

ТЕХНОЛОГИИ КИМИЁВӢ - ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ - CHEMICAL TECHNOLOGY

УДК: 536.7: 546.621+546.791: 551.242.1 (575.3)

DOI: 10.65599/ENG3118

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КРИСТАЛЛОГИДРАТОВ ТОРИЯ (IV) И УРАНИЛА

¹Ф.Д. Саломов, ²М.С. Исломова, ²М.А. Бадалова, ²Г.К. Рузматова

¹Агентство по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности НАНТ, г. Душанбе, Таджикистан

²Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В работе исследована термическая устойчивость и термодинамические свойства кристаллогидратов тория (IV) и уранила: $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$. Цель - получить данные для оптимизации технологий переработки уран- и торийсодержащего сырья и прогнозирования свойств соединений других актинидов. Исследования выполнены методами дериватографии, рентгеноструктурного анализа и тензиметрии в неравновесных и равновесных условиях; для достижения равновесия каждая точка на барограмме выдерживалась свыше 36 часов. Установлен ступенчатый характер дегидратации и разложения соединений. Для $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ выявлен пятиступенчатый механизм: первые четыре ступени - последовательная потеря воды (300–425 K), пятая - разложение до ThO_2 и оксидов азота (427–440 K). Для $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ зафиксировано четыре ступени: удаление газов и влаги, дегидратация, разложение до UO_3 , ацетона и CO_2 (от 470 K). Для $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$ определены две ступени дегидратации (325–420 K) и распад до UO_3 и SO_3 (480–710 K по тензиметрии, 630–1200 K по ДТА). Температуры начала ступеней по тензиметрии смещены в область более низких значений на 50–70 градусов относительно данных дериватографии. Сравнительный анализ показал, что наиболее устойчивы по первым двум ступеням кристаллогидраты $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; для $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ отмечено усиление связи молекул воды при уменьшении их координированного числа.

Ключевые слова: кристаллогидраты нитрата тория (IV), сульфата и ацетата уранила, дегидратация, термическое разложение, равновесие.

ТАҲЛИЛИ МУҚОИСАВИИ УСТУВОРИИ ГАРМИИ КРИСТАЛЛОГИДРАТҲОИ ТОРИЙ ((IV) ВА УРАНИЛ

¹Ф.Д. Саломов, ²М.С. Исломова, ²М.А. Бадалова, ²Г.К. Рузматова

¹Агентии амнияти химиявӣ, биологӣ, радиатсионӣ ва ядроии АМИТ, ш. Душанбе, Тоҷикистон

²Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар кор устувории ҳароратӣ ва ҳосиятҳои термодинамикии кристаллогидратҳои торий (IV) ва уранил: $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ва $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$ таҳқиқ карда шуданд. Мақсади тадқиқот ба даст овардани маълумот барои оптимизатсияи технологияҳои коркарди ашёи хоми ураний ва торийдор, инчунин пешгӯии ҳосиятҳои пайвастиҳои дигари актинидҳо мебошад. Тадқиқотҳо бо усулҳои дериватография, таҳлили рентгеноструктурӣ ва тензиметрия дар шароити ғайримувозинатӣ ва мувозинатӣ гузаронида шуданд; барои ба даст овардани ҳолати мувозинатӣ ҳар як нуктаи барограмма зиёда аз 36 соат нигоҳ дошта шуд. Хусусияти марҳилавии дегидрататсия ва таҷзияи пайвастиҳои муайян гардид. Барои $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ механизми панҷмарҳилавӣ муқаррар карда шуд: чор марҳилаи аввал ба хоричшавии пайдарпайи об (300–425 K), марҳилаи панҷум бошад, ба таҷзия то ҳосилшавии ThO_2 ва оксидҳои нитроген (427–440 K) вобаста мебошад. Барои $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ чор марҳила муайян карда шуд: хоричшавии газҳо ва нафӣ, дегидрататсия, таҷзия то UO_3 , ацетон ва CO_2 (аз 470 K оғоз меёбад). Барои $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$ ду марҳилаи дегидрататсия (325–420 K) ва таҷзия то UO_3 ва SO_3 муайян карда шуданд (аз рӯи маълумоти тензиметрӣ 480–710 K, аз рӯи ДТА 630–1200 K). Ҳарорати оғози марҳилаҳо, ки бо усули тензиметрӣ муайян шудаанд, нисбат ба маълумоти дериватография ба самти қиматҳои пасттар 50–70 дараҷа ҷойиваз шудаанд. Таҳлили муқоисавӣ нишон дод, ки аз рӯи ду марҳилаи аввал кристаллогидратҳои $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ устувории бештар доранд; барои $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ҳангоми кам шудани шумораи координатсионии молекулаҳои об пурзӯршавии робитаи онҳо бо сохтор мушоҳида мегардад.

Калидвожаҳо: кристаллогидратҳои нитрати торий (IV), сульфат ва ацетати уранил, дегидрататсия, вайроншавии гармӣ, мувозинат.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE THERMAL STABILITY OF THORIUM (IV) AND URANYL CRYSTAL HYDRATES

F.D. Salomov, M.S. Islomova, M.A. Badalova, G.K. Ruzmatova

¹Agency for Chemical, Biological, Radiation, and Nuclear Safety of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

²Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

The thermal stability and thermodynamic properties of thorium(IV) and uranyl crystal hydrates $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$ were investigated in this work. The objective was to obtain data for optimizing uranium- and thorium-containing raw material processing technologies and predicting the properties of other actinide compounds. The studies were performed using derivatogravimetry, X-ray diffraction analysis and tensimetry under nonequilibrium and equilibrium conditions; each point on the barogram was maintained for over 36 hours to achieve equilibrium. The stepwise nature of dehydration and decomposition of the compounds was established. For $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, a five-step mechanism was revealed: the first four steps are the sequential loss of water (300–425 K), the fifth is decomposition to ThO_2 and nitrogen oxides (427–440 K). For $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, four steps were recorded: removal of gases and moisture, dehydration, decomposition to UO_3 , acetone, and CO_2 (from 470 K). For $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$, two dehydration steps (325–420 K) and decomposition to UO_3 and SO_3 (480–710 K according to tensimetry, 630–1200 K according to DTA) were determined. The onset temperatures of the stages, as determined by tensimetry, are shifted to lower values by 50–70°C relative to the derivatogravimetry data. A comparative analysis revealed that $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ crystal hydrates are the most stable in the first two stages; for $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, increased bonding of water molecules with a decrease in their coordinate number was observed. The results are applicable to the development of raw material processing technologies and the prediction of the properties of related compounds.

Keywords: thorium(IV) nitrate, uranyl sulfate, and uranyl acetate crystallohydrates; dehydration; thermal decomposition; equilibria.

Введение

При технологических способах переработки урана и тория, содержащих минеральные руды и отходы промышленности, минеральные кислоты – серная, азотная могут образовывать различные по составу кристаллогидраты (в зависимости от температур обработки) и другие виды соединений [1-3].

Анализ литературных сведений показывает, что возможные химические превращения при термической обработке кристаллогидратных соединений тория и уранила изучены недостаточно [4-6]. Получение достоверных сведений по физико-химическим, термическим и термодинамическим свойствам продуктов переработки уран- и торий- содержащих материалов, в частности кристаллогидратов, позволяют на их основе подобрать наиболее эффективные условия технологии переработки сырья и получения конечных продуктов. На основе фундаментальных данных, можно установить закономерности изменения свойств аналогичных по составу соединений других актинидов, особенно для элементов второй половины актинидного ряда, где экспериментальное изучение имеет свои сложности, связанные с высокой радиоактивностью и малой доступностью этих элементов.

Экспериментальные методы. Результаты исследования.

В продолжении серии наших исследований, посвящённых термической устойчивости и термодинамическим характеристикам химических соединений [7-9], в данной работе приведены результаты сравнительного анализа термической стабильности, сведений о ступенчатом характере процесса термического разложения и термодинамических свойств кристаллогидратных соединений тория (IV) состава $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, уранила составов $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$ [10-12]. Исследование проведено с помощью прецизионных экспериментальных методов – дериватографии (дериватограф "Labsys Evo1600"), рентгеноструктурного анализа (XRDynamic 500) и тензиметрии с мембранным нуль-манометром [13,14] в двух условиях – неравновесных (дериватография, при скорости нагрева образца от одного до пятнадцати градусов в минуту) и равновесных (методом тензиметрии).

Методом тензиметрии с мембранным нуль-манометром установлено, что исследуемые процессы дегидратации кристаллогидратов и термического разложения солей тория и урана протекают замедленно во времени, особенно при процессе разложения солей. Для достижения равновесия в системе каждая фигуративная точка на графике зависимости давления пара от температуры (барограмма) выдерживалась более 36 часов. Достижение равновесия в системе проверялось как при прямом ходе барограммы (нагреве мембраны), так и при её обратном ходе (охлаждении системы). Совпадение обратного хода с прямым ходом барограммы удалось достичь только для процесса дегидратации кристаллогидратов.

«Ступенчатый характер процесса термического разложения кристаллогидратов тория (IV) и уранила установлен методом дериватографии. Показано, что процесс термического разложения пентагидрата нитрат тория (IV) (рисунок 1) в интервале температур (300 – 550) K состоит из пяти ступеней.

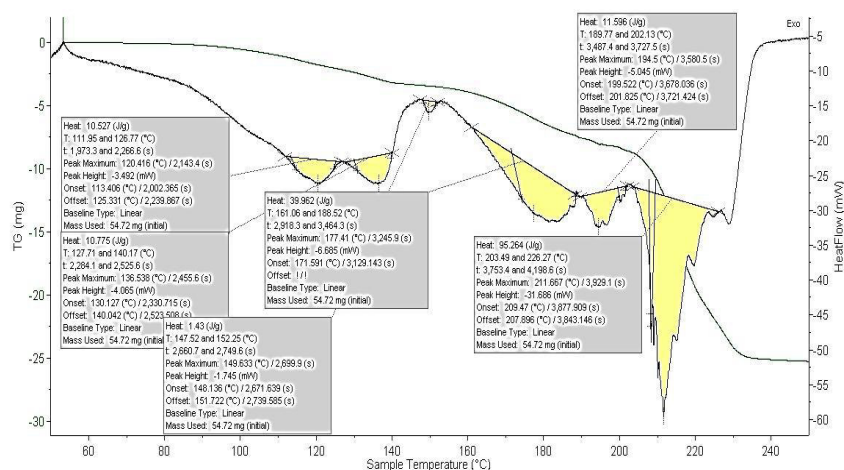


Рисунок 1 – Дериватограмма процесса термического разложения кристаллогидрата $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
 Figure 1 – Derivatogram of the thermal decomposition process of the $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ crystal hydrate

Методом тензиметрии с мембранным нуль-манометром [13-14] также установлен пятиступенчатый характер процесса термического разложения кристаллогидрата $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ в интервале температур 300-450 К при равновесных условиях (рисунок 2).

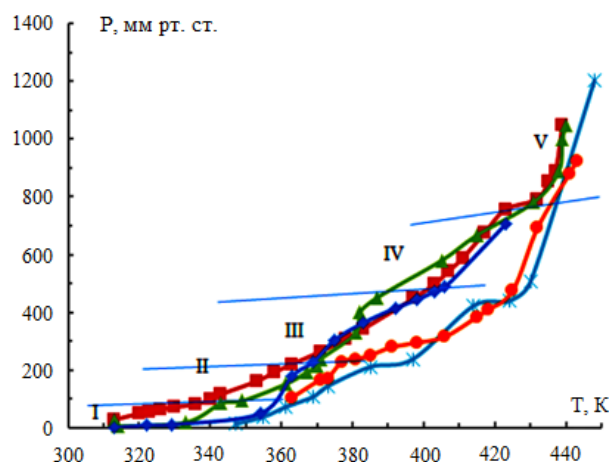
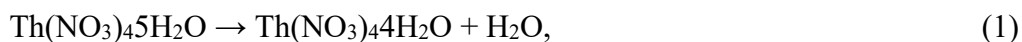


Рисунок 2 – Барограмма процесса термического разложения $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
 Figure 2 – Barogram of the thermal decomposition process

На основе полученных сведений можно предположить следующую схему дегидратации кристаллогидрата $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$:

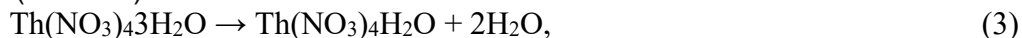
- на первой ступени интервал температур $\Delta T = (300-325)$ К и протекает следующая химическая реакция:



- вторая - при $\Delta T = (330-350)$ К по схеме:



- третья - при $\Delta T = (350-390)$ К по схеме:



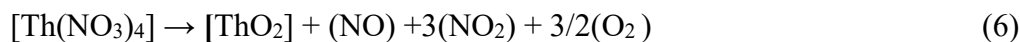
- четвёртая - при $\Delta T = (400-425)$ К по схеме:



На пятой ступени ($\Delta T = 427-440$ К) происходит термическое разложение $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$, которое соответствует следующей химической реакции:



или



которое учитывает протекание процесса разложения

$(\text{NO}_2) \leftrightarrow (\text{NO}) + \frac{1}{2}(\text{O}_2)$ в условиях эксперимента, при относительно высоких температурах [15].
Образование газа - оксидов азота в мембранной камере наблюдается визуально» [16].

Методом дериватограмметрии установлено, что процесс термического разложения кристаллогидрата уранилацетата состава $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в интервале температур от комнатной до 1000 °C состоит из трёх эндозэффектов (рисунок 3).

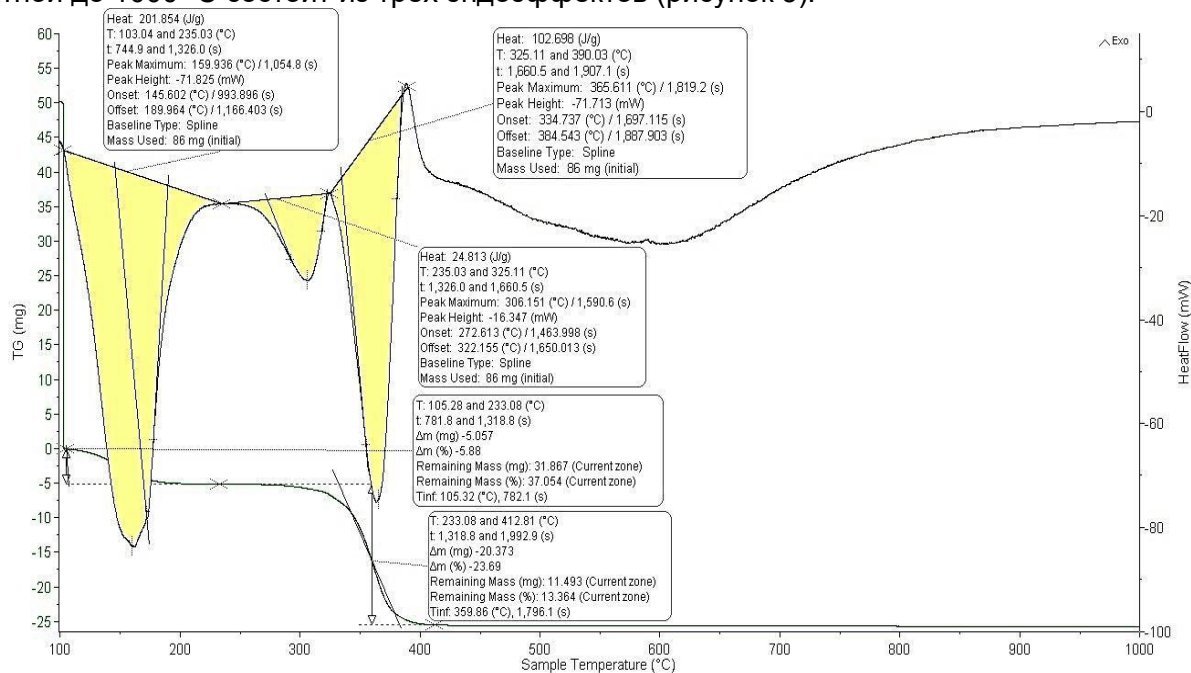


Рисунок 3 – Термограмма $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: масса 86 мг; $t=1000^\circ\text{C}$; скорость нагрева 15 K/мин, 60 мин
Figure 3 – Thermogram of $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: sample mass 86 mg; temperature 1000 °C; heating rate 15 K/min; duration 60 min

Методом тензиметрии установлено, что процесс термического разложения $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ состоит из четырёх ступеней (рисунок 4).

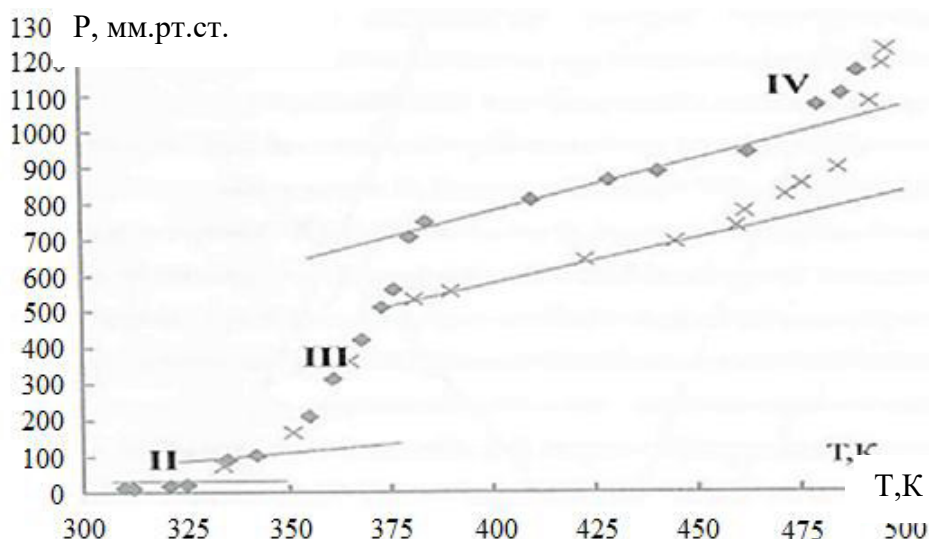
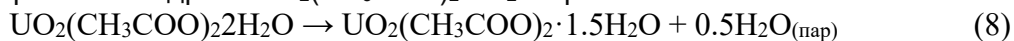


Рисунок 4 – График барограммы процесса термического разложения кристаллогидрата $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Figure 4 – Barogram curve of the thermal decomposition process of the $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ crystal hydrate

Первая ступень (I) протекает при температуре ниже 320 К и соответствует удалению физически адсорбированных газов, а также влаги из образца. Последующие две ступени, протекающие в интервале температур 320-345 К (II) и 350-380 К (III), соответствуют процессу дегидратации $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Прямые линии на барограмме соответствуют области газового расширения.

Количественный анализ барограммы показывает, что давление пара III ступени процесса почти в четыре раза больше, чем II ступени. На этом основании можно предположить, что первая ступень дегидратации (II) кристаллогидрата $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ протекает по схеме:

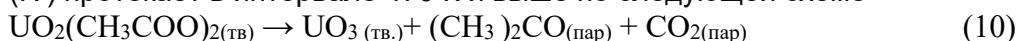


в интервале температур 320-345 К.

Третья ступень (III) протекает в интервале температур 350-380 К по схеме:



Четвёртая ступень (IV) протекает в интервале 470 К и выше по следующей схеме

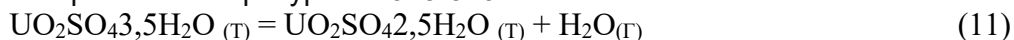


Образование ацетона по схеме (10) обнаружено по окончании эксперимента при вскрытии мембранной камеры.

Методом тензиметрии установлено, что процесс термического разложения кристаллогидрата $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$ в интервале температур 300-575 К (рисунок 5) протекает по следующей схеме:

первые две ступени соответствуют процессу дегидратации:

- первая ступень- в интервале температур $\Delta T = 325-370$ К



- вторая при $\Delta T = 380-420$ К



Третья ступень, протекающая в широкой области температур от 630 до 1200 К (по данным ДТА, в неравновесных условиях), и в интервале температур 480-710 К (по данным тензиметрии, в равновесных условиях) происходит термический распад уранилсульфата по уравнению:

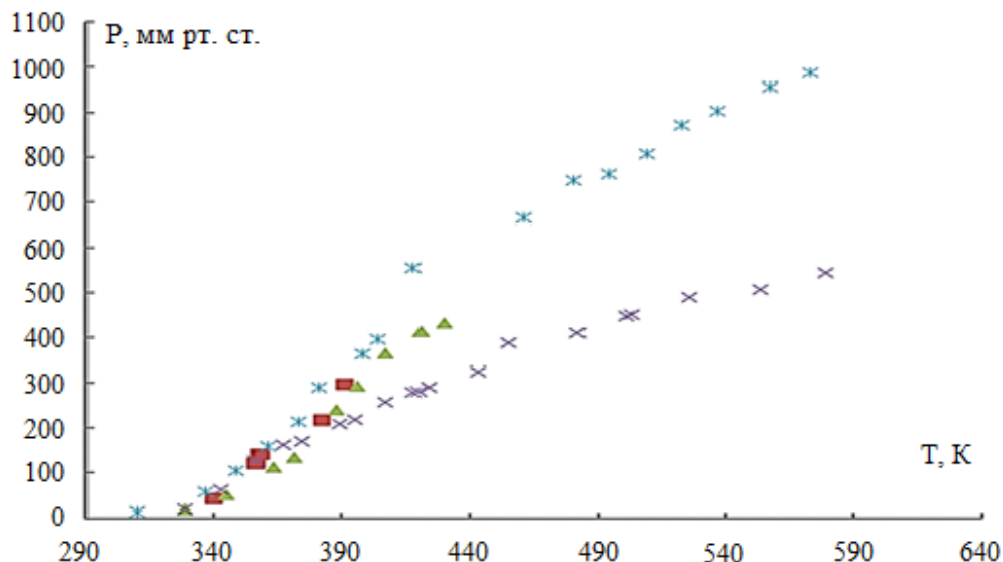


Рисунок 5 - Барограммы процесса парообразования $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$:

опыты - 1 ($\square$), 2 (Δ), 3 ($\times$) и 4 ($*$)

Figure 5 – Barograms of the vaporization process - 1 ($\square$), 2 (Δ), 3 ($\times$) и 4 ($*$)

Заклучение

Получены, таким образом, наиболее полные сведения термической устойчивости кристаллогидратных соединений тория (IV) и уранила, о многоступенчатом характере и температурном интервале протекания ступеней процессов дегидратации кристаллогидратов и термического разложения солей. Температура начала ступеней процессов, определённых в равновесных условиях (методом тензиметрии), смещена в области более низких температур (на 50-70 градусов) по сравнению с данными дериватографии.

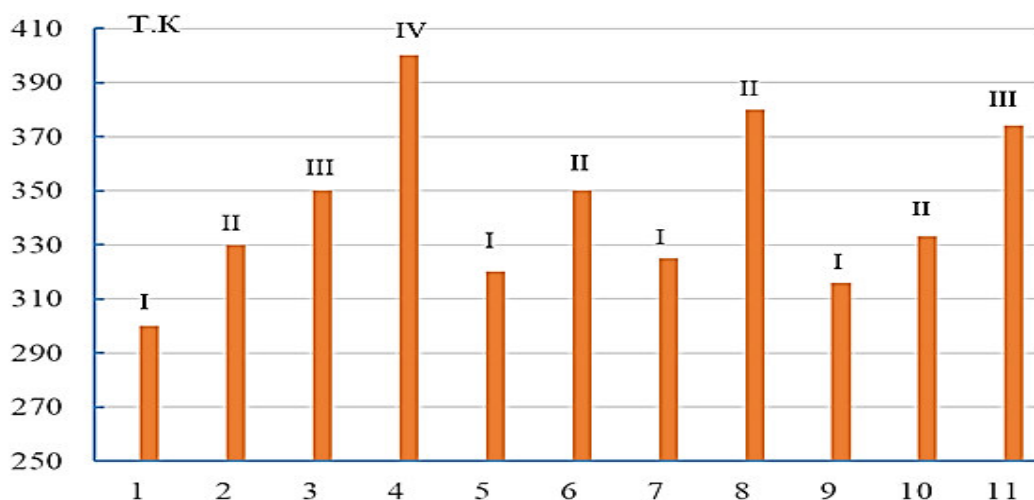


Рисунок 6 - Гистограмма температуры начала ступеней процесса дегидратации кристаллогидратов тория и уранила: (1-4) - $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$;

(5,6) - $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; (7,8) - $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; (9-11) - $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Figure 6 – Histogram of the initial temperatures of the dehydration stages of thorium and uranyl crystal hydrates: (1-4) - $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; (5,6) - $\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; (7,8) - $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; (9-11) - $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Полученные данные позволили провести сравнительный анализ термической устойчивости, изучить характеристики ступеней процессов дегидратации кристаллогидратов и солей тория (IV) и уранила. Гистограмма (рисунок 6) показывает, что по I и II ступеням относительно термически наиболее устойчивым являются кристаллогидраты $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Для кристаллогидратов $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ по мере уменьшения координированного числа усиливается связь между молекулами воды, что возможно, связано с вхождением молекулы воды во внутреннюю сферу с образованием комплексного соединения $[\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot \text{H}_2\text{O}]$.

Рецензент: Обидов З.Р.-д.х.н., профессор кафедры "Технология химических производств" ТПУ имени академика М.С. Осими.

Литература

1. Сиборг, Г. Химия актинидных элементов / Г. Сиборг, Дж. Кац; пер. с англ.; под ред. Г.Н. Яковлева. – М.: Издательство Главного управления по использованию атомной энергии при Совете министров СССР, 1960. – 542 с.
2. Громов, В.Б. Введение в химическую технологию урана. Учебник для вузов. М.: Атомиздат, 1978, 336 с.
3. Жерин И.И., Амелина Г.Н. Химия тория, урана и плутония: Учебное пособие. Томск: Изд. ТПУ, 2010, 147 с.
4. Jing Li, Yan Chen, Yong Cai Zhang. Two thermolysis routes to ThO_2 nanoparticles from thorium nitrate. 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012) - <https://www.atlantispress.com/article/3520.pdf>.
5. Sumanta Sahu, Uttam Kumar Sahu, and Raj Kishore Patel. Modified Thorium Oxide Polyaniline Core–Shell Nanocomposite and Its Application for the Efficient Removal of Cr(VI). Cite this: J. Chem. Eng. Data 2019, 64, 3, 1294–1304 Publication Date: February 20 - <https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b01225>.
6. J. A. R. Cheda, Edgar F. Westrum, JR. Heat capacity of $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ from 5 to 350 K. J. Chem. Thermodynamics 1976, V.8, P. 25-29.
7. Получение алюмогидридов щелочных металлов из местных руд Таджикистана и их термодинамическое обоснование / О. А. Азизов, И. Мирсаидзода, Х. А. Зоиров, А. Бадалов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – № 3(51). – С. 62-66. – EDN TJUGQP.

8. Температура плавления лантанидов, интерметаллида Ln_5Pb_3 (где Ln - лантаниды) и закономерности их изменения / С. А. Гадоев, Б. Ш. Рахмонов, Б. Б. Эшов, А. Бадалов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2024. – № 4(68). – С. 92-98. – EDN GARZSE.
9. Насриддинов, С. К. Висмут - аналогия, термические характеристики его сплавов с лантанидами и закономерности их изменения / С. К. Насриддинов, Г. К. Рuzматова, А. Бадалов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 3(71). – С. 69-77. – EDN URKIHT.
10. Мирсаидов У.М., Эшов Дж.Н., Хамидов Ф.А., Бадалов А.Б. Термодинамические характеристики процесса термического разложения $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Журн. физической химии, 2024, т.98, №3, С.10-14.
11. Хамидов Ф.А., Эшов Дж. Н. Саломов Ф. Дж. Бадалов А. Раджабов С.Ф. Термическое разложение и термодинамические характеристики кристаллогидратов нитрата тория (iv). Вестник педагогического университета. Серия естественных наук. Изд. ТГПУ им. С Айни, 2025, №2 (26). С.98-206.
12. Бадалов А., Мирсаидзода И., Хамидов Ф.А., Саломов Ф. Дж., Эшов Дж. Н. Термическое разложение ураниловых соединений. Сб. тр. междунар. н.-пр. конф. "Химия и инженерная экология – XXIV" Казань, 27-28.09. 2024, ISBN 978-5-6050749-9-1. С.100-102.
13. Новиков, Г. И. Физические методы неорганической химии / Г. И. Новиков – Минск: Высшая школа, 1975. – 261 с.
14. Суворов, А. В. Термодинамическая химия парообразного состояния / А. В. Суворов. - Л.: Химия, 1970. – 208 с.
15. Атрощенко, В.И. Технология азотной кислоты/ В.И. Атрощенко, С.И. Каргин. – М.: Химия, 1970. - С.89-102.
16. Эшов Дж. Н. Синтез, термические и термодинамические свойства торий-ураниловых соединений. Дисс.к.т.н., Душанбе, 2025, 145 с.

References

1. Seaborg, G. T., & Katz, J. J. (1960). The Chemistry of the Actinide Elements (Russian edition, Trans. from English, G. N. Yakovlev, Ed.). Moscow: Publishing House of the Main Administration for the Use of Atomic Energy under the Council of Ministers of the USSR. [In Russian]
2. Gromov, V. B. (1978). Introduction to the Chemical Technology of Uranium: Textbook for Universities. Moscow: Atomizdat. [In Russian]
3. Zherin, I. I., & Amelina, G. N. (2010). Chemistry of Thorium, Uranium, and Plutonium: Study Guide. Tomsk: TPU Publishing House. [In Russian]
4. Jing Li, Yan Chen, & Yong Cai Zhang. (2012). Two thermolysis routes to ThO_2 nanoparticles from thorium nitrate. 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012). <https://www.atlantispress.com/article/3520.pdf>
5. Sahu, S., Sahu, U. K., & Patel, R. K. (2019). Modified Thorium Oxide Polyaniline Core–Shell Nanocomposite and Its Application for the Efficient Removal of Cr(VI) . Journal of Chemical & Engineering Data, 64(3), 1294–1304. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b01225>
6. Cheda, J. A. R., & Westrum, E. F., Jr. (1976). Heat capacity of $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ from 5 to 350 K. The Journal of Chemical Thermodynamics, 8(1), 25-29.
7. Azizov, O. A., Mirsaidzoda, I., Zoirov, Kh. A., & Badalov, A. (2020). Production of alkali metal aluminum hydrides from local ores of Tajikistan and their thermodynamic substantiation. Polytechnical Bulletin. Series: Engineering Studies, (3), 62-66. [In Russian]. EDN: TJUGQP
8. Gadoev, S. A., Rakhmonov, B. Sh., Eshov, B. B., & Badalov, A. (2024). Melting point of lanthanides, intermetallic compound Ln_5Pb_3 (where Ln are lanthanides) and regularities of their changes. Polytechnical Bulletin. Series: Engineering Studies, (4), 92-98. [In Russian]. EDN: GARZSE
9. Nasriddinov, S. K., Ruzmatova, G. K., & Badalov, A. (2025). Bismuth - analogy, thermal characteristics of its alloys with lanthanides and regularities of their changes. Polytechnical Bulletin. Series: Engineering Studies, (3), 69-77. [In Russian]. EDN: URKIHT
10. Mirsaidov, U. M., Eshov, Dzh. N., Khamidov, F. A., & Badalov, A. B. (2024). Thermodynamic characteristics of the thermal decomposition of $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Russian Journal of Physical Chemistry A, 98(3), 10-14. (Note: If citing the Russian version of the journal: Zhurnal Fizicheskoi Khimii, 2024, Vol. 98, No. 3, pp. 10-14).
11. Khamidov, F. A., Eshov, Dzh. N., Salomov, F. Dzh., Badalov, A., & Radzhabov, S. F. (2025). Thermal decomposition and thermodynamic characteristics of crystalline hydrates of thorium (IV) nitrate. Bulletin of the Pedagogical University. Series of Natural Sciences (TSPU named after S. Ayni), (2), 98-206.
12. Badalov, A., Mirsaidzoda, I., Khamidov, F. A., Salomov, F. Dzh., & Eshov, Dzh. N. (2024). Thermal decomposition of uranyl compounds. In Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference "Chemistry and Engineering Ecology – XXIV" (pp. 100-102). Kazan. ISBN 978-5-6050749-9-1.
13. Novikov, G. I. (1975). Physical Methods of Inorganic Chemistry. Minsk: Vysshaya Shkola.
14. Suvorov, A. V. (1970). Thermodynamic Chemistry of the Vapor State. Leningrad: Khimiya.

15. Atroshchenko, V. I., & Kargin, S. I. (1970). Technology of Nitric Acid (pp. 89-102). Moscow: Khimiya.
16. Eshov, Dzh. N. (2025). Synthesis, thermal and thermodynamic properties of thorium-uranyl compounds (Candidate's thesis, Engineering Sciences). Dushanbe.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Саломов Фирдавс Чабборович	Саломов Фирдавс Джабборович	Salomov Firdavs Dzhabborovich
унвонҷӯ	соискатель	applicant
Агентии беҳатарии химиявӣ, биологӣ, радиатсионӣ ва ядроии Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон	Агентства по химической, биологической, радиационной и ядерной безопасности Национальной академии наук Таджикистана	Agency for Chemical, Biological, Radiation and Nuclear Safety of the National Academy of Sciences of Tajikistan
E-mail: fr.0.5@mail.ru		
TJ	RU	EN
Исломова Муқаддам Саъдуллоевна	Исломова Муқаддам Саъдуллоевна	Islomova Mukaddam Sadulloevna
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	candidate of engineering sciences, Assistant professor
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С.Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: islomova.muqaddam71@gmail.com		
TJ	RU	EN
Бадалова Мамлакат Абдухайровна	Бадалова Мамлакат Абдухайровна	Badalova Mamlakat Abdukhayrovna
н.и.т., и.в. дотсент	к.т.н., и.о. доцента	candidate of engineering sciences, associate professor
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: bmamlakat@gmail.com		
TJ	RU	EN
Рузматова Гулноз Камоловна	Рузматова Гулноз Камоловна	Ruzmatova Gulnoz Kamolovna
н.и.х., муаллими калон	к.х.н., ст. преподаватель	PhD, senior lecturer
ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ	ТТУ имени академика М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: ruzmatova066@gmail.com		