

них масс-продуктов деления ОЯТ приближаются к упругостям пара малых актиноидов – урана и плутония.

Наиболее вероятные элементарные процессы, происходящие при этом, схематически представлены уравнениями, определяющими создание плазмы из ОЯТ: диссоциация, диссоциативная ионизация, ионизация, относящаяся к оксидам урана, продуктам деления ($\Sigma_{\text{ПД}} M$), малым актиноидам (МА),

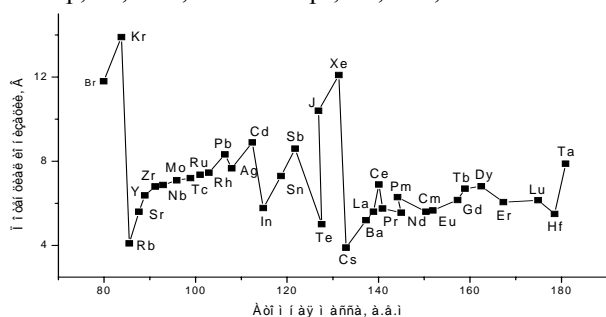
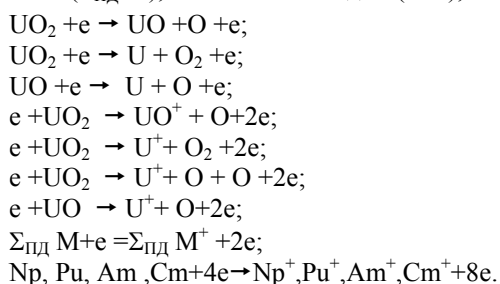


Рис.1. Потенциалы ионизации элементов, продуктов деления ОЯТ. Потенциалы ионизации актиноидов: U, Pu, Np, Am, Cm, соответственно равны 6,2; 5,7; 5,9; 5,99; 6,02 (В)

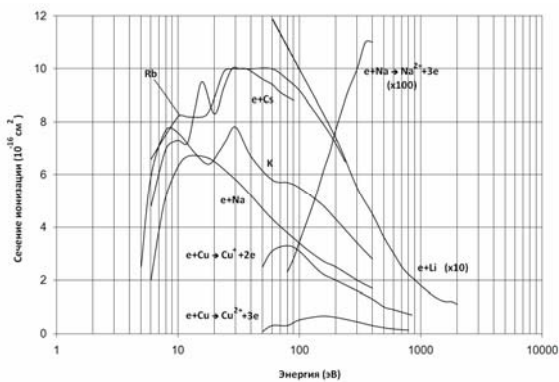


Рис.2. Сечения ионизации щелочно-земельных металлов и меди [6], выбранные в качестве имитаторов ОЯТ

Как видно из Рис.1 и 2 в процессе ионизации и создания плазмы при низкой электронной температуре будет проходить вторая стадия сепарации, определяющаяся существенным различием сечений ионизации элементов с большими и меньшими потенциалами ионизации. Часть элементов с более высокими потенциалами ионизации ионизована не будет и сконденсируется на стенках камеры вблизи плазменного источника, тогда как плазма элементов с меньшими потенциалами ионизации будет двигаться вдоль магнитного поля [7]. Таким образом, актиноиды очищаются от части продуктов деления уже на стадии ионизации.

Связанные с созданием плазмы энергетические потери выражаются как [4]:

$$P(A,z) = P_{\text{л}}(A,z) + P_{\text{р}}(A,z) + P_{\text{т}}(A,z),$$

где $P_{\text{л}}(A,z)$ – линейчатое излучение; $P_{\text{р}}(A,z)$ – рекомбинационное излучение; $P_{\text{т}}(A,z)$ – тормозное излучение. Для низкотемпературной плазмы, $T_e \sim 5$ эВ, тормозным излучением, как и циклотронными потерями и потерями на перезарядку, можно пренебречь.

Используя экспериментальные данные [4, 5], можно сделать соответствующие оценки для многокомпонентной плазмы ОЯТ.

В [2] приведены энергетические затраты на разделение магнитоплазменным методом многокомпонентной плазмы ОЯТ, составляющие около $\epsilon_{\text{ei}} = 500$ эВ/еи, (эВ на ион-электронную пару), или 56 кВт·ч/кг.

Рассмотрим данные [4] для водородной плазмы с малыми добавками элементов легких (углерод – 1 %) и средних масс (железо – 0,1 %). Излучательные энергетические затраты составляют 1 и 0,3 Вт/см³ плазмы с плотностью 10^{14} см⁻³ при $T_e = 12$ эВ. Однако для расчета удельных энергетических затрат ϵ_{ei} (эВ/еи) необходимо знание времени жизни плазмы τ , $\epsilon_{\text{ei}} = P(A,z)\tau/n$. Экспериментально полученные энергетические величины [5] для многокомпонентных плазм плотностью $\sim 1,7 \cdot 10^{13} \dots 10^{14}$ см⁻³ и $T_e \sim 10$ эВ, имеющих состав: 40 %Ti, 53 %Kr, 4,2 %Xe, 2,4 %N₂, 0,6 %O₂ составляют $-3,0$ Вт/см³; 88,9 %Kr, 7 %Xe, 4 %N₂, 0,1 %O₂ – 0,8 Вт/см³; 40 %Ti, 55,5 %H₂, 1 %N₂, 1 %O₂, 2 %C, 0,5 %Fe – 2,3 Вт/см³ при временах жизни плазмы $\tau \approx (1; 2; 1,5)$ мс соответственно. Отсюда значения минимальной и максимальной величин удельных энергий ϵ (эВ/еи) соответственно равны: $0,18 \dots 1,06 \cdot 10^3$; $0,95 \dots 5,6 \cdot 10^2$; $0,2 \dots 1,2 \cdot 10^3$. Наиболее вероятной величиной является максимальная. Более точные оценки могут быть сделаны при учете профилей плотности и температуры. Для плазмы ОЯТ энергетические затраты будут не менее представленных выше величин.

Эти величины целесообразно сравнить с данными [3] энергетических затрат на разделение изотопов урана для электромагнитного однолучевого сепаратора С-2 ИАЭ им. Курчатова, с токами пучка 5...15 мА, для $M=200$ производительностью 50 мг/ч. Экстраполяция для $M=240$ дает производительность $m = 58,5$ мг/ч. Общие энергетические затраты сепаратора С-2 таковы: магнитное поле – $W_{\text{магн}} = 14$ кВт, ускорение ионов – $W_{\text{уск}} = 0,9$ кВт, ионизация – $W_{\text{и}} = 1,3$ кВт, вакуумная система – $W_{\text{вак}} = 7,8$ кВт, охлаждение – $W_{\text{охл}} = 1$ кВт. Суммарные энергетические затраты равны 25 кВт, на ускорение и создание плазмы – 2,4 кВт. Учитывая последнее, получаем величину $\epsilon = 3,5 \cdot 10^5$ эВ/и. Причиной столь больших величин может быть интенсивное рециклирование при извлечении ионов поперек магнитного поля. Действительно, площадь отверстия эмиссии ионного источника в 30-100 раз меньше боковой поверхности разрядной камеры. Отсюда следует, что для регенерации ОЯТ предпочтительны системы с отбором ионов вдоль магнитного поля.

Как указывалось выше, накопление заурановых элементов в МОХ-топливе ограничивает число циклов регенерации и был бы желателен процесс извлечения нептуния, америция и кюрия из ураноплутониевого топлива магнитоплазменным методом. Следует заметить, что из-за перекрытия масс разделение по ларморовским радиусам невозможно. Выше были приведены потенциалы ионизации актиноидов. При рассмотрении данных Рис.2 можно сделать вывод, что вблизи порогов ионизации при изменении величины T_e величины сечений ионизации могут существенно различаться, поэтому система с несколькими каскадами ионизации и осаждения позволит провести грубое разделение элементов, т.е. провести очистку урана от заурановых элементов магнитоплазменным методом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И.М. Неклюдов. *Ядерная энергетика. Обращение с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами*. Киев: «Наукова думка», 2006, с.253.
2. В.А. Жильцов, В.М. Кулыгин, Н.Н. Семашко, А.А. Скворода, В.П. Смиронов, А.В. Тимофеев, Е.Г. Кудрявцев, В.И. Рачков, В.В. Орлов. Применение методов плазменной сепарации элементов

к обращению с ядерными материалами // *Атомная энергия*. 2006, т.101, в.4, с.302-306.

3. *Изотопы: Свойства. Получение. Применение* / Под редакцией В.Ю. Баранова. Москва, 2005.
4. К. Барнетт, М. Харрисон. *Прикладная физика атомных столкновений. Плазма* / Перевод с англ. В.И. Пистуневич. М.: «Энергоатомиздат», 1987.
5. Ю.В. Ковтун, А.И. Скибенко, Е.И. Скибенко, Ю.В. Ларин, В.Б. Юферов. Излучение многокомпонентной плазмы импульсного отражательного разряда // *Вестник "ХПИ". Тематический сборник «Техника и электрофизика высоких напряжений»*. 2009, в.39, с.91-99.
6. C.F. Barnett. et al. Atomic data for controlled fusion research. ORNL-5207.V-II. 1977.
7. В.Б. Юферов, А.М. Егоров, С.В. Шарый, О.С. Друй, В.О. Ильичева, М.О. Швец, А.С. Свичкар, Т.И. Ткачева. О некоторых особенностях сепарационных устройств с вращающейся плазмой в скрещенных электрическом и магнитном полях // *Вісник НТУ "ХПИ"*. 2011, №60, с.103-116.

Статья поступила в редакцию 25.05.2012 г.

ON SOME PECULIARITIES OF SPENT FUEL MAGNETOPLASMA PROCESSING

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

The peculiarities of spent fuel plasma processing in different stages are considered. Energy losses, accompanying this process are estimated. Possibility of actinoids' separation by plasma method is presented.

ПРО ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ МАГНІТОПЛАЗМОВОЇ ПЕРЕРОБКИ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

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

Розглянуто особливості плазмової переробки відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) на різних стадіях. Оцінені енерговитрати, супроводжуючі цей процес. Розглянута можливість сепарації актиноїдів плазмовим методом.