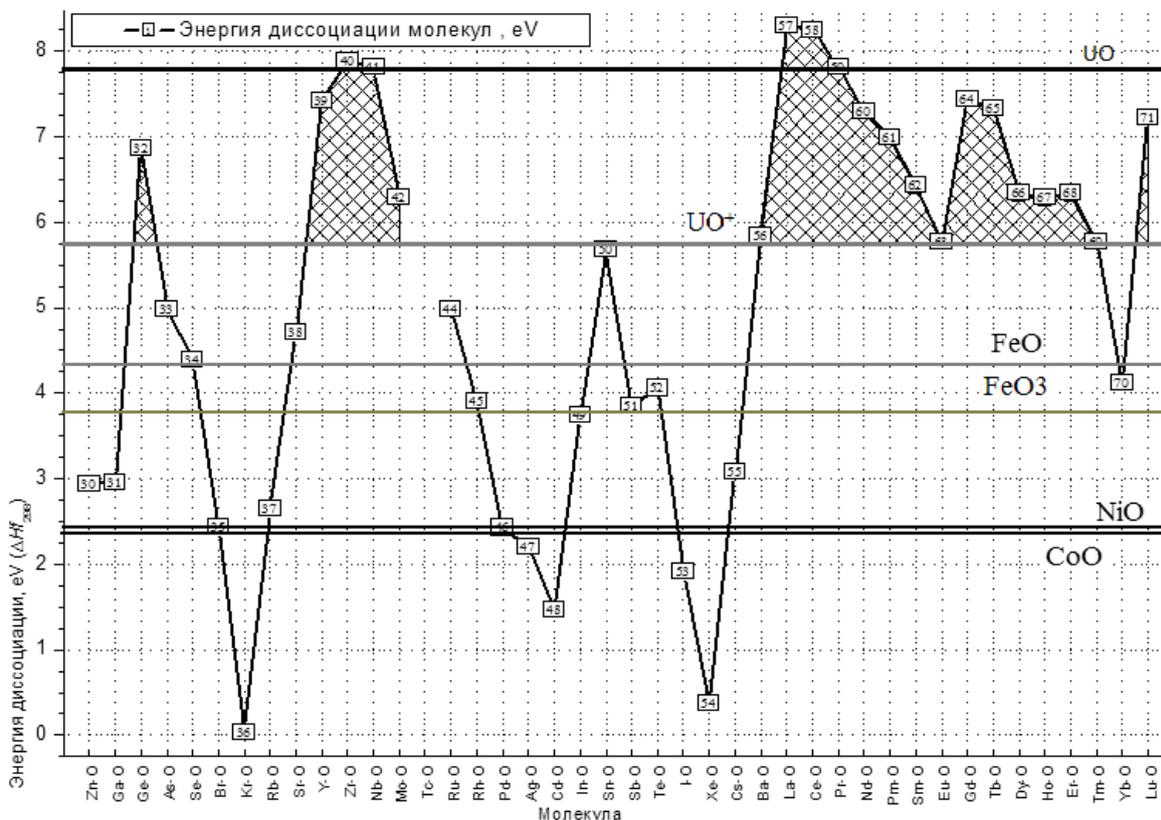


Рис. 6. Энергии диссоциации окислов некоторых металлов

Величины упругостей паров некоторых чистых металлов и их окислов представлены на рис.7. При давлении ~ 1 Тор [7] скорости испарения большинства элементов, составляют около $\sim 10^{-2}$ г/см²с, что при полной ионизации в плазменном источнике (ПИ) позволит получать потоки ионов около ~ 10 А/см², что важно для производительности метода МП разделения. Как видно, упругости паров чистых элементов и их окислов существенно различаются, например: Mo, W, U. Кроме того, упругости паров смесей в среде UO₂ могут существенно отличаться (и по времени нагрева), что потребует дополнительных исследований по скоростям испарения. Аналогичная ситуация получается для радионуклидов Fe, Ni, Co. Хотя известно, что наличие в продуктах испарения каждого окисла определяется его статистическим весом в смеси.

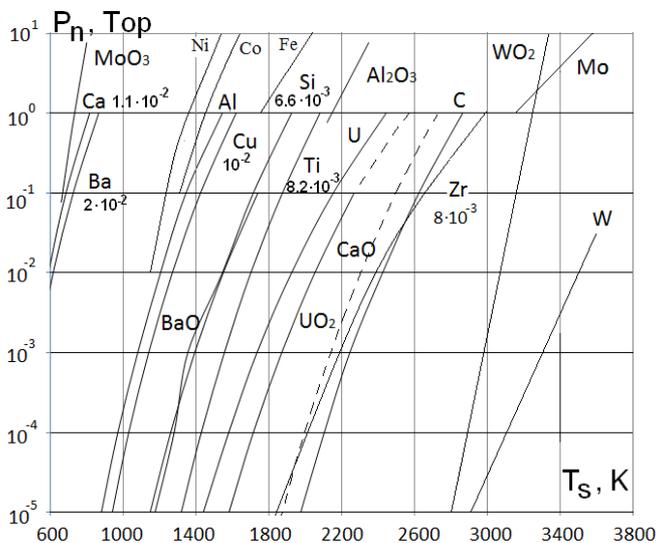


Рис.7. Давление паров некоторых металлов и окислов в зависимости от температуры

ВЫВОДЫ

Стадия термического нагрева позволяет вывести большое количество элементов из многокомпонентной смеси металлов и окислов. После нагрева в ОЯТ, кроме окислов ЯТ, остаётся ограниченное количество окислов ПД, в основном, Sr, Zr и лантаноидов, которые в дальнейшем, при ионизационной и МП-сепарации, составят молекулярную плазму ОЯТ. Для моделирования доочистки ЯТ от ПД во вращающейся в скрещенных ЕхН полях плазме, наиболее подходящей имитационной средой оказываются нерадиоактивные окислы элементов U-238, Sr, Zr, Nb, Ba, Ce, остающиеся в ОЯТ после стадий нагрева и ионизации. Однако, учитывая определенные трудности при работе с урансодержащими материалами для МП-разделения элементов по массам, возможно использовать, например, окислы бария (BaO) в качестве окислов ЯТ и окислы Sr, циркония (ZrO₂) в качестве окислов ПД, что существенно упрощает и удешевляет эксперимент, который целесообразно провести перед работой с окислами U-238.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nekljudov I.M. Obrashhenie s otrabotannym yadernym toplivom i radioaktivnymi othodami. Yadernaja energetika. – Kiev: «Naukova dumka», 2006. – 253s.
2. А.С. №714997 SSSR. Sposob razdeleniya po massam smesej izotopov, elementov i soedinenij, nahodyashhihsya v plazmennom sostoyanii / V.V. Vlasov, I.I. Zaljubovskij, M.G. Krivonos, A.M. Rozhkov, M.V. Sosipatrov, K.N. Stepanov, V.I. Farenik (SSSR) - №2607845 // Zajavleno 19.04.78. Opublikovano. 15.10.1979.
3. Yegorov A.M., Yuferov V.B., Shariy S.V., Seroshtanov V.A., Druy O.S., Yegorenkov V.V., Ribas E.V., Khizhnyak S.N., Vinnikov D.V. Preliminary Study of the Demo Plasma Separator // Problems of Atomic Science and Technology. – 2009. – No.1(59). – P.122-124.
4. Yuferov V.B., Ilycheva V.O., Druy O.S., Shariy S.V. About some features of Magnetoplasma Processing of Spent Nuclear Fuel // Issues of the Nuclear Science and Technology. Series: Nuclear and Physical Studies. – 2012. – Vol.59. – No.4(80). – P.191-193.
5. Yuferov V.B., Shariy S.V., Mufel E.V., Ilichova V.O. Peculiarities of the magnetoplasma separation of the groups of heated and ionized elements // Issues of the Nuclear Science and Technology. Series: Nuclear and Physical Studies. – 2014. – Vol. 62. – No.3(91). – P.222-226.
6. Bekman I.N. Yadernaja industriya. Kurs lekciy. Moskovskij gosudarstvennyj universitet im. M.V. Lomonosova. Lekciya № 21. – 2005.
7. Yuferov V.B., Shariy S.V., Katrechko V.V., Mufel E.V., Svichkar A.S., Ilichova V.O., Khizhnyak S.N. Features of molecular plasma SNF after heating and ionization // Problems of Atomic Science and Technology. – 2014. – No.5(93). – P.63-68.
8. Smirnov B.M., Yacenko A.S. Svoystva dimerov. Obzory aktual'nyh problem // Uspehi fizicheskikh nauk. – 1996. – T.166. – No.3.
9. JEFF-3.1. Joint Evaluated Fission and Fusion File, Incident-neutron data, <http://www-nds.iaea.org/exfor/endlf00.htm>, 2 October 2006; A. Koning, R. Forrest, M. Kellett, R. Mills, H. Henriksson, Y. Rugama, The JEFF-3.1 Nuclear Data Library, JEFF Report 21, OECD/NEA, Paris, France, 2006, ISBN 92-64-02314-3.