

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С УЧАСТИЕМ РАДИОНУКЛИДОВ УРАНА, ПЛУТОНИЯ, ЕВРОПИЯ ПРИ НАГРЕВЕ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

© 2023 г. Н. М. Барбин ^{а, б, *}, С. А. Титов^а, Д. И. Терентьев^а, А. М. Кобелев^а

^а Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России,
620062, Екатеринбург, ул. Мира, д. 22

^б Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина,
620002, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

* e-mail: NMBarbin@mail.ru

Поступила в редакцию 24.12.2022, после доработки 22.02.2023, принята к публикации 28.02.2023

Методом термодинамического моделирования исследовано поведение радионуклидов U, Pu, Eu при нагревании радиоактивного графита в атмосфере воздуха. При помощи программного комплекса TERRA проведен полный термодинамический анализ в интервалах температур от 300 до 3600 К с целью установления возможного состава газовой фазы. Установлено, что уран в диапазоне температур от 300 до 2000 К находится в виде конденсированных $\text{UO}_{2(\text{к})}$, $\text{UOCl}_{2(\text{к})}$, $\text{UOCl}_{(\text{к})}$, $\text{CaUO}_{4(\text{к})}$, при повышении температуры от 2000 до 3600 К в виде газообразных UCl_4 , UO_3 , UO_2 и виде ионизированных UO_3^+ , UO_2^+ . Плутоний при температуре от 300 до 1900 К находится в виде конденсированных $\text{PuCl}_{3(\text{к})}$, $\text{PuOCl}_{(\text{к})}$, $\text{Pu}_2\text{O}_{3(\text{к})}$, $\text{PuO}_{2(\text{к})}$, при увеличении температуры от 1900 до 3600 К в виде газообразных PuO_2 , PuO и виде ионизированного PuO^+ . Европий на участке температур от 300 до 2000 К находится в виде конденсированных $\text{EuCl}_{2(\text{к})}$, $\text{EuCl}_{3(\text{к})}$, $\text{EuOCl}_{(\text{к})}$, $\text{Eu}_2\text{O}_{3(\text{к})}$, $\text{EuO}_{(\text{к})}$ при повышении температуры от 2000 до 3600 К в виде газообразных EuO , Eu и виде ионизированного Eu^+ . Установлены основные реакции внутри отдельных фаз и между конденсированными и газовой фазами. Рассчитаны их константы равновесия.

Ключевые слова: термодинамическое моделирование, термические процессы, радионуклиды, атмосфера воздуха, радиоактивный графит, константы равновесия.

DOI: 10.31857/S0033831123030085, **EDN:** EOAUSU

ВВЕДЕНИЕ

Атомная энергетика является одним из основных источников выработки электроэнергии в мире. Всего в мире эксплуатируется 182 атомные электростанции общей электрической мощностью 411 ГВт. В России эксплуатируется 11 АЭС общей электрической мощностью 30 ГВт.

В России и странах мирового сообщества существует проблема обращения с облученным реакторным графитом активных зон уран-графитовых реакторов. При проектировании ядерных реакто-

ров не предусматривались технические решения по выводу из эксплуатации, а также отсутствовали безопасные технологии обращения с облученным реакторным графитом [1, 2]. На сегодняшний день объем облученного графита в мире составляют 260000 т (из них 60000 т находится в Российской Федерации) [3].

Одним из способов решения данной проблемы является высокотемпературная термическая обработка графита в различных средах. Под воздействием температуры часть радионуклидов переходит в газообразное состояние и выходит из системы [3].

Таблица 1. Состав исходной системы

Фаза	Фазовый состав	Содержание, мас%
Газовая (89.44%)	O ₂	21.42
	N ₂	78.57
Конденсированная (10.56%)	C	99.98
	U	1.15×10^{-2}
	Cl	1.89×10^{-3}
	Ca	2.70×10^{-4}
	Pu	7.27×10^{-5}
	Eu	1.15×10^{-6}

При переработке радиоактивного графита методом сжигания в атмосфере воздуха важно знать поведение радионуклидов, присутствующих в нем.

Данное исследование проводилось методом термодинамического моделирования, которое позволяет определять равновесный состав исследуемой системы и спрогнозировать результаты фазовых и химических превращений. Ранее было изучено поведение U, Pu, Eu при нагреве радиоактивного графита в атмосфере водяного пара методом термодинамического моделирования [4], что показало его эффективность.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Проведение натурных экспериментов при высоких температурах не всегда позволяет получить достоверные сведения в связи с их сложностью и ошибками измерений. Метод термодинамического моделирования успешно используется для исследования высокотемпературных систем [5–8]. Проводили полный термодинамический анализ всей системы в целом, который позволяет учесть абсолютно все процессы. В работе применяли программу TERRA, основанную на принципе максимума

энтропии в соответствии со вторым началом термодинамики для равновесных систем [5].

Термодинамическое моделирование проводили в атмосфере воздуха при давлении 0.1 МПа в температурном интервале от 300 до 3600 К с шагом 100 К. В расчетах учитывались только компоненты с концентрацией не менее 10^{-10} моль/кг.

Информация об исходном составе реакторного графита взята из работ [9, 10], исходный состав газовой фазы (воздух) взят из справочника [11]. Эти данные приведены в табл. 1. Предполагаемые формы существования радионуклидов в данной системе приведены в табл. 2. Возможные соединения радионуклидов U, Pu, Eu, присутствующих в равновесной системе взяты из баз данных по свойствам индивидуальных веществ ИВТАНТЕРМО и HSC. После завершения вычисления получали зависимость равновесного состава от температуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение урана по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в воздухе представлено на рис. 1. При повышении температур от 300 до 700 К (табл. 3) по реакции (1) конденсированный диоксид урана взаимодействует с конденсированным хлоридом кальция и переходит в конденсированный оксихлорид урана и конденсированный уранат кальция. В диапазоне температур от 300 до 800 К по реакции (2) конденсированный оксихлорид урана(IV) преобразуется в конденсированный оксихлорид урана(III) с образованием хлора. В интервале температур от 700 до 1000 К, конденсированный оксихлорид урана протекает в газообразный хлорид урана(IV) и конденсированный диоксид урана, реакция (3). На участке температур от 800 до 1400 К конденсированный ок-

Таблица 2. Предполагаемые формы существования радионуклидов

Радионуклид в графите	Тип соединения в равновесной системе
²³⁸ U, ²³⁶ U, ²³⁵ U	UC _(к) , UC _{2(к)} , U ₂ C _{3(к)} , UN _(к) , UN _{2(к)} , U ₂ N _{3(к)} , UH ₂ O _{4(к)} , UH ₄ O _{5(к)} , U _(г) , UO _(г) , UO _{2(к)} , UO _{2(г)} , UO _{3(к)} , UO _{3(г)} , U ₃ O _{8(к)} , U ₄ O _{9(к)} , UCl _{3(г)} , UCl _{4(г)} , UCl _{5(г)} , UCl _{3(к)} , UCl _{4(к)} , UCl _{5(к)} , UCl _{6(к)} , UOCl _(к) , UOCl _{2(к)} , UOCl _{3(к)} , UO ₂ Cl _(к) , UO ₂ Cl _{2(к)} , U ₂ O ₂ Cl _{5(к)} , U ₂ O ₄ Cl _{3(к)} , CaUO _{4(к)} , U ⁺ , UO ⁺ , UO ₂ ⁺ , UO ₂ ⁻ , UO ₃ ⁻
²³⁹ Pu, ²⁴⁰ Pu, ²⁴¹ Pu, ²⁴² Pu	PuC _(к) , PuN _(к) , PuOCl _(к) , Pu _(г) , PuO _(г) , PuO _{2(г)} , PuO _{2(к)} , Pu ₂ O _{3(к)} , PuC _{2(к)} , PuCl _{3(к)} , Pu ₂ C _{3(к)} , PuOCl _(к) , Pu _(г) ⁺ , PuO ⁺ , PuO ₂ ⁺
¹⁵⁰ Eu, ¹⁵¹ Eu, ¹⁵² Eu, ¹⁵³ Eu, ¹⁵⁴ Eu, ¹⁵⁵ Eu	Eu _(г) , EuO _(к) , EuO _(г) , Eu ₂ O _{3(к)} , EuCl _{2(к)} , EuOCl _(к) , EuCl _{3(к)} , EuCl _(к) , Eu ⁺

Таблица 3. Основные реакции и соответствующие им константы равновесия

Номер реакции	Реакция	ΔT , К	a	b	Δa	Δb
1	$3\text{UO}_{2(\text{к})} + \text{CaCl}_{2(\text{к})} = 2\text{UOCl}_{(\text{к})} + \text{CaUO}_{4(\text{к})}$	300–700	9.13533	–17623	1.09308	477.698
2	$\text{UOCl}_{2(\text{к})} = \text{UOCl}_{(\text{к})} + \text{Cl}$	300–800	14.6828	–28428	0.29739	163.062
3	$2\text{UOCl}_{2(\text{к})} = \text{UCl}_4 + \text{UO}_{2(\text{к})}$	700–1000	25.054	–20819	3.65814	2880.67
4	$\text{UOCl}_{(\text{к})} + \text{CO}_2 = \text{UO}_{2(\text{к})} + \text{CO} + \text{Cl}$	800–1400	15.1182	–32089	0.01239	12.9388
5	$\text{UCl}_4 + 2\text{CO}_2 = \text{UO}_{2(\text{к})} + 4\text{Cl} + 2\text{CO}$	1100–1300	40.4246	–96956	0.06449	76.8496
6	$\text{UO}_{2(\text{к})} + \text{CO}_2 = \text{UO}_3 + \text{CO}$	1500–2000	21.4434	–64114	0.10343	178.394
7	$\text{UO}_{2(\text{к})} + \text{CaCl}_2 + 2\text{CO}_2 = \text{CaUO}_{4(\text{к})} + 2\text{Cl} + 2\text{CO}$	1600–1800	13.2948	–48503	0.02837	48.0607
8	$\text{UO}_{2(\text{к})} + \text{CO}_2 = \text{UO}_3^- + \text{CO} - e^-$	1800–2000	20.7042	–68238	0.25165	476.813
9	$\text{UO}_{2(\text{к})} = \text{UO}_2^+ + e^-$	1800–2000	19.5468	–7225	0.36354	688.817
10	$\text{UO}_{2(\text{к})} = \text{UO}_2$	1800–2000	19.004	–69274	0.04789	90.7453
11	$\text{UO}_3 = \text{UO}_3^- - e^-$	2000–3100	1.05712	–7488.8	0.10099	250.343
12	$\text{UO}_3 = \text{UO}_2 + \text{O}$	2000–3600	16.5822	–71102	0.02492	66.5033
13	$\text{UO}_2^+ = \text{UO}_2 - e^-$	2000–2200	2.38074	–7877.9	0.04626	96.92
14	$\text{UO}_2 + \text{CO}_2 = \text{UO}_3^- + \text{CO} - e^-$	2000–2200	4.51476	–4575.9	0.03088	64.7057
15	$\text{UO}_3 = \text{UO}_2^+ + \text{O} + e^-$	2200–3600	16.8397	–69236	0.2701	756.775
16	$\text{UO}_3^- = \text{UO}_2^+ + \text{O} + e^-$	3100–3600	24.0539	–88708	1.66822	5566.71
17	$\text{UO}_3 = \text{UO}_2 + \text{O} + e^-$	3100–3600	20.1977	–78550	0.83863	2798.44
18	$\text{PuCl}_{3(\text{к})} + \text{CO}_2 = \text{PuOCl}_{(\text{к})} + \text{CO} + 2\text{Cl}$	700–1300	33.1622	–67437	0.00877	8.23171
19	$2\text{PuOCl}_{(\text{к})} + \text{CO}_2 = \text{Pu}_2\text{O}_{3(\text{к})} + 2\text{Cl} + \text{CO}$	1500–1800	26.6688	–82349	0.05005	82.0127
20	$\text{PuOCl}_{(\text{к})} + \text{CO}_2 = \text{PuO}_2 + \text{CO} + \text{Cl}$	1600–1900	32.6683	–105770	0.0978	170.093
21	$\text{Pu}_2\text{O}_{3(\text{к})} + \text{CO}_2 = 2\text{PuO}_2 + \text{CO}$	1800–2000	38.2121	–128325	0.09837	186.377
22	$\text{PuO}_{2(\text{к})} = \text{PuO}_2$	1900–2100	28.9804	17349.9	2.02939	4048.63
23	$\text{PuO}_2 = \text{PuO}^+ + \text{O} + e^-$	2000–3600	16.9583	–74148	0.2217	591.577
24	$\text{PuO}_2 = \text{PuO} + \text{O}$	2000–3600	16.1369	–72247	0.009	24.0191
25	$\text{EuCl}_{3(\text{к})} = \text{EuCl}_{2(\text{к})} + \text{Cl}$	300–800	17.57229	–27842.2	0.252047	138.1992
26	$\text{EuCl}_{2(\text{к})} + \text{CO}_2 = \text{EuOCl}_{(\text{к})} + \text{Cl} + \text{CO}$	1300–1600	–17.4212	–35999.4	0.276605	397.4906
27	$4\text{EuCl}_{2(\text{к})} + 6\text{CO}_2 = 2\text{Eu}_2\text{O}_{3(\text{к})} + 8\text{Cl} + 6\text{CO}$	1600–1800	103.5502	–301347	0.154251	261.3181
28	$\text{EuCl}_{2(\text{к})} + \text{CO}_2 = \text{EuO}_{(\text{к})} + 2\text{Cl} + \text{CO}$	1600–1800	25.9643	–84986	0.05389	91.2959
29	$2\text{EuOCl}_{(\text{к})} + \text{CO}_2 = \text{Eu}_2\text{O}_{3(\text{к})} + 2\text{Cl} + \text{CO}$	1600–1800	30.415	–83309	0.00191	3.243
30	$\text{Eu}_2\text{O}_{3(\text{к})} = 2\text{EuO} + \text{O}$	1800–2100	52.4327	–206052	0.08046	156.126
31	$\text{EuO}_{(\text{к})} = \text{EuO}$	1800–2100	17.2322	–61591	0.01389	26.9535
32	$\text{EuO}_{(\text{к})} = \text{Eu}^+ + \text{O} + e^-$	1800–2000	32.3081	–121448	0.33742	639.317
33	$\text{EuO}_{(\text{к})} = \text{Eu} + \text{O}$	1800–2000	29.7068	–119526	0.03313	62.7665
34	$\text{Eu}^+ + \text{CO}_2 = \text{EuO} + \text{CO} - e^-$	2200–2700	3.62844	–4931.3	0.04676	113.718
35	$\text{Eu} + \text{CO}_2 = \text{EuO} + \text{CO}$	2000–2700	5.78855	–6482.9	0.01278	29.5949
36	$\text{EuO} = \text{Eu}^+ + \text{O} + e^-$	2700–3600	15.2943	–61823	0.55494	1726.13
37	$\text{EuO} = \text{Eu} + \text{O}$	2700–3400	11.9718	–56719	0.01194	36.1101
38	$\text{Eu} = \text{Eu}^+ + e^-$	3400–3600	9.84401	–27541	0.73014	2553.41

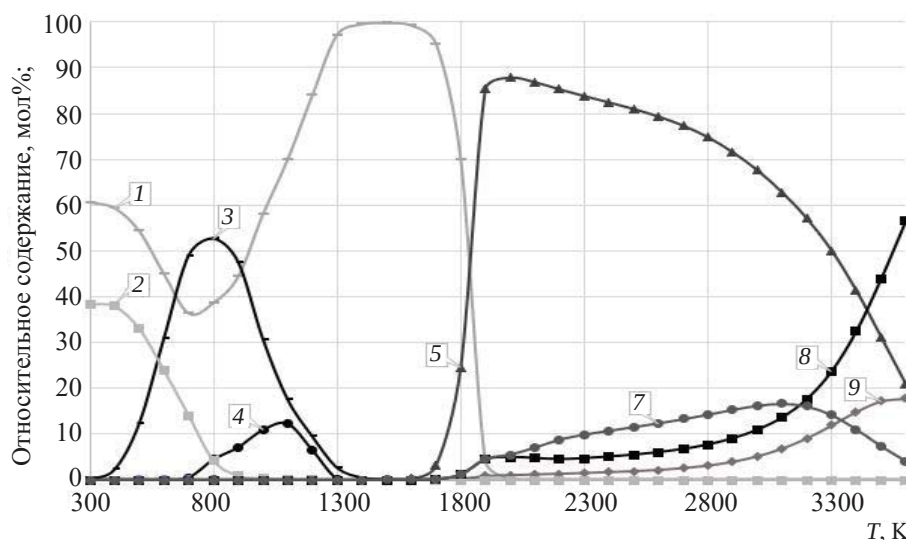


Рис. 1. Распределение урана по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в воздухе: 1 — $\text{UO}_{2(\text{к})}$, 2 — $\text{UOCl}_{2(\text{к})}$, 3 — $\text{UOCl}_{(\text{к})}$, 4 — UCl_4 , 5 — UO_3 , 6 — $\text{CaUO}_{4(\text{к})}$, 7 — UO_3^- , 8 — UO_2^+ , 9 — UO_2 .

сидхлорид урана реагирует с диоксидом углерода с образованием конденсированного диоксида урана, монооксида углерода и хлора, реакция (4). В области температур от 1100 до 1300 К по реакции (5) газообразный хлорид урана (IV) вступает в взаимодействие с диоксидом углерода и образует конденсированный диоксид урана, хлор и монооксид углерода. В отрезке температур от 1500 до 2000 К конденсированный диоксид урана начинает действовать с диоксидом углерода и происходит образование газообразного оксида урана(VI) и монооксида углерода по реакции (6). При температуре от 1600 до 1800 К в соответствии с реакцией (7) наблюдается взаимодействие конденсированного диоксида урана с хлоридом кальция и диоксидом углерода, в результате чего возникают конденсированный уранат кальция, хлор и монооксид углерода. В диапазоне температур от 1800 до 2000 К по реакции (8) конденсированный диоксид урана начинает действовать с диоксидом углерода и переходит в ионизированный оксид урана(VI) с образованием монооксида углерода. В том же интервале температур конденсированный диоксид урана превращается в первом случае в ионизированный диоксид урана по реакции (9), во втором — в газообразный диоксид урана по реакции (10). В интервале температур от 2000 до 3100 К в соответствии с реакцией (11) газообразный оксид урана(VI) превращается в ионизированный оксид урана(VI). На участке температур от 2000 до 3600 К в соответствии с реакцией (12)

происходит термическая диссоциация газообразного оксида урана(VI). В области температур от 2000 до 2200 К по реакции (13) ионизированный диоксид урана превращается в газообразный диоксид урана. В том же отрезке температур газообразный диоксид урана реагирует с диоксидом углерода с образованием ионизированного оксида урана(VI) и монооксида углерода, реакция (14). При повышении температуры от 2200 до 3600 К в соответствии с реакцией (15) газообразный оксид урана(VI) обратимо разлагается на ионизированный диоксид урана и кислород. В диапазоне температур от 3100 до 3600 К протекает термическая диссоциация ионизированного оксида урана(VI), реакции (16) и (17).

Распределение плутония по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в воздухе представлено на рис. 2. При повышении температуры от 700 до 1300 К в соответствии с реакцией (18) наблюдается взаимодействие конденсированного хлорида плутония с диоксидом углерода, в результате чего на выходе образуются конденсированный оксихлорид плутония(III), монооксид углерода и газообразный хлор. В диапазонах температур от 1500 до 1800 и от 1600 до 1900 К конденсированный оксихлорид плутония(III) реагирует с диоксидом углерода и переходит в первом случае в конденсированный оксид плутония(III), монооксид углерода и газообразный хлор согласно реакции (19), во втором — в газообразный оксид плутония(IV), монооксид углерода и газообразный хлор, реакция (20). В

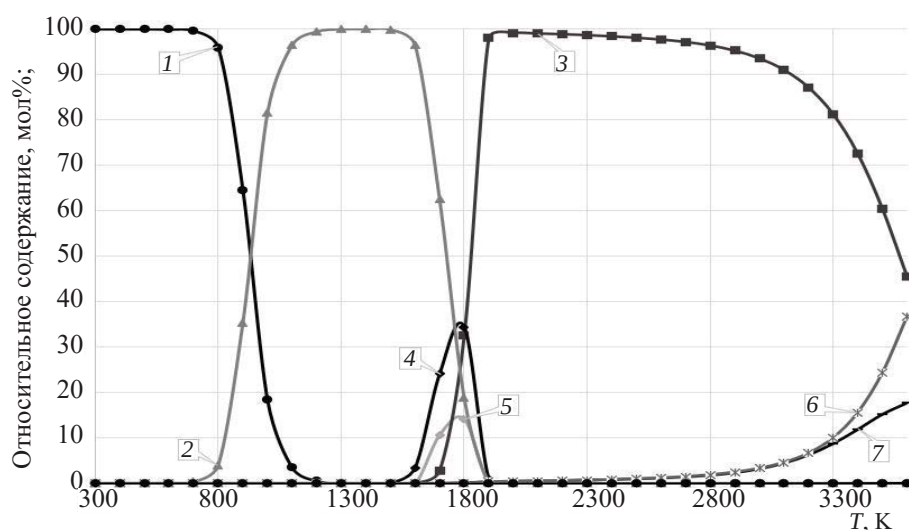


Рис. 2. Распределение плутония по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в воздухе: 1 – $\text{PuCl}_{3(\text{к})}$, 2 – $\text{PuOCl}_{(\text{к})}$, 3 – PuO_2 , 4 – $\text{Pu}_2\text{O}_{3(\text{к})}$, 5 – $\text{PuO}_{2(\text{к})}$, 6 – PuO^+ , 7 – PuO .

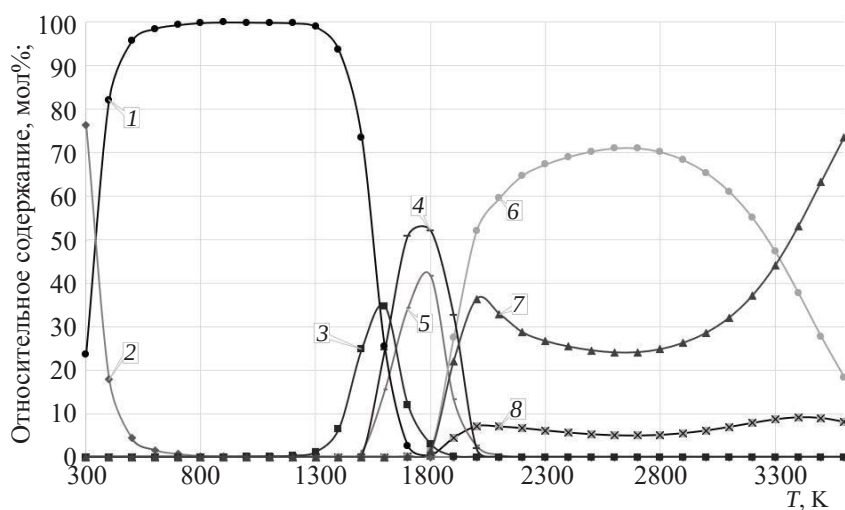


Рис. 3. Распределение европия по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в воздухе: 1 – $\text{EuCl}_{2(\text{к})}$, 2 – $\text{EuCl}_{3(\text{к})}$, 3 – $\text{EuOCl}_{(\text{к})}$, 4 – $\text{Eu}_2\text{O}_{3(\text{к})}$, 5 – $\text{EuO}_{(\text{к})}$, 6 – EuO , 7 – Eu^+ , 8 – Eu .

интервале температур от 1800 до 2000 К на основании реакции (21) конденсированный оксид плутония(III) начинает реагировать с диоксидом углерода с образованием конденсированного оксида плутония(IV) и монооксида углерода. В области температур от 1900 до 2100 К по реакции (22) конденсированный оксид плутония(IV) превращается в газообразный оксид плутония(IV). На участке температур от 2000 до 3600 К наблюдается термическая диссоциация газообразного оксида плутония(IV), реакции (23) и (24).

Распределение европия по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в воздухе

представлено на рис. 3. В интервале температур от 300 до 800 К в соответствии с реакцией (25) происходит термическое разложение конденсированного хлорида европия(III) с образованием конденсированного хлорида европия(II) и газообразного хлора. На участке температур от 1300 до 1600 К происходит взаимодействие конденсированного хлорида европия(II) с диоксидом углерода с образованием конденсированного оксихлорида европия(III), газообразного хлора и монооксида углерода по реакции (26). При температуре от 1600 до 1800 К по реакции (27) конденсированный хлорид европия(II) взаимодействует с диоксидом углерода, в результа-

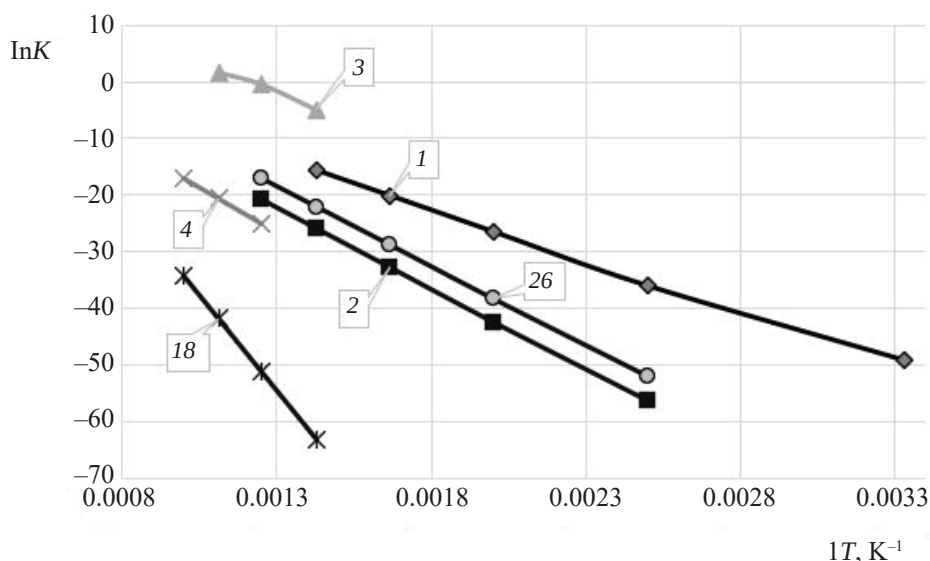


Рис. 4. Зависимость константы равновесия реакций от $1/T$ в интервале температур 300–1000 К. Цифрами обозначены номера реакций; то же на рис. 5, 6.

те чего образуются конденсированный оксид европия(III), газообразный хлор и монооксид углерода. В том же интервале температур конденсированный хлорид европия(II) реагирует с диоксидом углерода с образованием конденсированного оксида европия(II), газообразного хлора и монооксида углерода, реакция (28). В том же диапазоне температур в соответствии с реакцией (29) конденсированный оксихлорид европия(III) взаимодействует с диоксидом углерода и переходит в конденсированный оксид европия(III), газообразный хлор и монооксид углерода. На участке температур от 1800 до 2100 К по реакции (30) конденсированный оксид европия(III) превращается в газообразный оксид европия(II) с образованием кислорода. При температуре от 1800 до 2100 К в соответствии с реакцией (31) конденсированный оксид европия(II) превращается в газообразный оксид европия(II). В диапазоне температур от 1800 до 2000 К происходит термическая диссоциация конденсированного оксида европия(II), реакции (32) и (33). В интервале температур от 2200 до 2700 К ионизированный европий взаимодействует с диоксидом углерода, в результате чего образуются газообразный оксид европия(II) и монооксид углерода. В области температур от 2000 до 2700 К в соответствии с реакциями (34) и (35) наблюдается взаимодействие газообразного европия с диоксидом углерода с образованием оксида европия(II) и монооксида углерода. На участке температур от 2700 до 3600 К согласно реакциям

(36) и (37) протекает термическая диссоциация газообразного оксида европия(II). В диапазоне температур от 3400 до 3600 К газообразный европий частично переходит в ионизированный европий в соответствии с реакцией (38).

По результатам термодинамического моделирования, были определены основные реакции и их константы равновесия (табл. 3). Константы равновесия представлены аналитическими уравнениями вида:

$$\ln K_i = A_i + \frac{B_i}{T}$$

Зависимость константы равновесия реакций от $1/T$ приведены на рис. 4–6. В интервале температур 300–1000 К с увеличением температуры константы равновесия реакций увеличиваются, данное изменение показано на рис. 4 для реакций (1)–(4), (18), (26).

В диапазоне температур 1000–2200 К с увеличением температуры константы равновесия реакций увеличиваются, данное изменение показано на рис. 5 для реакций (4)–(10), (12), (18), (19), (22), (24), (25), (27)–(34). Также на данном участке с увеличением температуры константы равновесия реакций уменьшается, наблюдается это в реакции (23); константы равновесия не меняются в реакциях (11), (13), (14), (36).

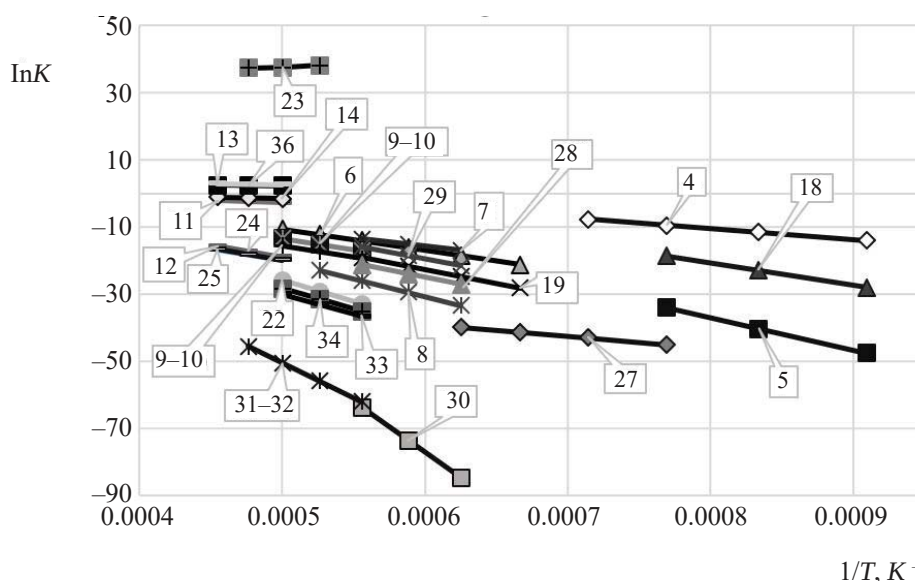


Рис. 5. Зависимость константы равновесия реакций от $1/T$ при нагревании радиоактивного графита в атмосфере воздуха при $T = 1000\text{--}2200$ К.

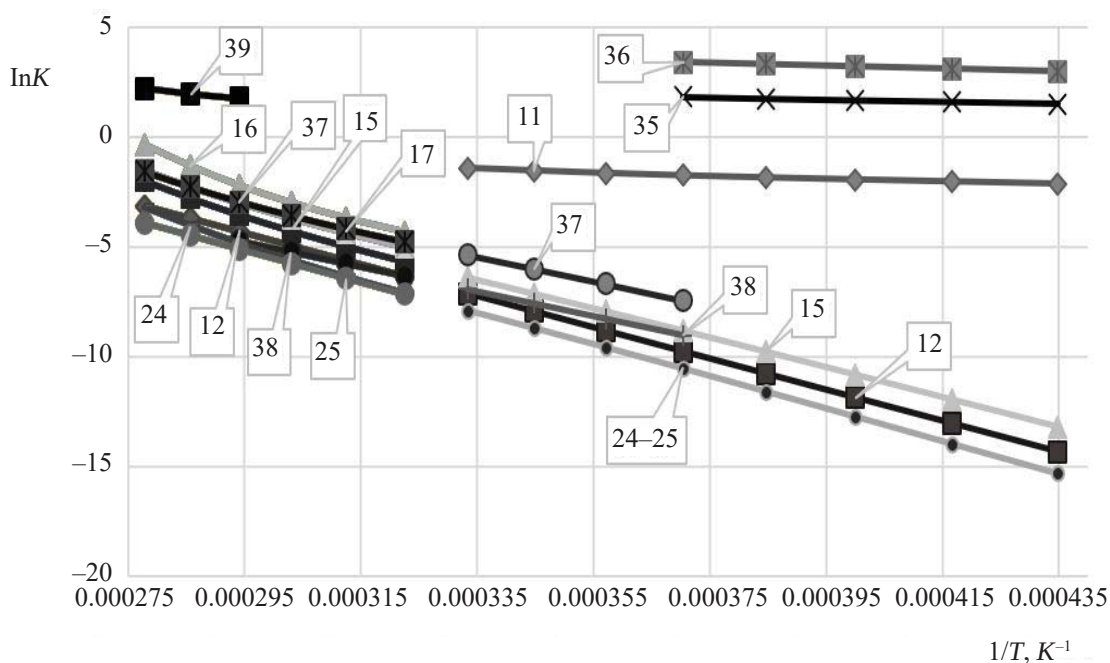


Рис. 6. Зависимость константы равновесия реакций от $1/T$ при нагревании радиоактивного графита в атмосфере воздуха при $T = 2200\text{--}3600$ К.

В области температур 2200–3600 К с увеличением температуры константы равновесия реакций увеличиваются, данное изменение показано на рис. 6 для реакций (11), (12), (15)–(17), (24), (25), (35)–(39).

Изменение реакционной среды (пар или воздух) ведет к изменению химических реакций, возникающих в процессе переработки реакторного графита.

В системе радиоактивный графит–водяной пар протекало 15 реакций с участием урана, три реакции с участием плутония, восемь реакций с участием европия [4, 12]. В системе радиоактивный графит–воздух протекало 17 реакций с участием урана, семь реакций с участием плутония, 14 реакций с участием европия. В различных атмосферах для урана протекает реакция (6), при этом температура начала

протекания реакции на 173 К ниже и реакция (10) протекает на 127 К выше для системы радиоактивный графит–воздух. В различных атмосферах для плутония протекает реакция (22), при этом температура начала протекания реакции на 227 К выше и реакция (24) протекает на 27 К выше для системы радиоактивный графит–воздух. В различных атмосферах для европия протекает реакция (31), при этом температура начала протекания реакции на 227 К выше и реакция (35) протекает на 27 К выше для системы радиоактивный графит–воздух. Данные сведения необходимы для разработки установок по переработке радиоактивного графита.

Термодинамическое моделирование показало, что уран, плутоний и европий, находящиеся в радиоактивном графите в виде примесей, при нагреве в атмосфере воздуха при достижении определенных температур переходят в газовую фазу. Это связано с взаимодействием графита и оксидной конденсированной фазы с кислородом воздуха в исследованном диапазоне температур.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по плану НИР МЧС России (приказ МЧС России от 21.12.2021 № 893).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блинова И.В., Соколова И.Д. // Атом. техника за рубежом. 2012. № 6. С. 3–14.
2. Цыганов А.А., Хвостов В.И., Комаров Е.А., Котлярский С.Г., Павлюк А.О., Шаманин И.В., Нестеров В.Н. // Изв. Томского политехн. ун-та. 2007. Т. 310, № 2. С. 94–98.
3. Скачек М.А. Радиоактивные компоненты АЭС: обращение, переработка, локализация: учеб. пособие для вузов. М.: МЭИ, 2014.
4. Барбин Н.М., Кобелев А.М., Терентьев Д.И., Алексеев С.Г. // Радиохимия. 2017. Т. 59, № 5. С. 445–448.
5. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 96 с.
6. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных системах. М.: Металлургия, 1994. 352 с.
7. Моисеев Г.К., Вяткин Г.П., Барбин Н.М. Применение термодинамического моделирования для изучения взаимодействия с участием ионных расплавов. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. 166 с.
8. Барбин Н.М., Тикина И.В., Терентьев Д.И., Алексеев С.Г. Термические свойства расплавов. Москва: Инфра-Инженерия, 2022. 276 с.
9. Роменков А.А., Туктаров М.А., Карлина О.К., Павлова Г.Ю., Юрченко А.Ю., Апаркин Ф.М., Горелов К.А., Барбин Н.М. // Годовой отчет НИКИЭТ-2010: Сб. статей. М.: НИКИЭТ, 2010. С. 150.
10. Шидловский В.В., Роменков А.А., Хаттарова Е.А., Гуськов А.В., Мартыанов А.В. // Годовой отчет НИКИЭТ-2010: Сб. статей. М.: НИКИЭТ, 2010. С. 178.
11. Перельман В.П. Краткий справочник химика / Под ред. В.В. Некрасова. М.: ГНТИ химической литературы, 1957. 530 с.
12. Кобелев А.М. Комбинированный способ переработки реакторного графита в водяном паре и оксидно-солевых расплавах: дис. ... к.т.н. Екатеринбург: Уральский федеральный ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2021. 264 с.