

УДК 541.13+11

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОСТАВА ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ГРАФИТА В ВОДЯНОМ ПАРЕ ИЛИ ВОЗДУХЕ

Н. М. Барбин<sup>1,2</sup>, А. М. Кобелев<sup>1</sup>, С. А. Титов<sup>1</sup>, Д. И. Терентьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уральский институт ГПС МЧС России, 620062 Екатеринбург, nmbarbin@mail.ru

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина  
620062 Екатеринбург

Проведен анализ распределения соединений плутония и америция в продуктах сгорания радиоактивного графита в водяном паре или воздухе. Исследование выполнялось методом термодинамического анализа с помощью программного комплекса TERRA в интервале температур  $400 \div 3200$  К. Установлено, что в водяном паре при температуре выше 900 К весь углерод переходит в газ, в воздухе температура его перехода составляет 1000 К. Превращение конденсированных соединений плутония в парообразные происходит в водяном паре при температуре выше 1800 К, а в воздухе — при 1700 К. Конденсированные соединения америция начинают переходить в парообразное состояние при температуре выше 2000 К, в воздухе температура их перехода равна 2200 К.

Ключевые слова: термодинамический анализ, актиниды, воздух, водяной пар, радиоактивный графит.

DOI 10.15372/FGV20220403

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день ядерная энергетика продвинулась далеко вперед, и будущее мировой экономики трудно представить без ее использования. В 32 странах мира эксплуатируется 190 атомных электростанций (АЭС) с 442 энергоблоками, суммарной электрической мощностью около 393 496 МВт. На данный момент 51 энергоблок находится в стадии строительства и 196 энергоблоков закрыто [1–4].

После вывода из эксплуатации энергоблоков, выработавших свои ресурсы, возникает проблема утилизации отработанных ядерных материалов, наибольший объем среди которых занимает радиоактивный графит. Общее количество облученного графита в мире составляет около 250 000 т [5].

Облученный радиоактивный графит несет потенциальную опасность здоровью людей и окружающей среде. Особо опасными радиоактивными веществами, присутствующими в реакторном графите, являются изотопы плуто-

ния и америция [5–11].

Предлагаются различные технологии переработки радиоактивного графита: термическая обработка до 1400 °С; высокотемпературное окисление; кислотная обработка; промывка детергентами, расплавом солей; применение искровой эрозии; плазмификация; электрохимические методы; биологические методы [5]; переработка в кипящем слое, с помощью газового лазера, с помощью перегретого водяного пара [11].

По расчетам специалистов, применение технологии сжигания позволит уменьшить объемы радиоактивного графита на  $\approx 98\%$  [11].

Целью работы является определение состава летучих актинидов при сжигании радиоактивного графита в водяном паре или воздухе. Задачи работы: проведение термодинамического анализа, определение основных реакций, протекающих при горении радиоактивного графита, в котором содержатся актиниды плутония и америция в водяном паре или воздухе, расчет констант равновесия данных реакций.

Работа выполнена по плану НИР МЧС России.

© Барбин Н. М., Кобелев А. М., Титов С. А., Терентьев Д. И., 2022.

Таблица 1

## Существующие формы радионуклидов

Радионуклид в графите	Тип соединения в равновесной системе
Водяной пар	
$^{12}\text{C}$ , $^{14}\text{C}$	$\text{CO}_{(r)}$ , $\text{CO}_{2(r)}$ , $\text{C}_{(к)}$ , $\text{C}_{(r)}$ , $\text{C}_2\text{O}_{(r)}$ , $\text{C}_3\text{O}_{2(r)}$ , $\text{CH}_{(r)}$ , $\text{CH}_{2(r)}$ , $\text{CH}_{3(r)}$ , $\text{CH}_{4(r)}$ , $\text{C}_2\text{H}_{(r)}$ , $\text{C}_2\text{H}_{2(r)}$ , $\text{C}_2\text{H}_{4(r)}$ , $\text{C}_2\text{H}_{5(r)}$ , $\text{C}_2\text{H}_{6(r)}$ , $\text{C}_3\text{H}_{8(r)}$ , $\text{CHO}_{(r)}$ , $\text{CHO}_{2(r)}$ , $\text{CH}_2\text{O}_{(r)}$ , $\text{CH}_2\text{O}_{2(r)}$ , $\text{CH}_3\text{O}_{(r)}$ , $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_{2(r)}$ , $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_{(r)}$ , $\text{ClCO}_{(r)}$ , $\text{CH}_3\text{Cl}_{(r)}$ , $\text{HClCO}_{(r)}$ , $\text{CO}^+$ , $\text{CO}_2^+$ , $\text{CHO}^+$
$^{241}\text{Am}$ , $^{243}\text{Am}$	$\text{Am}_{(r)}$ , $\text{AmO}_{2(к)}$ , $\text{Am}_2\text{O}_{3(к)}$ , $\text{AmO}_{(к)}$ , $\text{AmH}_{2(к)}$ , $\text{AmH}_{3(к)}$ , $\text{Am}_4\text{H}_{15(к)}$ , $\text{Am}_2\text{C}_{3(к)}$ , $\text{AmCl}_{2(к)}$ , $\text{AmCl}_{3(к)}$ , $\text{AmCl}_{4(к)}$ , $\text{Am}(\text{OH})_{3(к)}$ , $\text{AmOCl}_{(к)}$
$^{239}\text{Pu}$ , $^{240}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Pu}$ , $^{242}\text{Pu}$	$\text{Pu}_{(r)}$ , $\text{PuO}_{(r)}$ , $\text{PuO}_{(к)}$ , $\text{PuO}_{2(r)}$ , $\text{Pu}_2\text{O}_{3(к)}$ , $\text{PuOCl}_{(к)}$ , $\text{Pu}^+$ , $\text{PuO}^+$ , $\text{PuO}_2^+$ , $\text{PuH}_{2(к)}$ , $\text{PuH}_{3(к)}$ , $\text{PuC}_{2(к)}$ , $\text{PuCl}_{3(к)}$ , $\text{PuCl}_{4(к)}$ , $\text{PuO}_{4(к)}$
Воздух	
$^{12}\text{C}$ , $^{14}\text{C}$	$\text{C}_{(к)}$ , $\text{C}_{(r)}$ , $\text{C}_2(r)$ , $\text{CO}_{(r)}$ , $\text{CO}_{2(r)}$ , $\text{C}_2\text{O}_{(r)}$ , $\text{CCl}_{(r)}$ , $\text{ClCO}_{(r)}$ , $\text{Cl}_2\text{CO}_{(r)}$ , $\text{CN}_{(r)}$ , $\text{CN}_{2(r)}$ , $\text{N}_2\text{C}_{(r)}$ , $\text{NCN}_{(r)}$ , $\text{C}_2\text{N}_{(r)}$ , $\text{CNC}_{(r)}$ , $\text{C}_2\text{N}_{2(r)}$ , $\text{NCO}_{(r)}$ , $\text{ClCN}_{(r)}$ , $\text{CO}^+$ , $\text{CO}_2^+$ , $\text{CN}^-$
$^{241}\text{Am}$ , $^{243}\text{Am}$	$\text{Am}_{(r)}$ , $\text{AmO}_{2(к)}$ , $\text{Am}_2\text{O}_{3(к)}$ , $\text{AmO}_{(к)}$ , $\text{Am}_2\text{C}_{3(к)}$ , $\text{AmCl}_{2(к)}$ , $\text{AmCl}_{3(к)}$ , $\text{AmCl}_{4(к)}$ , $\text{AmOCl}_{(к)}$
$^{239}\text{Pu}$ , $^{240}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Pu}$ , $^{242}\text{Pu}$	$\text{Pu}_{(r)}$ , $\text{PuO}_{(r)}$ , $\text{PuO}_{(к)}$ , $\text{PuO}_{2(r)}$ , $\text{Pu}_2\text{O}_{3(к)}$ , $\text{PuOCl}_{(к)}$ , $\text{Pu}^+$ , $\text{PuO}^+$ , $\text{PuO}_2^+$ , $\text{PuC}_{2(к)}$ , $\text{PuCl}_{3(к)}$ , $\text{PuCl}_{4(к)}$ , $\text{PuO}_{4(к)}$

## 1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Исследования выполнены при использовании программного комплекса TERRA, который широко применяется в научной и производственной практике при изучении поведения сложных по химическому составу систем при повышенных температурах [12–15]. Расчеты проводились при постоянном давлении 0.1 МПа, температура системы изменялась от 400 до 3200 К с шагом 100 К. В расчетах учитывались компоненты с концентрацией не менее  $10^{-10}$  моль/кг. Возможные химические соединения радиоактивных компонентов, необходимых для термодинамического моделирования, приведены в табл. 1. Их термодинамические свойства взяты из [16–19]. Исходная система для сжигания радиоактивного графита состоит из конденсированной и газовой фаз. Газовая фаза содержит водяной пар или воздух (состоящий из кислорода и азота). Конденсированная фаза представляет собой радиоактивный графит. Состав исходной системы приведен в табл. 2.

Таблица 2

## Исходный состав системы для сжигания радиоактивного графита в водяном паре или воздухе

Фаза	Фазовый состав	Содержание, % (мас.)
Пар (90.0 %)	$\text{H}_2\text{O}$	100
Воздух (90.0 %)	$\text{O}_2$	23.1
	$\text{N}_2$	76.9
Конденсированная (10.0 %)	$\text{C}$	99.99
	$\text{Cl}$	0.002
	$\text{Pu}$	0.00007
	$\text{Am}$	0.000009

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

## 2.1. Горение радиоактивного графита в водяном паре

Распределение углерода по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в водяном паре представлено на рис. 1. В диапазоне температур  $400 \div 900$  К происходит окисление углерода с образованием диоксида

углерода, метана и монооксида углерода. После сгорания углерода процессы протекают только в газовой фазе. С повышением температуры увеличивается содержание монооксида углерода, это связано с протеканием реакции в газовой фазе. Основным компонентом газовой фазы является монооксид углерода.

Распределение плутония по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в водяном паре представлено на рис. 2. В температурном диапазоне  $T = 400 \div 1800$  К весь плутоний находится в конденсированной фазе, в виде диоксида плутония. В диапазоне  $T = 1800 \div 2000$  К наблюдается испарение диоксида плутония. Дальнейшее повышение температуры ведет к появлению в газовой фазе паробразного и ионизированного оксида плутония.

Распределение америция по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в водяном паре представлено на рис. 3. До температуры 1800 К америций присутствует в конденсированной фазе в виде диоксида америция. При  $T = 1800 \div 2000$  К диоксид америция восстанавливается в водороде до оксида америция (III). В интервале  $T = 2000 \div 2500$  К происходит испарение конденсированного оксида америция (III). В интервале  $T = 2500 \div 3200$  К весь америций присутствует в виде пара.

## 2.2. Горение радиоактивного графита в воздухе

Распределение углерода по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в воздухе представлено на рис. 4. В диапазоне  $T = 400 \div 1000$  К происходит окисление углерода с образованием диоксида и монооксида углерода. При  $T > 1000$  К процессы протекают только в газовой фазе. С повышением температуры увеличивается содержание монооксида углерода, что связано с протеканием реакции в газовой фазе. Основным компонентом газовой фазы является монооксид углерода.

Распределение плутония по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в воздухе представлено на рис. 5. На участке  $T = 400 \div 1300$  К конденсированный хлорид плутония (III) реагирует с диоксидом углерода с образованием конденсированного хлорид-оксида плутония (III). При дальнейшем нагревании системы ( $T = 1300 \div 1900$  К) конденсированные соединения плутония, преимущественно хлорид-оксид плутония, переходят

в пар в виде диоксида плутония. Повышение температуры до 3200 К ведет к появлению паробразного и ионизированного оксида плутония.

Распределение америция по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в воздухе представлено на рис. 6. На участке  $T = 400 \div 2000$  К америций в системе присутствует в виде конденсированного оксида америция (IV). При  $T = 2000 \div 2200$  К конденсированный оксид америция (IV) разлагается, отщепляя кислород и переходя в оксид америция (III). Дальнейшее нагревание системы до 2600 К приводит к термическому испарению конденсированного оксида америция (III). При  $T > 2600$  К весь америций находится в паробразном состоянии.

По балансам распределения элементов по фазам и по составу паровой или газовой фазы (по наиболее значимым компонентам) были определены основные реакции (табл. 3).

На основании расчетов программы TERRA молярное содержание (моль/кг) всех соединений были переведено в молярные доли. По полученным значениям молярных долей были рассчитаны константы равновесия  $K$  для каждой реакции по формуле

$$K = ([C]^c[D]^d)/([A]^a[B]^b), \quad (1)$$

где  $[A]$ ,  $[B]$ ,  $[C]$ ,  $[D]$  — равновесные молярные концентрации веществ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  — стехиометрические коэффициенты.

По полученным значениям констант равновесия и температурным интервалам, в которых возможно протекание предполагаемых реакций ( $\Delta T$ ), были построены зависимости  $\ln K(1/T)$ , которые затем были аппроксимированы прямой линией с применением метода наименьших квадратов. Константы равновесия реакций могут быть вычислены по формуле

$$K = 2.71^{(A+B/T)}, \quad (2)$$

где  $A$ ,  $B$  — коэффициенты для расчета константы равновесия при любой температуре в выбранном диапазоне; значения  $\Delta A$ ,  $\Delta B$  показывают, насколько зависимость от обратной температуры близка к линейной зависимости.

Рассчитанные коэффициенты для расчета константы равновесия также приведены в табл. 3.

На рис. 7–13 представлены зависимости констант равновесия реакций от обратной температуры. Согласно приведенным рисункам

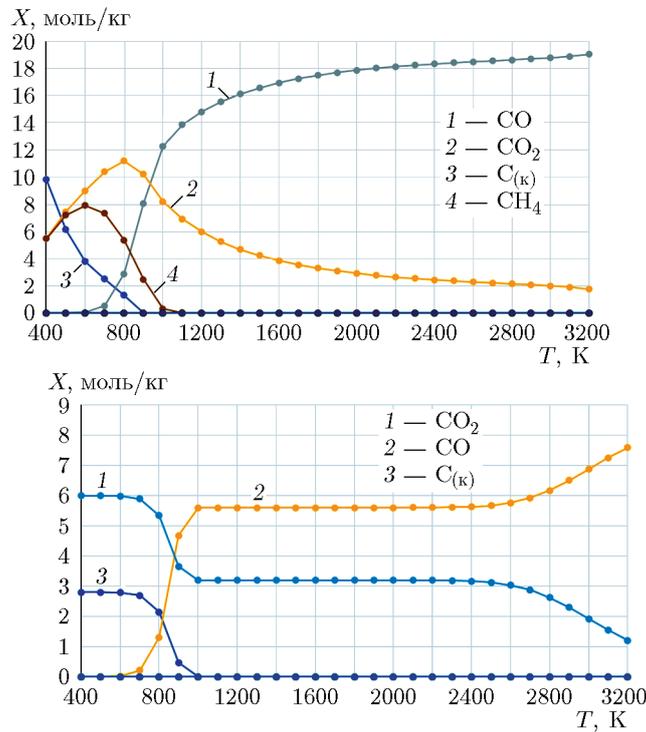


Рис. 1. Распределение углерода по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в водяном паре

Рис. 4. Распределение углерода по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в воздухе

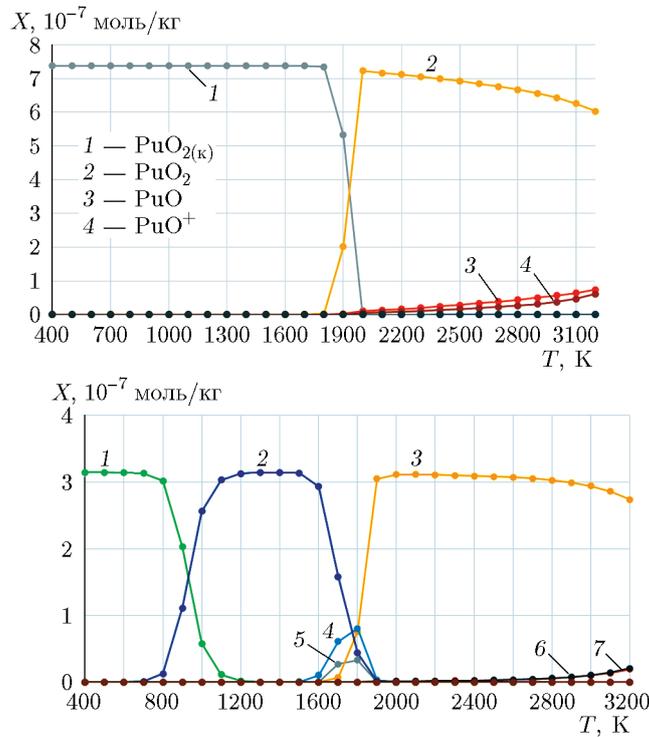


Рис. 2. Распределение плутония по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в водяном паре

Рис. 5. Распределение плутония по равновесным фазам при нагревании радиоактивного графита в воздухе:

1 — PuCl<sub>3(к)</sub>, 2 — PuOCl<sub>(к)</sub>, 3 — PuO<sub>2</sub>, 4 — Pu<sub>2</sub>O<sub>3(к)</sub>, 5 — PuO<sub>2(к)</sub>, 6 — PuO<sup>+</sup>, 7 — PuO

Таблица 3

Основные реакции и константы равновесия при горении радиоактивного графита в водяном паре или воздухе

Номер реакции	Реакция	$\Delta T$ , К	$A$	$B$	$\Delta A$	$\Delta B$
Водяной пар						
1	$C_{(к)} + 2H_2O = CO_2 + 2H_2$	400 ÷ 900	10.75	-10 143.41	0.25	149.06
2	$2C_{(к)} + 2H_2O = CH_4 + CO_2$	400 ÷ 600	0.73	-1 667.73	0.05	24.88
3	$C_{(к)} + H_2O = CO + H_2$	600 ÷ 800	12.58	-13 547.19	0.28	196.63
4	$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2$	600 ÷ 1 000	26.7	-23 967.73	0.19	145.58
5	$CH_4 + 2H_2O = CO_2 + 4H_2$	600 ÷ 800	23.58	-20 477.26	0.28	198.7
6	$CO_2 + CH_4 = 2CO + 2H_2$	800 ÷ 1 000	29.86	-27 506.22	1.15	1 027.49
7	$CO_2 + H_2 = CO + 2H_2O$	1 000 ÷ 2 600	2.31	-4 137.08	0.05	82.81
8	$CO_2 + H_2O = CO + 2OH$	2 600 ÷ 3 200	18.29	-44 620.38	0.39	1 142.82
9	$PuO_{2(к)} = PuO_2$	1 700 ÷ 1 900	40.11	-105 034.01	11.2	20 101.83
10	$PuO_2 = PuO + O$	2 000 ÷ 3 200	15.77	-71 056.84	0.03	79.66
11	$PuO_2 = PuO^+ + O^-$	2 000 ÷ 3 200	13.84	-118 237.28	0.06	165.28
12	$2AmO_{2(к)} + H_2 = Am_2O_{3(к)} + H_2O$	1 800 ÷ 2 000	1 168.07	-2 193 569.16	145.66	275 990.8893
13	$Am_2O_{3(к)} + 3H_2 = 2Am + 3H_2O$	2 000 ÷ 2 500	15.08	-136 694.79	5.88	13 130.71
Воздух						
14	$C_{(к)} + O_2 = CO_2$	400 ÷ 1 000	47.52	2 121.49	2.63	1 602.48
15	$2C_{(к)} + O_2 = 2CO$	600 ÷ 900	71.93	-19 994.38	0.55	405.19
16	$2CO + O_2 = 2CO_2$	900 ÷ 2 000	-19.7	66 236.72	0.42	555.69
17	$C_{(к)} + CO_2 = 2CO$	600 ÷ 1 000	21.37	-20 784.64	0.03	22.1
18	$CO_2 = CO + O$	2 300 ÷ 3 600	17.95	-63 808.35	0.008	22.87
19	$PuCl_{3(к)} + CO_2 = PuOCl_{(к)} + CO + 2Cl$	700 ÷ 1 300	33.16	-67 437	0.008	8.23
20	$2PuOCl_{(к)} + CO_2 = Pu_2O_{3(к)} + 2Cl + CO$	1 500 ÷ 1 800	26.66	-82 349	0.05	82.01
21	$PuOCl_{(к)} + CO_2 = PuO_2 + CO + Cl$	1 600 ÷ 1 900	32.66	-105 770	0.09	170.09
22	$Pu_2O_{3(к)} + CO_2 = 2PuO_2 + CO$	1 800 ÷ 2 000	38.21	-128 325	0.09	186.37
23	$PuO_{2(к)} = PuO_2$	1 900 ÷ 2 100	28.98	17 349.9	2.02	4 048.63
24	$PuO_2 = PuO^+ + O^-$	2 000 ÷ 3 200	14.97	-121 973.89	0.002	6.04
25	$PuO_2 = PuO + O$	2 000 ÷ 3 200	16.1369	-72 247	0.007	17.7
26	$4AmO_{2(к)} = 2Am_2O_{3(к)} + O_2$	2 000 ÷ 2 200	2 609.32	-552 396.98	1 606.5	3 365 997
27	$Am_2O_{3(к)} = 2Am + 3O$	2 200 ÷ 2 600	65.307	-330 139	6.40228	15 285.3

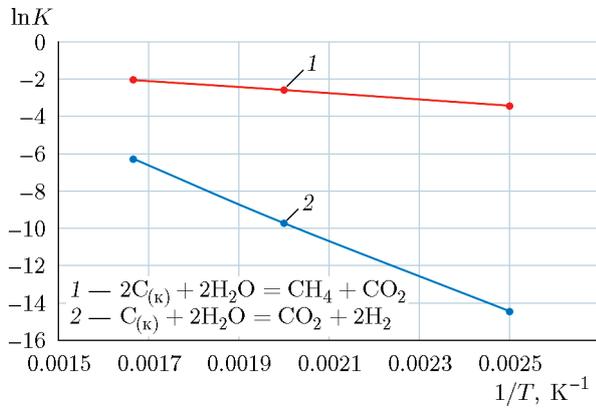


Рис. 7. Зависимость константы равновесия реакций от  $1/T$  при нагревании радиоактивного графита в водяном паре при  $T = 400 \div 600$  К

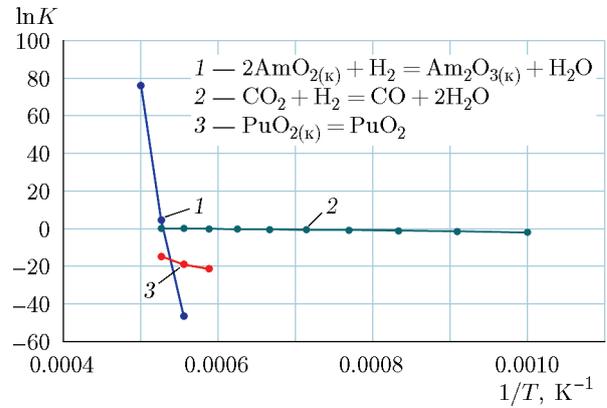


Рис. 9. Зависимость константы равновесия реакций от  $1/T$  при нагревании радиоактивного графита в водяном паре при  $T = 1000 \div 2000$  К

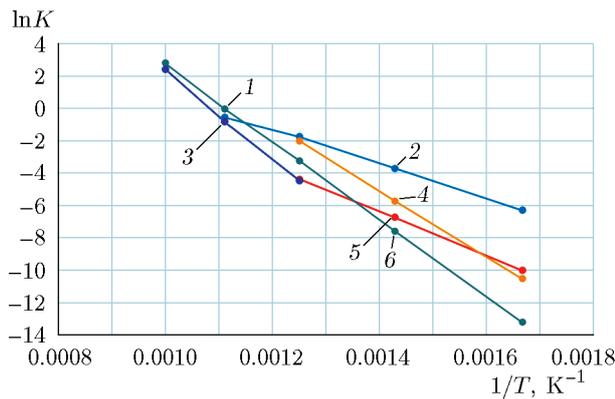


Рис. 8. Зависимость константы равновесия реакций от  $1/T$  при нагревании радиоактивного графита в водяном паре при  $T = 600 \div 1000$  К:

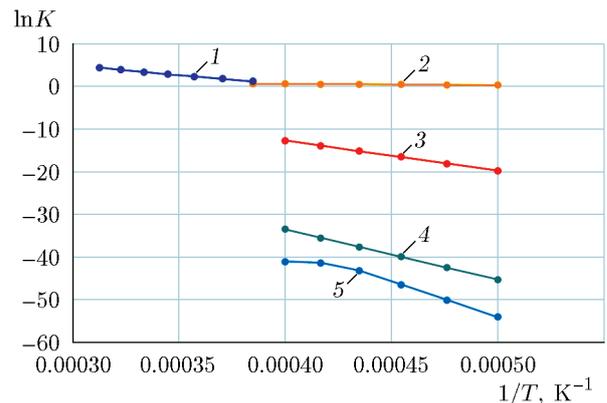
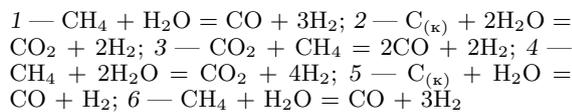
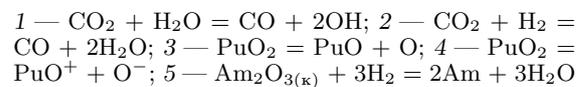


Рис. 10. Зависимость константы равновесия реакций от  $1/T$  при нагревании радиоактивного графита в водяном паре при  $T = 2000 \div 3200$  К:



повышение температуры системы радиоактивный графит — водяной пар ведет к изменению направления протекания реакций в сторону образования продуктов во всех реакциях. Повышение температуры системы радиоактивный графит — воздух ведет к изменению направления протекания реакций в сторону образования продуктов во всех реакциях, кроме 14, 16, 23.

В водяном паре протекало восемь реакций с участием углерода, три — с участием плутония, две — с участием америция. В воздухе проходило пять реакций с участием углерода, семь — с участием плутония, две — с участии-

ем америция. В различных средах для углерода и америция совпадающих реакций нет, для плутония совпадают реакции 9 и 23, 10 и 25, 11 и 24. Для плутония константы равновесия одинаковых реакций в водяном паре и воздухе различаются.

### ВЫВОДЫ

В работе проведен термодинамический расчет состава продуктов горения радиоактивного графита в водяном паре и воздухе. Приведены существующие формы радионуклидов,

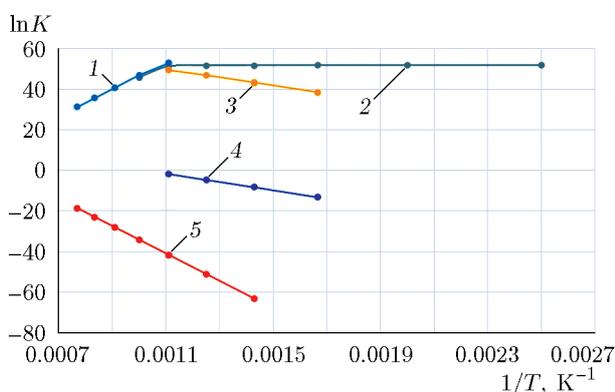


Рис. 11. Зависимость константы равновесия реакций от  $1/T$  при нагревании радиоактивного графита в воздухе при  $T = 400 \div 1300$  К:

1 —  $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ ; 2 —  $\text{C}_{(\text{к})} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ ;  
3 —  $2\text{C}_{(\text{к})} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$ ; 4 —  $\text{C}_{(\text{к})} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$ ;  
5 —  $\text{PuCl}_{3(\text{к})} + \text{CO}_2 = \text{PuOCl}_{(\text{к})} + \text{CO} + 2\text{Cl}$

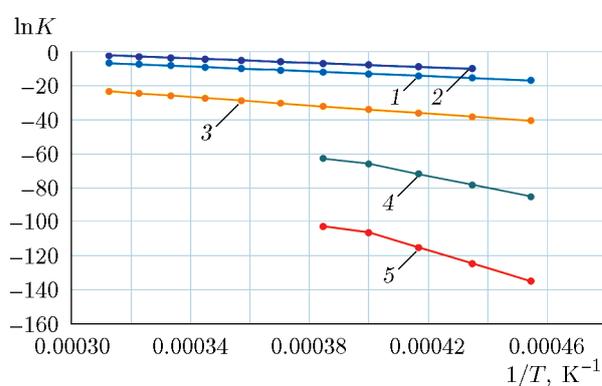


Рис. 13. Зависимость константы равновесия реакций от  $1/T$  при нагревании радиоактивного графита в воздухе при  $T = 2200 \div 3200$  К:

1 —  $\text{CO}_2 = \text{CO} + \text{O}$ ; 2 —  $\text{PuO}_2 = \text{PuO} + \text{O}$ ; 3 —  
 $\text{PuO}_2 = \text{PuO}^+ + \text{O}^-$ ; 4 —  $\text{Am}_2\text{O}_{3(\text{к})} = 2\text{Am} + 3\text{O}$ ;  
5 —  $2\text{Am}_2\text{O}_{3(\text{к})} = 4\text{Am} + 3\text{O}_2$

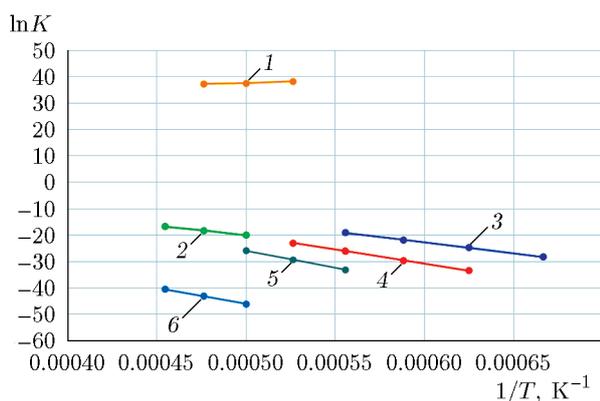


Рис. 12. Зависимость константы равновесия реакций от  $1/T$  при нагревании радиоактивного графита в воздухе при  $T = 1300 \div 2200$  К:

1 —  $\text{PuO}_{2(\text{к})} = \text{PuO}_2$ ; 2 —  $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ ;  
3 —  $\text{PuO}_2 = \text{PuO} + \text{O}$ ; 4 —  $2\text{PuOCl}_{(\text{к})} + \text{CO}_2 =$   
 $\text{Pu}_2\text{O}_{3(\text{к})} + 2\text{Cl} + \text{CO}$ ; 5 —  $\text{PuOCl}_{(\text{к})} + \text{CO}_2 =$   
 $\text{PuO}_2 + \text{CO} + \text{Cl}$ ; 6 —  $\text{Pu}_2\text{O}_{3(\text{к})} + \text{CO}_2 = 2\text{PuO}_2 +$   
 $\text{CO}$ ; 7 —  $\text{PuO}_2 = \text{PuO}^+ + \text{O}$

необходимых для термодинамического моделирования. Построены графические зависимости распределения углерода, плутония и америция по фазам во всем рассматриваемом диапазоне температур. Определены основные реакции, интервалы температур и константы равновесия для рассматриваемых актинидов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Nuclear Power Reactors in the World.** — <https://www-pub.iaea.org/>.
2. **Росатом:** Производство электроэнергии. — <http://www.rosatom.ru>.
3. **Титов С. А., Барбин Н. М., Кобелев А. М.** Анализ аварийных ситуаций, связанных с пожарами на атомных электростанциях // Пожаровзрывобезопасность. — 2021. — Т. 30, № 5. — С. 66–75.
4. **Barbin N. M., Titov S. A., Kobelev A. M.** Accidents that occurred at nuclear power plants in 1952–1972 // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. — 2021. — V. 666, N 2. — 022018. — DOI: 10.1088/1755-1315/666/2/022018.
5. **Dorofeev A. N., Komarov E. A., Zakharova E. V., Volkova A. G., Linge I. I., Utkin S. S., Ivanov A. Yu., Pavliuk A. O., Kotlyarevskij S. G.** On reactor graphite disposal // Radioactive Waste. — 2019. — N 2 (7). — P. 14–23. — DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-18-30.
6. **Линге И. И., Абрамова А. А.** Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации ядерных установок и реабилитации загрязненных территорий. — М.: Госкорпорация «Росатом», 2017.
7. **Бекман И. Н.** Плутоний. — М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2010.
8. **Бекман И. Н.** Радиохимия. Том II. Радиоактивные элементы: учеб. пособие. — М.: Издатель Мархотин П. Ю., 2014.
9. **Баженов В. А., Булдаков Л. А., Василенко И. Я.** Вредные химические вещества. — Л.: Химия, 1990.

10. **Скачек М. А.** Радиоактивные компоненты АЭС: обращение, переработка, локализация: учеб. пособие для вузов. — М.: Изд. дом МЭИ, 2014.
11. **Цыганов А. А., Хвостов В. И., Комаров Е. А., Котляревский С. Г., Павлюк А. О., Шаманин И. В., Нестеров В. Н.** Проблемы утилизации реакторного графита остановленных промышленных уран-графитовых реакторов // Изв. Томск. политехн. ун-та. — 2007. — Т. 310, вып. 2. — С. 94–98.
12. **Ватолин Н. А., Моисеев Г. К., Трусов Б. Г.** Термодинамическое моделирование в высокотемпературных системах. — М.: Металлургия, 1994.
13. **Барбин Н. М., Кобелев А. М., Терентьев Д. И., Алексеев С. Г.** Термодинамическое моделирование термических процессов с участием актинидов (U, Am, Pu) при нагреве радиоактивного графита в парах воды // Радиохимия. — 2017. — Т. 59, № 5. — С. 445–448.
14. **Белов Г. В.** Термодинамическое моделирование: методы, алгоритмы, программы. — М.: Науч. мир, 2002.
15. **Белов Г. В., Трусов Б. Г.** Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013.
16. **Термодинамические свойства индивидуальных веществ.** База данных Ивтантермо. — <http://www.chem.msu.su/rus/handbook/ivtan>.
17. **Belov G. V., Dyachkov S. A., Levashov P. R., Lomonosov I. V., Minakov D. V., Morozov I. V., Sineva M. A., Smirnov V. N.** The IVTANTHERMO-Online database for thermodynamic properties of individual substances // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018. — V. 946 — 012120. — DOI: 10.1088/1742-6596/946/1/012120.
18. **Электронный справочник «Термодинамические свойства индивидуальных веществ».** — <http://twf.mpei.ac.ru/TTHB/2/OIVT/IVTANTHERMO/Rus/index.htm#open1>.
19. **Dorofeeva O., Novikov V. P., Neumann D. B.** NIST-JANAF thermochemical tables. I. Ten organic molecules related to atmospheric chemistry // J. Phys. Chem. Ref. Data. — 2001. — V. 30, N 2. — P. 475–513. — DOI: 10.1063/1.1364518.

*Поступила в редакцию 24.01.2022.*

*После доработки 08.02.2022.*

*Принята к публикации 28.02.2022.*

---