

УДК 66.061.34

DOI: 10.15372/ChUR2021308

Применение нитрата алюминия в процессе экстракционной переработки отработавшего ядерного топлива

В. А. КАРЕЛИН, И. В. ПЕТЛИН, Н. А. ЖУРАВЛЕВ, Н. В. КАРЕЛИНА, И. В. РАСПУТИН

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск (Россия)**E-mail: vakarelin@tpu.ru*

(Поступила 16.02.21)

Аннотация

Проведено исследование влияния высаливателя, нитрата алюминия ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3$), на экстракционные свойства нитратов уранила и плутонила – $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ и $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2$ соответственно. Показано, что в растворах 4–8 М HNO_3 (водная фаза) при увеличении концентрации $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ от 0.1 до 1 М при экстракции в 30 % растворе трибутилфосфата (ТБФ) в углеводородном растворителе (органическая фаза) коэффициент распределения урана резко возрастает. В присутствии $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ значительно увеличивается коэффициент распределения Pu^{6+} по сравнению с другими валентными формами плутония. Эффективность действия высаливателя увеличивается с возрастанием концентрации ТБФ в органической фазе: в присутствии 0.1–2.0 М $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ величина коэффициента распределения Pu^{6+} в 30 % растворе ТБФ возрастает в 3 раза быстрее, чем в 4.5 % его растворе. В присутствии $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ возрастает эффективность восстановительной реэкстракции шестивалентного плутония (Pu^{6+}) четырехвалентным ураном (U^{4+}). В присутствии 1 М $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ коэффициент распределения PuO_2^{2+} не превышает 1.0 даже при низких концентрациях $\text{U}(\text{NO}_3)_4$ (50 г/л) и HNO_3 (0.5 М). Концентрация HNO_3 в водной фазе сильно влияет на изменение коэффициента распределения Pu^{6+} . Однако с ростом концентрации $\text{U}(\text{NO}_3)_4$ в реэкстрагирующем растворе скорость снижения коэффициента распределения Pu^{6+} падает. При увеличении концентрации $\text{U}(\text{NO}_3)_4$ с 50 до 150 г/л этот параметр уменьшается в 2.6 раза, а в более концентрированных растворах $\text{U}(\text{NO}_3)_4$ (150–250 г/л) – в 1.1 раза.

Ключевые слова: высаливатель нитрат алюминия, нитрат уранила $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$, нитрат плутонила $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2$, трибутилфосфат, коэффициенты распределения урана и Pu^{6+} , четырехвалентный уран (U^{4+})

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в экстракционной технологии переработки керамического ядерного топлива [1] разделение урана и плутония осуществляется путем экстракции U^{6+} и Pu^{4+} в виде нитратов уранила и плутонила – $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ и $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2$ соответственно [2, 3]. В России предложена экстракционная технология переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) [4, 5], основанная на совместной экстракции U^{6+} и Pu^{4+} в растворе 1.5–3.5 М HNO_3 с последующей последовательной реэкстракцией сначала захва-

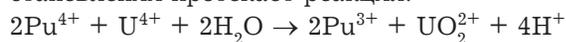
ченных продуктов деления (Np, Tc, Mo, Zr, ^3H и др.), а затем восстановительной реэкстракцией нитритом натрия Pu^{4+} и U^{6+} в слабокислом растворе HNO_3 [6]. Исследована зависимость коэффициентов распределения (α) катионов UO_2^{2+} , Th^{4+} , Pu^{4+} и Am^{3+} между органической (ОФ) и водной фазами (ВФ) от концентрации HNO_3 . В качестве экстрагента используется трибутилфосфат (ТБФ), находящийся в углеводородном растворителе. С ростом концентрации азотной кислоты $\alpha_{\text{UO}_2^{2+}}$, $\alpha_{\text{Th}^{4+}}$, $\alpha_{\text{Pu}^{4+}}$ резко увеличиваются [7]. Однако при концентрации кислоты выше 6 М их величины снижаются, так как в этих

условиях кислота экстрагируется более активно и поэтому уменьшает концентрацию свободного ТБФ.

По мере насыщения ОФ катионами U^{6+} величина $\alpha_{UO_2^{2+}}$ понижается, но в то же время наблюдается вытеснение из ОФ и плутония. При насыщении ОФ катионами Pu^{4+} значения $\alpha_{Pu^{4+}} < 1$, поэтому эффективность экстракционного выделения Pu^{4+} резко падает [8]. По методике, описанной в [4], экстракцию проводят при концентрации HNO_3 1.5–3.5 М. При этом $\alpha_{Pu^{4+}} < 20$, что также недостаточно для обеспечения эффективности технологии. Кроме того, поскольку в полученном экстракте находятся продукты деления (ПД), такие как нептуний, технеций, молибден, цирконий и другие, то необходимо их последовательно реэкстрагировать из ОФ в условиях, когда уран и плутоний остаются в экстрагенте.

В результате при проведении реэкстракции ПД необходимо жестко соблюдать условия процесса (по кислотности среды) и, как следствие, в основной процесс вводится дополнительная операция реэкстракции ПД. Еще один недостаток процесса – длительный контакт экстрагированного циркония с экстрагентом и разбавителем, приводящий к их радиационному поражению за счет разложения ТБФ на моно- и дибутилфосфорные кислоты. Вследствие этого необходимо применение сложной и дорогой отмывки ОФ. В результате проведение процесса по предложенной схеме становится затратным и не может конкурировать с действующими схемами, принятыми во Франции, Великобритании и Японии.

Обычно в качестве восстановителя применяют U^{4+} в виде $U(NO_3)_4$. Он имеет высокий окислительно-восстановительный потенциал. При восстановлении протекает реакция:

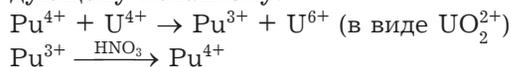


Скорость восстановления увеличивается с уменьшением кислотности раствора и зависит от концентрации U^{4+} . Чем выше концентрация U^{4+} в восстанавливаемом растворе, тем эффективнее протекает восстановление. Продолжительность восстановления Pu^{4+} ураном (4+) не превышает 0.3 мин при времени пребывания растворов в зоне экстрактора 3–4 мин.

Окисление U^{4+} до UO_2^{2+} протекает с высокой интенсивностью, поскольку последний экстрагируется и постоянно уходит из зоны реакции, переходя в ОФ. Вместе с UO_2^{2+} извлекается и азотистая кислота, являющаяся стабилизатором процесса. Восстановление Pu^{4+} ураном (4+) проходит как в водной, так и в органической

фазах. Скорость восстановления Pu^{4+} до Pu^{3+} независимо от восстановителя можно увеличить, если процесс проводить при повышенной температуре. Однако в этих условиях в восстановительный раствор реэкстрагируется уран.

В промышленных условиях расход восстановителя U^{4+} в виде $U(NO_3)_4$ выше его стехиометрического количества. Перерасход восстановителя объясняется окислением Pu^{3+} в получаемом продукте. В экстракторе на выходе ВФ и в секции отмывки урана из ВФ плутония в сильно кислой среде (1–2 М HNO_3) часть Pu^{3+} быстро окисляется до Pu^{4+} . На ступени ввода свежего восстановителя он снова восстанавливается до трехвалентного неэкстрагируемого состояния. Следовательно, в зоне восстановления происходит частичная рециркуляция плутония по следующему механизму:



Таким образом, все существующие способы разделения урана и плутония основаны на совместной экстракции U^{6+} и Pu^{4+} с частью ПД, последующей многоступенчатой реэкстракции этих ПД, последовательной восстановительной реэкстракции Pu^{4+} ураном (4+), а затем реэкстракции U^{6+} (в виде $UO_2(NO_3)_2$) азотной кислотой с концентрацией 0.5–0.8 М [9, 10].

Цель настоящей работы – исследование возможности применения высаливателя, нитрата алюминия ($Al(NO_3)_3$), и обоснование необходимости применения Pu^{6+} (в виде $PuO_2(NO_3)_2$) в экстракционном процессе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

Нитрат уранила $UO_2(NO_3)_2$ – раствор с концентрацией 250 г/дм³ в 0.7 М HNO_3 (квалификация “х. ч.”).

Нитрат плутонила $PuO_2(NO_3)_2$ – раствор с концентрацией 20 г/дм³ в 2.5 М HNO_3 (квалификация “х. ч.”).

Нитрат урана(IV) $U(NO_3)_4$ – раствор с концентрацией 350 г/дм³ в 0.7 М HNO_3 (квалификация “х. ч.”).

Нонагидрат нитрата алюминия $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ – раствор с концентрацией 700 г/дм³ (квалификация “х. ч.”).

Азотная кислота HNO_3 – раствор с концентрацией 12 М (квалификация “х. ч.”).

Трибутилфосфат (квалификация “х. ч.”).

Изопарафин-М (квалификация “х. ч.”).

Методики исследования

Методики работ представляли собой проведение лабораторных экспериментов с использованием водных растворов-имитаторов технологических продуктов. При выполнении исследований проводили последовательную оптимизацию отдельных технологических параметров. В экспериментах с имитаторами также изучали влияние различных факторов на эффективность процесса.

Методы исследования

Концентрацию урана и плутония в исследуемых пробах определяли методами атомно-абсорбционной спектроскопии и спектрофотометрии.

Атомно-абсорбционную спектроскопию использовали для вычисления концентрации U^{4+} в исследуемых растворах. Метод основан на измерении величины поглощения луча света определенной (резонансной) длины волны от источника, проходящего через атомный пар исследуемой пробы.

В данной работе измерения проводили с помощью атомно-абсорбционного спектрометра «Квант-2А» (Россия), основная относительная погрешность которого при измерении оптической плотности на длине волны 422.7 нм – не более 1 %.

Спектральный состав характеристического рентгеновского излучения отражает химический состав образца, а интенсивность рентгеновских эмиссионных линий пропорциональна концентрации химических элементов.

Концентрации U^{6+} и Pu^{6+} в рабочих растворах определяли спектрофотометрическим методом, так как эти элементы образуют окрашенные комплексные соединения с различными индикаторами в буферных средах. Концентрации U^{6+} и Pu^{6+} в анализируемых пробах определяли с помощью спектрофотометра ПЭ-5300ВИ (Россия) путем измерения оптической плотности раствора с комплексным соединением. Технологический раствор анализировали в определенном диапазоне pH среды, которую создавали при подготовке проб.

Аттестованный диапазон концентраций урана, измеряемых по данной методике – 0.001–350 г/дм³. Аналогичный диапазон концентраций плутония – 0.1–20 г/дм³.

Измерениям по настоящей методике препятствует присутствие в анализируемых растворах таких металлов как железо, хром, никель,

цирконий и др. Мешающее влияние при концентрациях этих металлов не более 1 : 10 по отношению к концентрации урана устраняют, добавляя в раствор этилендиаминтетрауксусную кислоту или ее соль (трилон Б).

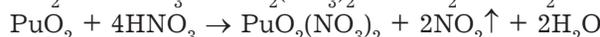
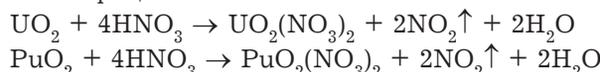
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение процесса

совместной экстракции U^{6+} и Pu^{6+}

Для устранения указанных недостатков разделение урана и плутония необходимо проводить в шестивалентном состоянии в виде UO_2^{2+} и PuO_2^{2+} в присутствии высаливателя – нитрата алюминия $Al(NO_3)_3$. Процесс совместной экстракции урана и плутония проводят в 7 М HNO_3 , а затем PuO_2^{2+} восстанавливают нитратом урана (4+). При этом PuO_2^{2+} восстанавливается до Pu^{3+} , а U^{4+} окисляется до UO_2^{2+} . Далее UO_2^{2+} реэкстрагируется 0.7 М HNO_3 в ВФ.

При растворении ОЯТ в 7 М HNO_3 за счет окислительных свойств азотной кислоты протекают процессы:



В 7 М HNO_3 плутоний будет находиться в шестивалентном состоянии [6]. При увеличении концентрации экстрагента – ТБФ в углеводородном разбавителе (изопарафин-М) – с 4.5 до 30 % возрастает α всех валентных форм плутония. Это заметно в присутствии даже незначительных количеств $Al(NO_3)_3$.

Влияние высаливателя – нитрата алюминия

На рис. 1 представлены зависимости изменения коэффициентов распределения α плутония, находящегося в различных валентных состояниях (Pu^{6+} , Pu^{4+} и Pu^{3+}), от концентрации HNO_3 при разных концентрациях экстрагента – 4.5 (а) и 30 % (б) ТБФ в изопарафине-М. Лучшей экстракционной способностью обладает Pu^{4+} . Максимальное значение $\alpha_{Pu^{4+}}$, равное 4.6 (при использовании 4.5 % ТБФ), получено при концентрации HNO_3 7 М. Несмотря на то, что во всем диапазоне кислотностей $\alpha_{Pu^{6+}} < 1$, с увеличением кислотности среды $\alpha_{Pu^{6+}}$ резко возрастает до максимального значения (0.78) также при концентрации HNO_3 7 М. Падение $\alpha_{Pu^{4+}}$ и $\alpha_{Pu^{6+}}$ при концентрации HNO_3 более 7 М объясняется конкурирующим влиянием катионов H^+ на процесс экстракции. Однако $\alpha_{Pu^{4+}}$ и $\alpha_{Pu^{6+}}$ практиче-

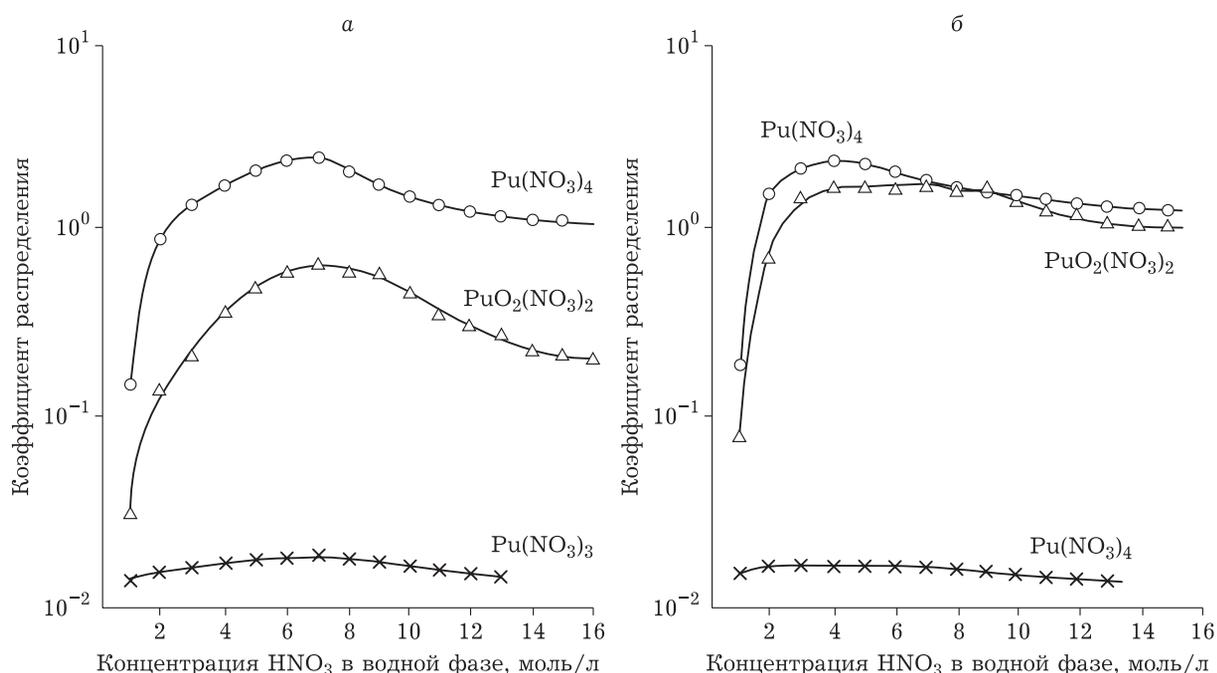


Рис. 1. Зависимость коэффициентов распределения Pu⁶⁺, Pu⁴⁺ и Pu³⁺ от концентрации HNO₃ в водной фазе. Экстрагент – 4,5 % (а) и 30 % ТБФ (б) в изопарaffине-М.

ски сравниваются при концентрациях ВФ и ОФ – 7 М HNO₃ и 30 % ТБФ соответственно.

Необходимо отметить, что при увеличении концентрации Al(NO₃)₃ до 1 М α урана резко увеличивается, особенно в диапазоне 4–8 М HNO₃. При дальнейшем добавлении высаливателя величина α изменяется незначительно. Это связано с высаливающим действием HNO₃. Таким образом, при использовании в качестве высаливателя Al(NO₃)₃ экстракцию необходимо проводить в 1 М его растворе.

Катионы Pu³⁺ в этих условиях практически не экстрагируются [11, 12]. Добавление в ВФ Al(NO₃)₃ принципиально не изменяет экстрагируемость Pu⁶⁺ и Pu⁴⁺. При увеличении концентрации Al(NO₃)₃ от 0,1 до 2,0 М α_{Pu⁶⁺} возрастает с 4,6 до 41,0 (примерно в 8,9 раз) в 4–8 М HNO₃ при концентрации UO₂(NO₃)₂ 200–250 г/л и концентрации ТБФ в ОФ 4,5 % (рис. 2). Величина α_{Pu⁴⁺} при добавлении в ВФ Al(NO₃)₃ практически не меняется.

Аналогичные исследования выполнены при концентрации ТБФ (в ОФ) 30 % (рис. 3). В присутствии Al(NO₃)₃ быстрее всего увеличивается α_{Pu⁶⁺} по сравнению с другими валентными формами плутония. Например, в 0,5 М Al(NO₃)₃ α_{Pu⁶⁺} растет от 2,8 до 40,6 (в 14,5 раз). При повышении концентрации Al(NO₃)₃ с 0,5 до 1 М α_{Pu⁶⁺} продол-

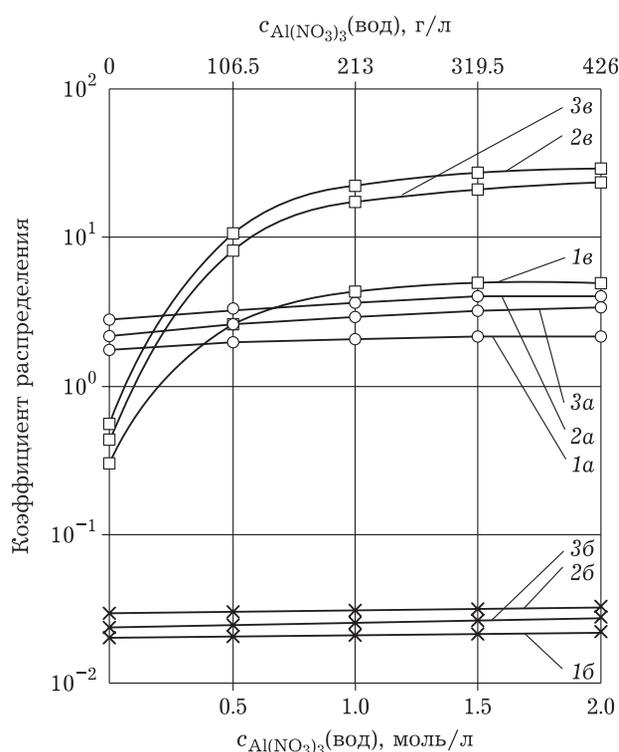


Рис. 2. Влияние концентрации (с) высаливателя Al(NO₃)₃ на коэффициенты распределения Pu⁶⁺, Pu⁴⁺ и Pu³⁺ при концентрации UO₂(NO₃)₂ 250 г/л. Экстрагент – 4,5 % ТБФ в изопарaffине-М. Концентрация HNO₃: 1_а, 1_б, 1_в – 4 М; 2_а, 2_б, 2_в – 7 М; 3_а, 3_б, 3_в – 8 М; а – Pu(NO₃)₄; б – PuO₂(NO₃)₂; в – Pu(NO₃)₃.

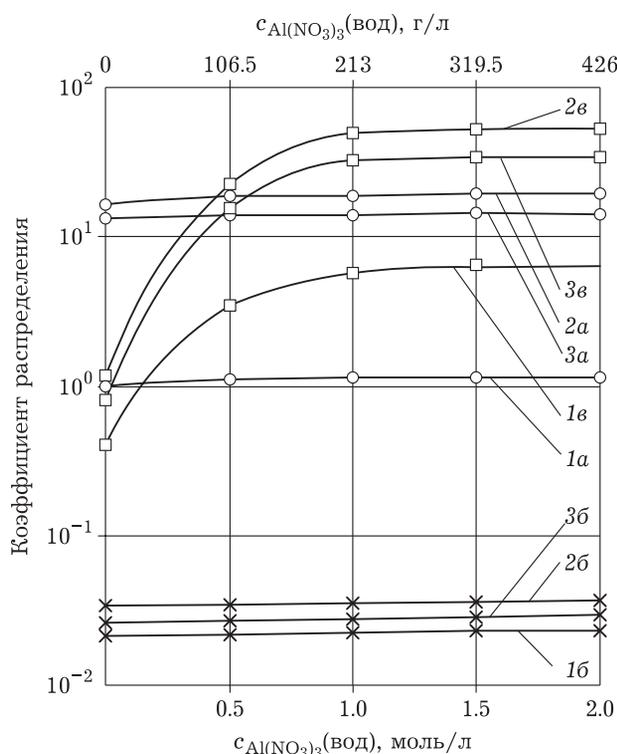


Рис. 3. Влияние концентрации (с) высаливателя $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ на коэффициенты распределения Pu^{6+} , Pu^{4+} и Pu^{3+} при концентрации $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 250 г/л. Экстрагент – 30 % ТБФ в изопарaffине-М. Концентрация HNO_3 : 1_a, 1_b, 1_c – 4 М; 2_a, 2_b, 2_c – 7 М; 3_a, 3_b, 3_c – 8 М; а – $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$; б – $\text{Pu}(\text{NO}_3)_3$; в – $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2$.

жает расти, но в значительно меньшей степени – с 40.6 до 73 (в 1.8 раза). Дальнейшее повышение концентрации $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ (с 1 до 1.5 М) не приводит к существенному росту $\alpha_{\text{Pu}^{6+}}$ (увеличение с 73 до 75 – в 1.03 раза). Таким образом, при повышении концентрации $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ с 0.1 до 2.0 М $\alpha_{\text{Pu}^{6+}}$ увеличивается с 2.8 до 75 – в 26.7 раз.

По полученным данным, при использовании 4.5 и 30 % раствора ТБФ в изопарaffине-М в ОФ в присутствии высаливателя (0.1–2.0 М $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$) $\alpha_{\text{Pu}^{6+}}$ возрастает с 8.9 до 26.7 (в 3 раза). Таким образом, при более высокой концентрации экстрагента $\alpha_{\text{Pu}^{6+}}$ растет быстрее. Применение растворов с концентрацией ТБФ выше 30 % нецелесообразно из-за малой разности плотностей получаемых ОФ и ВФ и плохой расслаиваемости системы ввиду высокой ее вязкости.

Высаливатель также влияет на распределение Pu^{4+} . В 0.5 М $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ $\alpha_{\text{Pu}^{4+}} = 5.7$, а без высаливателя – 0.63, т. е. в присутствии высаливателя $\alpha_{\text{Pu}^{4+}}$ увеличивается в 9.1 раза (экстрагент – 30 % ТБФ в изопарaffине-М). При повышении концентрации высаливателя $\alpha_{\text{Pu}^{4+}}$ не возрастает. В присутствии того же количества высаливателя (0.5 М) $\alpha_{\text{Pu}^{6+}}$ (38.2) в 6.7 раза выше, чем

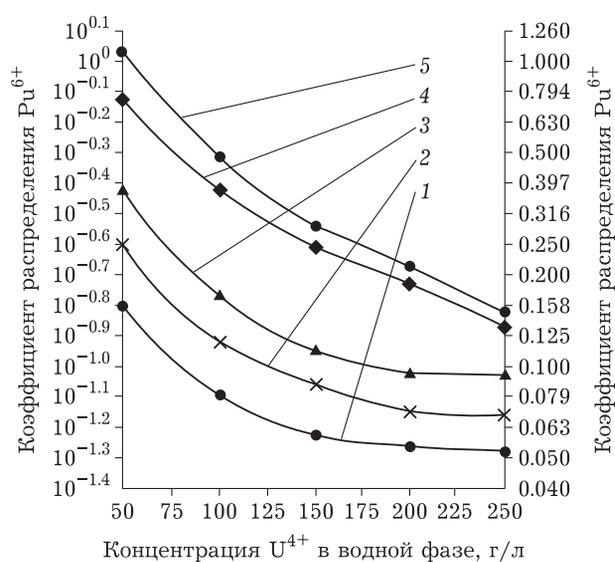


Рис. 4. Зависимость коэффициента распределения Pu^{6+} от концентрации $\text{U}(\text{NO}_3)_4$ в реэкстрагирующем растворе при концентрации HNO_3 в водной фазе: 0.5 (1), 1 (2), 3 (3), 5 (4) и 7 М (5). Концентрация высаливателя $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ – 1 М.

$\alpha_{\text{Pu}^{4+}}$ (5.7). Выполненные исследования свидетельствуют о том, что при использовании 0.5 М $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ экстракцию плутония лучше проводить в виде Pu^{6+} (из $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2$), а не Pu^{4+} (из $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$).

Не менее важно экстракционное разделение U^{6+} и Pu^{6+} в виде $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ и $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2$. В известных технологиях [13] для восстановления Pu^{4+} до Pu^{3+} применяются разные восстановители [14, 15]. Однако, как и при восстановлении Pu^{4+} , для перевода Pu^{6+} в Pu^{3+} обычно используют U^{4+} [16–18]. Предлагаемый процесс восстановления Pu^{6+} основан на различной стойкости сольватов U^{6+} и Pu^{6+} – $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{ТБФ}$ и $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{ТБФ}$ соответственно. Комплекс плутония имеет гораздо меньшую константу устойчивости, чем урановый. Поэтому при реэкстракции U^{4+} в виде $\text{U}(\text{NO}_3)_4$ протекает реакция:

$$2\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2(\text{o}) + 3\text{U}(\text{NO}_3)_4(\text{в}) + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Pu}(\text{NO}_3)_3(\text{в}) + 3\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2(\text{o}) + 4\text{HNO}_3$$

в результате которой плутоний реэкстрагируется и переходит в ВФ в виде $\text{Pu}(\text{NO}_3)_3$.

На рис. 4 показаны зависимости изменения $\alpha_{\text{Pu}^{6+}}$ от концентрации U^{4+} при различных концентрациях HNO_3 в ВФ; концентрации $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ и $\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2$ в ОФ составляли 200–250 г/л и 10–15 г/л соответственно, высаливатель – 1 М $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$. Видно, что U^{4+} – эффективный восстановитель PuO_2^{2+} : $\alpha_{\text{Pu}^{6+}}$ не превышает 1.0 даже при низких концентрациях $\text{U}(\text{NO}_3)_4$ (50 г/л) и HNO_3 (0.5 М). Восстановительную реэкстракцию проводят с помощью

$U(NO_3)_4$ с концентрацией 200–250 г/л в 7 М HNO_3 . Значение $\alpha_{Pu^{6+}}$ не превышает 0.2, что обеспечивает требуемую полноту реэкстракции Pu^{6+} из ОФ.

Изменение $\alpha_{Pu^{6+}}$ зависит от концентрации HNO_3 в ВФ. В 0.5–3 М HNO_3 $\alpha_{Pu^{6+}}$ заметно ниже, чем в 5–7 М HNO_3 , за счет увеличения сольватирующей способности ТБФ при больших кислотностях среды. Подчеркнем, что с ростом концентрации $U(NO_3)_4$ в реэкстрагирующем растворе скорость падения $\alpha_{Pu^{6+}}$ уменьшается. Так, при увеличении концентрации $U(NO_3)_4$ с 50 до 150 г/л этот показатель снижается с 0.155 до 0.059 (в 2.6 раза), а в более концентрированных растворах $U(NO_3)_4$ (150–250 г/л) $\alpha_{Pu^{6+}}$ уменьшается значительно медленнее – с 0.059 до 0.052 (в 1.1 раза).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволяют организовать технологический процесс экстракционной переработки отработавшего ядерного топлива, в котором обеспечивается:

- совместное извлечение UO_2^{2+} и PuO_2^{2+} в ОФ 30 %-м ТБФ в изопарафине-М;
- эффективность восстановительной реэкстракции PuO_2^{2+} до Pu^{3+} в 7 М HNO_3 ; в зоне вывода плутония необходимо поддержание высокой концентрации U^{4+} , а на подпитке концентрация ТБФ должна обеспечивать эффективность экстракции образующегося UO_2^{2+} ;
- полнота отделения Pu^{4+} от UO_2^{2+} и U^{4+} ;
- высокая степень реэкстракции $UO_2(NO_3)_2$ из ОФ и его чистота.

Авторы выражают благодарность директору Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета (ТПУ) О. Ю. Долматову за предоставленную возможность проведения исследований.

Исследования выполнены в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Переработка ядерного горючего / Под ред. С. Столера и Р. Ричардса. М.: Атомиздат, 1964. 547 с.
- 2 Копырин А. А., Карелин А. И., Карелин В. А. Технология производства и радиохимической переработки ядерного топлива. М.: Атомэнергиздат, 2006. 576 с.

- 3 Химическая технология облученного ядерного топлива: Учеб. пособие для хим.-технол. специальностей вузов / Под ред. В. Б. Шевченко. М.: Атомиздат, 1971. 448 с.
- 4 Пат. РФ 2454741, 2012.
- 5 Зильберман Б. Я., Федоров Ю. С., Пузиков Е. А., Голецкий Н. Д., Рябков Д. В., Кудинов А. С., Блажева И. В., Кухарев Д. Н. Предварительные исследования динамических режимов в экстракционно-промывной группе блоков опытно-демонстрационного центра (ОДЦ) с использованием математического моделирования // Радиохимия. 2014. Т. 56, № 6. С. 497–505.
- 6 Мефодьева М. П., Крот Н. Н. Соединения трансплутониевых элементов. М.: Наука, 1987. 302 с.
- 7 Пузиков Е. А., Зильберман Б. Я., Федоров Ю. С., Блажева И. В., Кудинов А. В., Рябкова Н. В. Новые данные по совместной экстракции нитратов актинидов и ряда кислот трибутилфосфатом в смеси с парафинами и ее математическое описание по модели А. М. Розена // Радиохимия. 2013. Т. 55, № 2. С. 144–155.
- 8 Шилов В. П., Николаевский В. Б. Формы существования ионов Am(II–VII) в растворах и механизмы реакций с их участием // Радиохимия. 2014. Т. 56, № 4. С. 289–308.
- 9 Пат. РФ 2454742, 2012.
- 10 Карелин В. А., Страшко А. Н. Технология переработки облученного ядерного топлива. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. 89 с.
- 11 Зильберман Б. Я., Макарычев-Михайлов М. Н., Рябков Д. В., Сапрыкин В. Ф., Торопилов И. С., Гузюк Н. Ю. Особенности распределения кислот между жидкостью и паром в системах HNO_3-H_2O и HNO_3-NA-H_2O в выпарных аппаратах // Хим. технология. 2009. Т. 10, № 12. С. 755–763.
- 12 Рябков Д. В., Андреева Е. В., Мишина Н. Е., Макарычев-Михайлов М. Н., Пузиков Е. А., Зильберман Б. Я. Исследование процессов концентрирования модельных жидких радиоактивных отходов в прямоточных испарителях на лабораторном стенде // Хим. технология. 2011. Т. 12, № 9. С. 556–563.
- 13 Громов Б. В., Савельева В. И., Шевченко В. Б. Химическая технология облученного ядерного топлива. М.: Энергоатомиздат, 1983. 352 с.
- 14 Garraway J., Wilson P. D. The technetium-catalysed oxidation of hydrazine by nitric acid // Journal of the Less-Common Metals. 1984. Vol. 97. P. 191–203.
- 15 Карелин В. А. Экстракционная переработка облученного ядерного топлива. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. 125 с.
- 16 Перетрухин В. Ф. Физико-химическое поведение урана и технеция на некоторых новых этапах ядерного топливного цикла // Рос. хим. журн. (Журн. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). 2007. Т. 6, № 4. С. 12–24.
- 17 Спицын В. И., Кузина А. Ф. Технеций. М.: Наука, 1981. 147 с.
- 18 Голецкий Н. Д., Зильберман Б. Я., Федоров Ю. С. Пути локализации технеция и нептуния при экстракционной переработке ОЯТ АЭС // Радиохимия. 2014. Т. 56, № 5. С. 427–438.