

Научная статья
УДК 661.879
doi: 10.17223/24135542/37/10

Исследование процесса разложения продуктов производства оксидов урана

**Владимир Леонидович Софронов¹, Степан Геннадьевич Пименов²,
Анна Вадимовна Зиновьева³**

¹ *Северский технологический институт – филиал Национального
исследовательского ядерного университета «МИФИ», Северск, Россия*
^{2,3} *АО «Сибирский химический комбинат», Северск, Россия*

¹ *vlsofronov@mephi.ru*

² *Stepan.pimenov.2013@mail.ru*

³ *AVPolyanskaya@mail.ru*

Аннотация. Для получения гексафторида урана, предназначенного для изотопного обогащения на разделительных заводах России, урановое сырье после аффинажного завода в виде раствора уранилнитрата $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ проходит несколько основных стадий переработки: получение осадка полиураната аммония, сушку осадка и его прокалку до триоксида урана или октаоксида триурана, фторирование оксидов до гексафторида урана.

В производственных условиях сушку влажного полиураната аммония с удалением гигроскопической и кристаллизационной влаги и прокалку с термическим разложением полиуранатов аммония до оксидов урана проводят в горизонтальных барабанных аппаратах – сушильных и прокалочных печах – при различных температурах. От технологических параметров этих процессов существенно зависят качество и технико-экономические показатели производства гексафторида урана.

В работе приведены результаты исследований процессов, происходящих при термическом разложении полиуранатов аммония до оксидов урана. Термическое разложение образцов проводили на термоанализаторе SDT Q600 в диапазоне температур от 20 до 900°C со скоростью нагрева 10°/мин. Фазовые составы исходных и конечных образцов определяли с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ARL X'TRA.

Исходный полиуранат аммония имел фазовый состав $(\text{NH}_4)_2\text{U}_4\text{O}_{13} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, а продукты, образующиеся в печах сушки при температуре до 300°C, состояли в основном из соединений состава $(\text{NH}_4)_2\text{U}_4\text{O}_{13} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, где $n = 1, 6–2$.

Показано, что процесс разложения полиураната аммония носит сложный характер и сопровождается тремя эндо- и двумя экзотермическими эффектами. Вероятностный механизм термического разложения полиураната аммония выглядит следующим образом: в диапазоне температур от 25 до 220°C происходит удаление гигроскопической и частично кристаллизационной влаги, в диапазоне от 220 до 315°C – разложение нитрата аммония, в диапазоне от 315 до 385°C удаляются аммонийный азот и часть кристаллизационной влаги, диапазон температур от 385 до 465°C связан с образованием гидратированной формы триоксида урана UO_3 , при температуре более 465°C удаляется остаточная кристаллизационная влага из триоксида урана с последующим образованием октаоксида триурана U_3O_8 .

В статье также приведены результаты исследований термического разложения полупродуктов из печей сушки при температуре в слое $(250 \pm 50)^\circ\text{C}$, поэтому в них отсутствует гигроскопическая и частично кристаллизационная влага. Последующие стадии термического разложения полупродуктов из печей сушки, а также полиураната аммония в диапазоне температур от 315 до 630°C идентичны.

Ключевые слова: полиуранат аммония, октаоксид триурана, триоксид урана, дифференциально-термический анализ, термическое разложение, энергия активации

Для цитирования: Софронов В.Л., Пименов С.Г., Зиновьева А.В. Исследование процесса разложения продуктов производства оксидов урана // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 37. С. 143–154. doi: 10.17223/24135542/37/10

Original article

doi: 10.17223/24135542/37/10

Investigation of the process of decomposition of uranium oxide production products

Vladimir L. Sofronov¹, Stepan G. Pimenov², Anna V. Zinovieva³

¹ *Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University MEPHI, Seversk, Russia*

^{2,3} *JSC Siberian Chemical Plant, Seversk, Russia*

¹ *vlsufronov@mephi.ru*

² *Stepan.pimenov.2013@mail.ru*

³ *AVPolyanskaya@mail.ru*

Abstract. To obtain uranium hexafluoride intended for isotopic enrichment at separation plants in Russia, uranium raw material from the refining plant in the form of a solution of uranyl nitrate $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ undergoes several main processing stages: obtaining a precipitate of ammonium polyuranate, drying the precipitate and calcining it to uranium trioxide or triuranium octoxide, fluorination of oxides to uranium hexafluoride.

Under production conditions, drying of wet ammonium polyuranate with the removal of hygroscopic and crystallization moisture and calcination with thermal decomposition of ammonium polyuranates to uranium oxides are carried out in horizontal drum devices - drying and calcining furnaces at different temperatures. The quality and technical and economic indicators of uranium hexafluoride production depend significantly on the technological parameters of these processes. The paper presents the results of studies of the processes occurring during thermal decomposition of ammonium polyuranates to uranium oxides. Thermal decomposition of the samples was carried out on an SDT Q600 thermal analyzer in the temperature range from 20 to 900°C with a heating rate of $10^\circ\text{C}/\text{min}$. The phase compositions of the initial and final samples were determined using X-ray structural analysis on an ARL X'TRA diffractometer.

The initial ammonium polyuranate had a phase composition of $(\text{NH}_4)_2\text{U}_4\text{O}_{13} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, and the semi-products formed in drying ovens at temperatures up to 300°C consisted mainly of compounds of the composition $(\text{NH}_4)_2\text{U}_4\text{O}_{13} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, where $n = 1.6 \dots 2$. It is shown that the decomposition process of ammonium polyuranate is complex and

is accompanied by three endo- and two exothermic effects. The probabilistic mechanism of thermal decomposition of ammonium polyuranate is as follows: in the temperature range from 25 to 220 °C, hygroscopic and, partially, crystallization moisture are removed, in the range from 220 to 315 °C - ammonium nitrate decomposes, in the range from 315 to 385 °C, ammonium nitrogen and part of the crystallization moisture are removed, the temperature range from 385 to 465 °C is associated with the formation of a hydrated form of uranium trioxide UO_3 , at a temperature above 465 °C, residual crystallization moisture is removed from uranium trioxide with the subsequent formation of triuranium octaoxide U_3O_8 .

The article also presents the results of studies of the thermal decomposition of semi-finished products from drying ovens at a temperature in the layer of (250 ± 50) °C, therefore, they do not contain hygroscopic and, partially, crystallization moisture. The subsequent stages of thermal decomposition of the semi-finished products from the drying ovens, as well as ammonium polyuranate, in the temperature range from 315 to 630°C, are identical.

Keywords: ammonium polyuranate, triuranium octoxide, uranium trioxide, differential thermal analysis, thermal decomposition, activation energy

For citation: Sofronov, V.L., Pimenov, S.G., Zinovieva, A.V. Investigation of the process of decomposition of uranium oxide production products. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 37, 143–154. doi: 10.17223/24135542/37/10

Введение

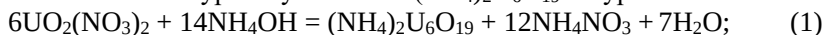
В настоящее время Сублиматный завод Акционерного общества «Сибирский химический комбинат» (АО «СХК») является центром конверсионного производства сырьевого гексафторида урана (СГФУ) в России и выпускает продукцию, которая соответствует требованиям международных стандартов.

Для получения СГФУ, предназначенного для обогащения на раздельных заводах России, урановое сырье после аффинажного завода в виде раствора уранилнитрата $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ (АзКРУ) должно пройти несколько стадий переработки: получение полиураната аммония (ПУА) с последующей его фильтрацией, сушкой осадка и его прокалкой до триоксида урана UO_3 или октаоксида триурана U_3O_8 , фторирование оксидов до СГФУ с последующей переработкой образующихся отходов.

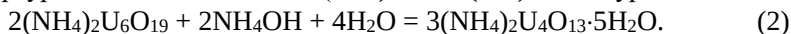
На рис. 1 представлена блок-схема получения оксидов урана, реализованная на Сублиматном заводе АО «СХК», где буквой «Е» обозначены промежуточные емкости, буквой «Р» – аппараты для осаждения, буквой «Ф» – аппараты для фильтрации ПУА, буквой «С» – печи сушки, буквой «П» – печи прокалки, ОУ – оксиды урана.

Процесс осаждения полиураната аммония из нитрата уранила проводят при температуре $(50\text{--}90)^\circ\text{C}$ в две стадии [1, 2]:

– на первой стадии при рН (5 ± 1) получается осадок, по химическому составу близкий к гексауранату аммония $(\text{NH}_4)_2\text{U}_6\text{O}_{19}$ по уравнению



– на второй стадии при постепенном повышении рН до $(8,0 \pm 0,5)$ получается осадок тетраураната аммония состава $(\text{NH}_4)_2\text{U}_4\text{O}_{13} \cdot (5\text{--}7)\text{H}_2\text{O}$ по уравнению



Суммарная реакция осаждения, соответствующая образованию кристаллогидрата ураната аммония, может быть представлена следующим уравнением:

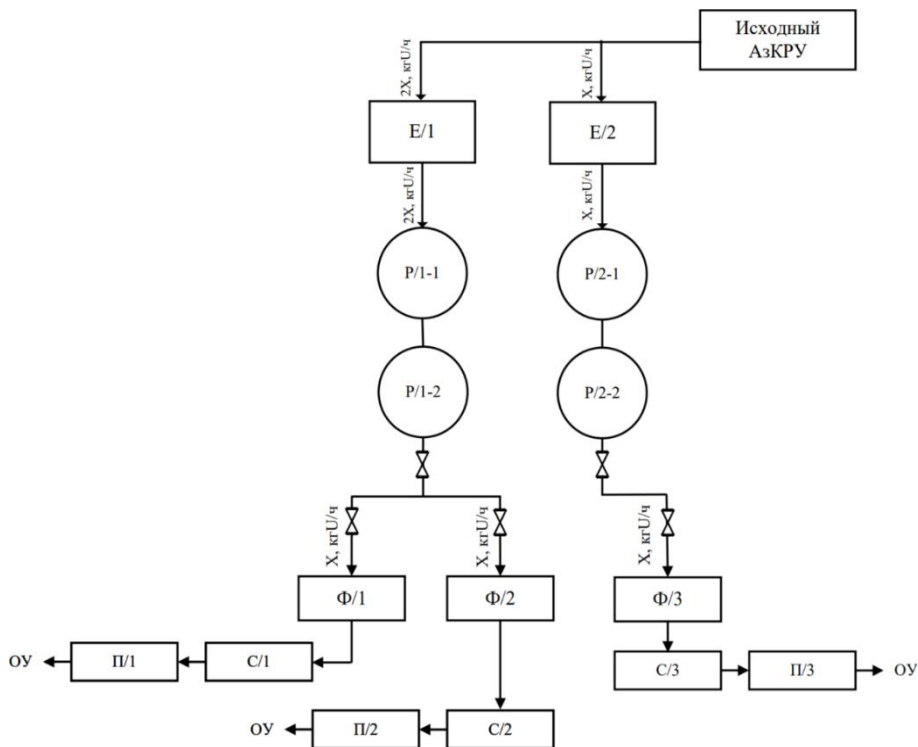
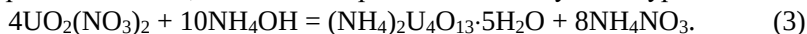
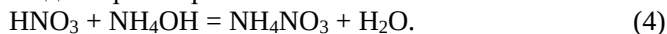


Рис. 1. Блок-схема получения оксидов урана

Одновременно с процессом осаждения протекает реакция нейтрализации присутствующей в исходном растворе азотной кислоты:

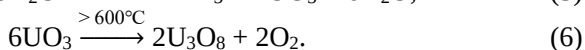
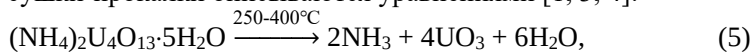


На качество получаемых осадков оказывают влияние в основном исходная концентрация урана в растворе, pH среды и температура в процессе осаждения, время пребывания пульпы в реакторах и интенсивность ее перемешивания.

Полученные в ходе реакции осаждения полиуранаты аммония подвергают фильтрации на барабанных вакуум-фильтрах до влажности не более 20% и отправляют на следующую стадию сушки-прокалки. Термическое разложение ПУА проводят в две стадии:

- сушку при температуре в зоне обогрева реторты $(550 \pm 50)^\circ\text{C}$ в течение 2–6 ч (температура в слое продукта $(200\text{--}300)^\circ\text{C}$;
- прокалку при температуре $(700 \pm 50)^\circ\text{C}$ в течение 20–40 мин с образованием при температуре $(350 \pm 50)^\circ\text{C}$ триоксида урана, а при более высоких температурах октаоксида триурана.

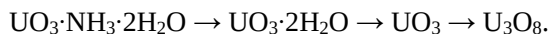
Процессы сушки-прокалки описываются уравнениями [1, 3, 4]:



Свойства порошка оксидов урана в значительной мере закладываются на стадии осаждения полиуранатов аммония, а также частично – на последующих операциях сушки и прокалки [2, 5].

Термическое разложение полиуранатов аммония на протяжении длительного времени подробно изучалось различными исследователями. Так, по данным Б.В. Громова [3], состав U_3O_8 колеблется в зависимости от условий разложения ПУА. При прокаливании в течение 2 ч при температуре свыше 400°C в продукте полностью отсутствует аммиачный азот, а влага полностью удаляется при температуре свыше 600°C . По данным авторов [5], процесс разложения полиуранатов аммония на воздухе и инертной среде протекает в пять стадий, октаоксид триурана образуется при температуре свыше 450°C .

В работе [6] исследовались кинетика и механизмы разложения диураната аммония до октаоксида триурана. Общий процесс разложения описан следующим образом:



Авторы работы [7] изучали термическое разложение ПУА в атмосфере аргона и кислорода. По их данным, превращение полиураната аммония в оксиды урана в основном происходит после дегидратации, денитрации и восстановления. Потеря массы образцов при получении октаоксида триурана в данных исследованиях составила 17,2 и 17,6% для аргона и кислорода соответственно. Образование U_3O_8 в атмосфере кислорода (при 630°C) происходит на 58% выше, чем в атмосфере аргона (при 572°C), что связано, по мнению исследователей, с разницей энергий активации при проведении процесса разложения в данных атмосферах.

В работе [8] замечено снижение температуры разложения ПУА при проведении реакции в инертных или химически активных газах. Снижение происходит по схеме: водород < азот < воздух.

Согласно [9], температурный интервал, соответствующий той или иной стадии термического разложения, в значительной степени определяется условиями нагрева продукта. Так, с увеличением скорости нагрева специфические температурные интервалы смещаются в область более высоких температур. Напротив, при медленном нагревании или длительной выдержке образца при сравнительно низких температурах все реализуемые стадии термического разложения проходят при более низких температурах.

Согласно изотермам разложения оксидов урана от $\text{U}_{2,665}$ до $\text{U}_{2,20}$ [10] в среде кислорода ($P_{\text{O}_2} = 0,1$ МПа) конверсия UO_3 в U_3O_8 начинается при температуре 470°C и заканчивается при температуре выше 650°C , а в вакууме – ниже 580°C . Помимо реакционной среды, температура начала конверсии триоксида урана обусловлена существованием шести кристаллических и одной аморфной модификации, имеющих различную устойчивость [1, 10, 11]. Тип модификации определяется структурой исходного вещества и условием

получения, которое зависит от давления, температуры и парциального давления кислорода в системе. Неустойчивые формы UO_3 , например аморфная, начинают разлагаться на воздухе при $(400\text{--}500)^\circ\text{C}$ и превращаются в U_3O_8 при 650°C . Некоторые устойчивые аллотропные модификации UO_3 начинают разлагаться при 600°C , а полное их превращение в U_3O_8 происходит при 800°C (но не более 900°C).

Ранее авторы работы [12] изучали получение оксидов урана термическим разложением тетраураната аммония, полученного в лабораторных условиях, в атмосфере азота и на воздухе. В работе рассмотрен и описан механизм термического разложения тетраураната аммония до оксидов урана, рассчитаны кинетические параметры, выработаны рекомендации по проведению технологического процесса в барабанной вращающейся печи.

Однако данные разложения полиуранатов аммония, полученные в производственных условиях и приведенные в работе [12], имеют отличия, поэтому целью настоящего исследования стало установление кинетики и механизма процессов, происходящих в промышленных барабанных печах сушки-прокалки получения оксидов урана при сушке и термическом разложении полиуранатов аммония.

Полученные данные позволили оптимизировать процесс и тем самым повысить производительность, селективность и безопасность данных производственных узлов для получения оксидов урана с требуемыми свойствами.

Материалы и методы

Для установления кинетики и механизма процессов, происходящих в барабанных печах сушки-прокалки при получении оксидов урана, проведены исследования по термическому разложению следующих образцов твердых продуктов:

1) полиураната аммония, полученного в промышленных условиях при взаимодействии раствора уранилнитрата концентрацией (300 ± 10) г/л по урану с 20–25%-ным раствором аммиака в двуступенчатом каскаде реакторов осаждения (агитаторов);

2) полупродуктов разложения, полученных при сушке ПУА при температуре $(250 \pm 50)^\circ\text{C}$ в барабанных печах на трех технологических нитках (см. рис. 1).

Исследования проводили на термоанализаторе SDT Q600 в диапазоне температур от 20 до 900°C со скоростью нагрева $10^\circ/\text{мин}$. Результатами анализа являются кривые: ТГ – зависимость массы навески (или изменения массы навески) от температуры или времени; ДТА – тепловые изменения, возникающие в нагреваемом веществе (разность температур между образцом исследуемого вещества и термическим эталоном от температуры окружающей среды); ДТГ – зависимость скорости изменения массы вещества от времени или температуры внешней среды.

Состав образцов определяли с помощью рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре «ARL X'TRA».

Расчет энергии активации по данным термограмм разложения провели согласно методике, изложенной в [13].

Результаты и обсуждение

Исследование термического разложения полиураната аммония $(\text{NH}_4)_2\text{U}_4\text{O}_{13} \cdot n\text{H}_2\text{O}$

В результате проведенных исследований по изучению термического разложения продуктов производства оксидов урана получены термограммы образцов, приведенные на рис. 2,3.

Согласно проведенному рентгеноструктурному анализу, состав продукта, полученного при осаждении полиуранатов аммония, был близок к соединению состава $(\text{NH}_4)_2\text{U}_4\text{O}_{13} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

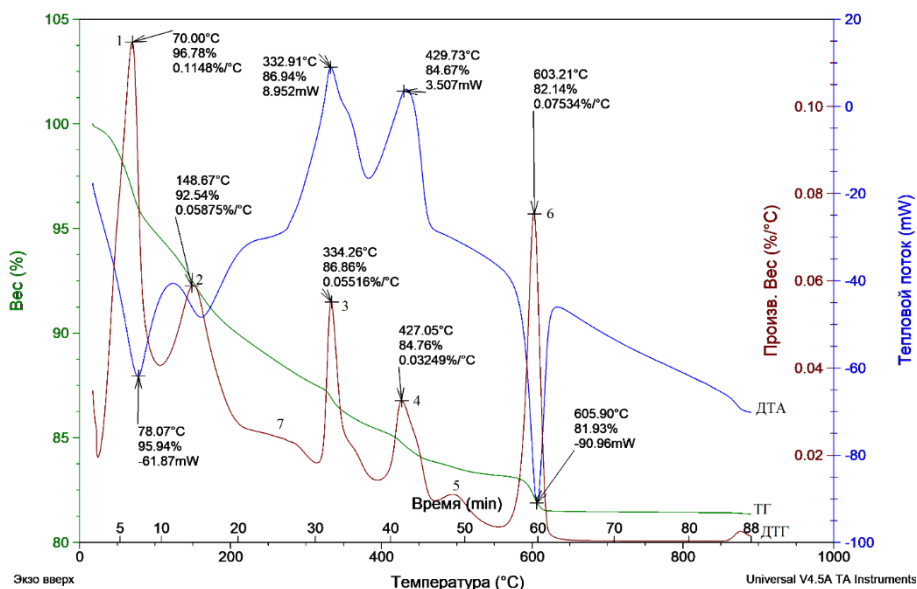


Рис. 2. Термограмма разложения полиураната аммония

Процесс разложения полиураната аммония (см. рис. 2) носит сложный характер, общая потеря массы образца составила $\sim 19\%$ при нагреве за 1 ч до 620°C (кривая ТГ). При рассмотрении дифференциальной кривой (ДТГ) можно выделить 6 пиков, характеризующих скорость изменения массы:

1) при температурах $(25\text{--}125)^\circ\text{C}$ с максимумом при 70°C и потерей массы образца $3,2\%$;

2) при температурах $(125\text{--}220)^\circ\text{C}$ с максимумом при 149°C и потерей массы образца $4,5\%$;

3) при температурах $(315\text{--}385)^\circ\text{C}$ с максимумом при 334°C и потерей массы образца $5,6\%$;

4) при температурах (385–465)°С с максимумом при 427°С и потерей массы образца 2,1%;

5) при температурах (465–550)°С с максимумом при 500°С и потерей массы образца 1,3%;

6) при температурах (550–630)°С с максимумом при 603°С и потерей массы образца 2,1%.

При рассмотрении дифференциальной термической кривой (ДТА) полиураната аммония видно, что термическое разложение сопровождается тремя эндо- и двумя экзоэффектами, что соответствует пикам на кривой ДТГ 1, 2, 6 и 3, 4 соответственно.

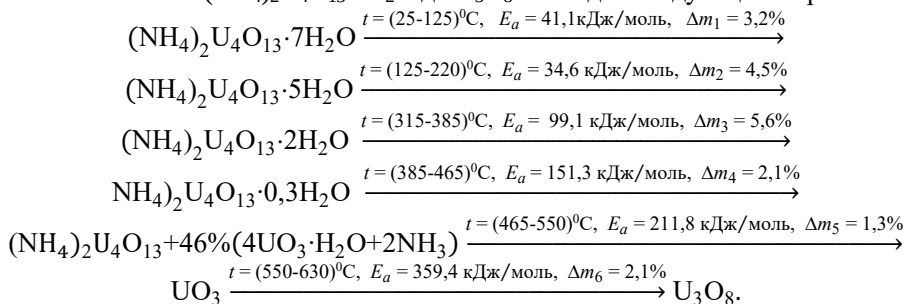
Определено, что первые два эндотермических эффекта в области температур (25–125)°С и (125–220)°С соответствуют удалению гигроскопической и частично кристаллизационной влаги из ПУА.

Экзотермические эффекты в области (315–385)°С и (385–465)°С соответствуют двустадийному удалению аммонийного азота и разложению полиураната аммония до гидратированного триоксида урана $\text{UO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$. Диапазон температур от 465 до 630°С соответствует удалению остаточной кристаллизационной влаги из триоксида урана с последующим образованием октаоксида триурана.

Из рис. 2 видно, что дальнейшее повышение температуры от 630 до 900°С приводит к незначительной убыли массы образца, это происходит за счет диссоциации U_3O_8 с выделением незначительного количества кислорода и образованием U_3O_{8-x} .

В диапазоне температур (220–315)°С наблюдается небольшой «холм», характеризующийся разложением нитрата аммония.

Таким образом, вероятностный механизм сушки и разложения полиураната аммония состава $(\text{NH}_4)_2\text{U}_4\text{O}_{13} \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ до U_3O_8 выглядит следующим образом:



Исследование термического разложения полупродуктов, образовавшихся в печах сушки

При проведении рентгеноструктурного анализа полупродуктов, образовавшихся в барабанных сушильных печах С_{1–3} (см. рис. 1), получены соединения состава $(\text{NH}_4)_2\text{U}_4\text{O}_{13} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (в печи 1), $(\text{NH}_4)_2\text{U}_4\text{O}_{13} \cdot 1,6\text{H}_2\text{O}$ (в печи 2) и $(\text{NH}_4)_2\text{U}_4\text{O}_{13} \cdot 1,7\text{H}_2\text{O}$ (в печи 3).

Видно, что полупродукты, полученные в разных печах сушки C_{1-3} , существенно не различаются по составу, а отличаются лишь по степени разложения полиуранатов аммония. Это можно объяснить тем, что температурные режимы в печах сушки C_{1-3} несколько отличались. Температура слоя продукта в печи C_2 достигала значений $(290 \pm 10)^\circ\text{C}$, в печи C_3 – $(270 \pm 10)^\circ\text{C}$ и в печи C_1 – $(250 \pm 10)^\circ\text{C}$, что вызвано разной мощностью, конструктивными особенностями и производительностями данных сушильных печей.

Были сняты термограммы разложения полупродуктов, полученных во всех трех сушильных печах. Они практически не отличались друг от друга, поэтому в работе приведена термограмма полупродуктов, полученных в печи C_1 (рис. 3).

Видно, что на кривой ДТГ первые два пика в температурных диапазонах $(25\text{--}125)^\circ\text{C}$ и $(125\text{--}220)^\circ\text{C}$ исчезли. Это свидетельствует о том, что в печах сушки C_{1-3} при температурах в слое на выходе до 250°C из ПУА удаляется гигроскопическая и частично кристаллизационная влага, а стадии термического разложения полиураната аммония до октаоксида триурана проходят в печах прокалки Π_{1-3} .

При рассмотрении дифференциальных кривых (ДТГ) на термограммах разложения полупродуктов печей сушки C_{1-3} можно выделить 4 пика, характеризующих скорость изменения массы:

- 1) при температурах $(315\text{--}385)^\circ\text{C}$ с максимумами при 334 , 335 и 335°C (для печей C_1 , C_2 и C_3 соответственно);
- 2) при температурах $(385\text{--}465)^\circ\text{C}$ с максимумами при 432 , 433 и 435°C ;
- 3) при температурах $(465\text{--}550)^\circ\text{C}$ с максимумами при 508 , 510 и 508°C ;
- 4) при температурах $(550\text{--}630)^\circ\text{C}$ с максимумами при 607 , 607 и 606°C .

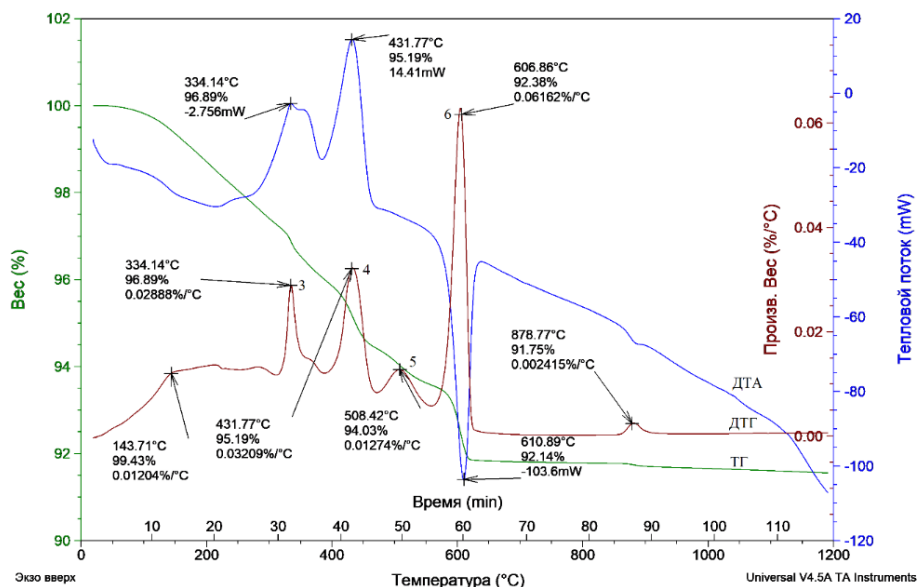


Рис. 3. Термограмма разложения полупродукта из печи сушки C_1

Общая потеря массы при нагреве полупродуктов из печей C_{1-3} за 1 ч до 620°C (кривая ТГ) составила от 8,2 до 8,6%, т.е. потеря массы полупродуктов при нагреве практически одинаковая, что указывает в целом на их одинаковый состав.

Механизм разложения полупродукта из печей сушки (см. рис. 3, пики 3–6) и полиураната аммония (см. рис. 2, пики 3–6) практически совпадает и подтверждается результатами расчетов энергии активации для полупродуктов (таблица).

Результаты термогравиметрического исследования полупродуктов из сушилных печей C_{1-3}

Но- мер пика	Темпера- турный диапазон, $^{\circ}\text{C}$	Полупродукт печи C_1		Полупродукт печи C_2		Полупродукт печи C_3	
		Потеря массы Δm_1 , %	Энергия акти- вации Ea_1 , кДж/моль	Потеря массы Δm_2 , %	Энергия акти- вации Ea_2 , кДж/моль	Потеря массы Δm_3 , %	Энергия акти- вации Ea_3 , кДж/моль
3	315–385	1,2	97,9	1,2	98,6	1,2	97,2
4	385–465	1,5	153,2	1,6	165,3	1,7	157,4
5	465–550	0,9	217,8	0,8	221,5	0,8	215,2
6	550–630	1,7	362,3	1,8	363,4	1,9	370,7

Заключение

Исследования термического разложения продуктов производства оксидов урана показали, что процесс термического разложения полиуранатов аммония является многостадийным и свойства получаемого октаоксида триурана напрямую зависят от качества проведения процессов сушки и прокали полиуранатов аммония.

При термическом разложении ПУА в диапазоне температур от 25 до 220°C происходит удаление гигроскопической и частично кристаллизационной влаги, в области температур от 220 до 465°C наблюдаются двустадийное удаление аммиака, кристаллизационной влаги и образование гидратов триоксида урана. Область температур от 465 до 630°C характеризуется удалением кристаллизационной влаги из кристаллогидратов триоксида урана и переходом его в октаоксид триурана. Дальнейшее повышение температуры от 630 до 900°C приводит к незначительной убыли массы образца, что связано с выделением незначительного количества кислорода за счет образования соединения с дефицитом кислорода U_3O_{8-x} .

Результаты термогравиметрических исследований полупродуктов, полученных в печах сушки, подтверждают данные исследования по термическому разложению ПУА, причем для полупродуктов с трех ниток сушки картина термического разложения идентична.

Список источников

1. Волкович В.А., Смирнов А.Л. Металлургия урана и технология его соединений : курс лекций : в 3 ч. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. Ч. 3. 138 с.

2. Андреев Г.Г., Дьяченко А.Н. Введение в химическую технологию ядерного топлива. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. 165 с.
3. Громов Б.В. Введение в химическую технологию урана : учебник для вузов. М. : Атомиздат, 1978. 336 с.
4. Маслов А.А., Каляцкая Г.В., Амелина Г.Н и др. Технология урана : учеб. пособие. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2007. 97 с.
5. Гузеев В.В., Гузеева Т.И. Основы технологии урана : учеб. пособие. Северск : Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2016. 207 с.
6. Ball M.C., Birkett C.R.G., Brown D.S., Jaycock M.J. The thermal decomposition of ammonium diuranate // J. Inorg. Nucl. Chem. 1974. Vol. 36, is. 7. P. 1527–1529. doi: 10.1016/0022-1902(74)80617-2
7. Selvakumar J., Kumari A., Srinivasan S. et al. Thermal Decomposition Kinetics of Ammonium Di-Uranate to Uranium Oxide in Argon and Oxygen Atmosphere / SSRN. 2023. P. 5–9. URL: <https://ssrn.com/abstract=4395593>
8. Kim B.H., Lee Y.B., Prelas M.A., Ghosh T.K. Thermal and X-ray diffraction analysis studies during the decomposition of ammonium uranyl nitrate // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2012. Vol. 292. P. 1075–1083. doi: 10.1007/s10967-011-1579-8
9. Жиганов А.И., Гузеев В.В., Андреев Г.Г. Технология диоксида урана для керамического ядерного топлива. Томск : СТУ, 2002. 328 с.
10. Кац Дж., Рабинович Е. Химия урана. Уран как элемент, его бинарные соединения, гидраты окислов и оксегалогениды : пер. с англ. М. : Изд-во иностр. лит., 1954. 491 с.
11. Жерин И.И., Амелина Г.Н. Химия тория, урана, плутония : учеб. пособие. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. 146 с.
12. Брендаков В.Н., Дементьев Ю.Н., Кладиев С.Н., Пищулин В.П. Технология и оборудование производства оксидов урана // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308, № 6. С. 95–98.
13. Пилоян Г.О., Новикова О.С. Термографический и термогравиметрический методы определения энергии активации процессов диссоциации // Журнал неорганической химии. 1967. Т. 12, № 3. С. 602–604.

References

1. Volkovich, V.A.; Smirnov, A.L. *Metallurgy of uranium and technology of its compounds: a course of lectures: in 3 hours*; Ural University Press: Ekaterinburg, 2014; Part 3.
2. Andreev, G.G.; Dyachenko, A.N. *Introduction to Nuclear Fuel Chemical Technology*; Tomsk Polytechnic University Press: Tomsk, 2010.
3. Gromov, B.V. *Introduction to the chemical technology of uranium. Textbook for universities*; Atomizdat: Moscow, 1978.
4. Maslov, A. A. et al. *Uranium Technology: a textbook*; Tomsk Polytechnic University Press: Tomsk, 2007; pp. 20.
5. Guzeev, V. V.; Guzeeva, T. I. *Fundamentals of uranium technology: a textbook*; STI NRNU MEPHI Press: Seversk, 2016.
6. Ball M. C.; Birkett C. R. G.; Brown D. S.; Jaycock M. J. The thermal decomposition of ammonium diuranate. *J. Inorg. Nucl. Chem.* 1974. Vol. 36. Issue 7. P. 1527–1529. DOI: 10.1016/0022-1902(74)80617-2.
7. Selvakumar J.; Kumari A.; Srinivasan S. et al. *Thermal Decomposition Kinetics of Ammonium Di-Uranate to Uranium Oxide in Argon and Oxygen Atmosphere*, January 2023, pp. 5–9. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4395593>
8. Kim B.H.; Lee Y.B.; Prelas M.A.; Ghosh T.K. Thermal and X-ray diffraction analysis studies during the decomposition of ammonium uranyl nitrate. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2012. Vol. 292; R. 1075–1083. DOI: 10.1007/s10967-011-1579-8

9. Zhiganov, A.I.; Guzeev, V.V.; Andreev, G.G. *Uranium dioxide technology for ceramic nuclear fuel*; STT: Tomsk, 2002; pp. 99–101.
10. Katz, J.; Rabinovich, E. *The chemistry of uranium. Uranium as an element, its binary compounds, oxide hydrates, and oxyhalides* / translated from English; Foreign Literature Publishing House: Moscow, 1954; pp. 205, 243–261.
11. Zherin, I.I.; Amelin, G.N. *Chemistry of thorium, uranium, plutonium: a textbook*; Tomsk Polytechnic University Press: Tomsk, 2010; pp. 63–67.
12. Brendakov V.N.; Dement'ev Yu.N.; Kladiev S.N.; Pishchulin V.P. Technologies and equipment for the production of uranium oxides. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*. 2005, Vol. 308, No. 6, pp. 95–98.
13. Piloyan G.O., Novikova O.S. Thermographic and thermogravimetric methods for determining the activation energy of dissociation processes. *Journal of Inorganic Chemistry*. 1967, Vol. 12, No. 3, pp. 602–604.

Сведения об авторах:

Софронов Владимир Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии материалов современной энергетики Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Северск, Россия). E-mail: vlsofronov@mephi.ru

Пименов Степан Геннадьевич – технолог производства химических соединений урана АО «Сибирский химический комбинат» (Северск, Россия). E-mail: Stepan.pimenov.2013@mail.ru

Зиновьева Анна Вадимовна – инженер-технолог научно-технического центра АО «Сибирский химический комбинат» (Северск, Россия). E-mail: AVPolyanskaya@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Sofronov Vladimir L. – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Chemistry and Technology of Materials of Modern Energy of the Seversk Technological Institute – branch of the National Research Nuclear University MEPHI (Seversk, Russia). E-mail: vlsofronov@mephi.ru

Pimenov Stepan G. – Technologist of Production of Chemical Compounds of Uranium of JSC Siberian Chemical Plant (Seversk, Russia). E-mail: Stepan.pimenov.2013@mail.ru

Zinovieva Anna V. – Engineer-Technologist of the Scientific and Technical Center of JSC Siberian Chemical Plant (Seversk, Russia). E-mail: AVPolyanskaya@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.01.2025; принята к публикации 04.04.2025
The article was submitted 22.01.2025; accepted for publication 04.04.2025