

УДК 536.33;539.122.04

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОКСИДОВ ИТТРИЯ, ЦЕРИЯ И ПРАЗЕОДИМА ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 300–1000 К С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2022 г. М. Ranga Rao<sup>1</sup> \*, N. Gopi Krishna<sup>2</sup>, S. Chandra Lingam<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Physics, Kavitha Memorial Degree & P.G. College, Khammam-507002, India

<sup>2</sup>Dept. of Physics Kakatiya University, Warangal-506009, Telangana, India

<sup>3</sup>Dept. of Physics, JNTUH Hyderabad-500085, Telangana, India

\*E-mail: mrraophysics@gmail.com

Поступила в редакцию 22.05.2020 г.

После доработки 11.08.2020 г.

Принята к публикации 19.05.2021 г.

Данная работа посвящена определению коэффициента теплового расширения оксидов иттрия, церия и празеодима при температурах от 300 до 1000 К. Значения теплового расширения определялись по линейному коэффициенту ослабления  $\gamma$ -излучения и плотности в диапазоне 300–1000 К. Измерения ослабления  $\gamma$ -излучения проводились на авторской экспериментальной установке с использованием источника радиоактивного  $\gamma$ -излучения <sup>137</sup>Cs (0.662 МэВ). После обработки результатов получены полиномы второй степени для коэффициента линейного ослабления  $\gamma$ -излучения  $\mu$ , плотности  $\rho$  и коэффициента теплового линейного расширения  $\alpha$  оксидов иттрия Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, церия CeO<sub>2</sub> и празеодима Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> в зависимости от температуры. Полученные данные сопоставлены с результатами, полученными методами рентгеновской дифрактометрии и интерферометрии.

DOI: 10.31857/S0040364422060151

### ВВЕДЕНИЕ

Тепловое расширение является одним из важнейших параметров огнеупорных материалов. Характеристики теплового расширения играют ключевую роль в определении срока службы и эксплуатации высокотемпературных материалов. Тепловое расширение также влияет на термостойкость, растрескивание и выкрашивание материала. Эти факторы хорошо иллюстрируют необходимость тщательного изучения характеристик теплового расширения огнеупора для правильного и эффективного использования. Оксиды редкоземельных элементов обладают высокими температурами плавления и стабильны при повышенных температурах в окислительных условиях. Поэтому оксиды редкоземельных элементов являются перспективными высокотемпературными тугоплавкими материалами. Наноцерий известен своей антибактериальной и антиоксидантной активностью [1]. Оксид церия используется в инфракрасных фильтрах и каталитических преобразователях. Оксиды иттрия, церия и празеодима имеют кубическую структуру. Большинство оксидов редкоземельных элементов являются хорошими добавками при получении оптических стекол и других функциональных материалов [2, 3]. Помимо применения при высоких температурах, оксиды редкоземельных элементов являются перспективными для использования в радиационной дозиметрии, а также

находят применение в качестве материалов для защиты от  $\gamma$ -излучения. Экспериментальные значения коэффициентов ослабления  $\gamma$ -излучения оксидами редкоземельных элементов полезны при разработке материалов, экранирующих  $\gamma$ -излучение. Основные теплофизические свойства, такие как плотность и тепловое расширение, могут быть рассчитаны по коэффициентам ослабления  $\gamma$ -излучения, измеренным при различных температурах. Так, основная цель данной работы состоит в измерении коэффициентов ослабления  $\gamma$ -излучения и расчете по ним плотности и коэффициента теплового расширения.

Существуют различные методы измерения теплового расширения, такие как электростатическая левитация, метод сидячей капли, пикнометрия, электромагнитная левитация, рентгеновская дифракция, интерферометрия и метод ослабления  $\gamma$ -излучения. Для изучения теплофизических свойств при высоких температурах метод ослабления  $\gamma$ -излучения имеет преимущество по сравнению с другими методами, так как отсутствует тепловой контакт  $\gamma$ -излучения с образцом, что минимизирует тепловые потери и облегчает совместимость образца и зонда. В случае измерения в жидкой фазе устраняются проблемы других методов, к которым относятся испарение образца, поверхностное натяжение, эффекты вязкости. В [4–9] с помощью  $\gamma$ -плотномера исследованы теплофизи-

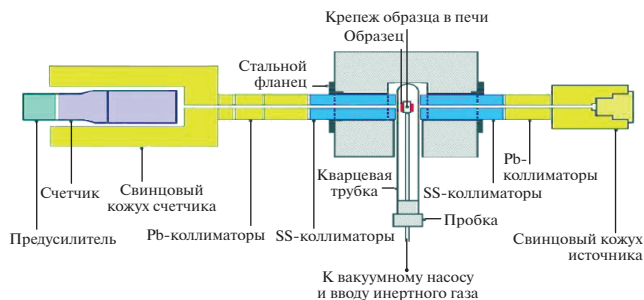


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

ческие свойства большого количества материалов. В [10] сообщены результаты для теплового расширения оксида самария по измерениям ослабления  $\gamma$ -излучения в диапазоне от 300 до 1000 К. Несколько других исследователей использовали метод ослабления  $\gamma$ -излучения для изучения термических свойств различных металлов, сплавов и соединений. Авторы [11] сообщили о теплофизических свойствах расплавленных алюминия, кадмия, олова и висмута. В [12] сообщается о результатах исследования никеля высокой чистоты в диапазоне температур 150–2030 К. В работах [13, 14] исследовались плотности лития и висмута в зависимости от температуры в конденсированном состоянии. Сообщается о теплофизических свойствах некоторых систем сплавов в твердой и жидкой фазах [15–17]. В [18, 19] сообщается о температурной зависимости плотности диспрозия и оксида алюминия в твердой и жидкой фазах. Авторы [20] изучили оксиды редкоземельных элементов и привели значения теплового расширения, полученные по данным дифракции рентгеновских лучей. Термическое расширение оксидов иттрия, церия, самария, европия и диспрозия исследовалось методом интерферометрии в [21].

Целью данной работы является представление результатов систематических исследований коэффициента теплового расширения  $\alpha$  и плотности  $\rho$   $Y_2O_3$ ,  $CeO_2$  и  $Pr_6O_{11}$ , определенных по измерениям линейного ослабления  $\gamma$ -излучения  $\mu_l$  в диапазоне 300–1000 К. Данный интервал исследовался в [20] с помощью рентгеновского метода и в [21] с помощью интерферометрического метода с шагом 100 К или больше, чем для измерения коэффициента теплового расширения в зависимости от температуры. В данных работах не приводятся значения плотности. В настоящей работе шаг по температуре составляет 50 К.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Измерения ослабления  $\gamma$ -излучения на оксидах иттрия, церия и празеодима выполнены с использованием плотномера, собранного в авторской лаборатории. Схема экспериментальной установки, используемой для проведения измерений, показана на рис. 1. Плотномер присоединен к печи,

которая нагревается до 1300 К и программируется для контроля температуры. Для измерений в диапазоне 300–1000 К использовалась термопара типа К. Для регистрации  $\gamma$ -излучения применялись детектор, активированный таллием NaI, и фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Кристалл диаметром 0.0762 м и толщиной 0.0762 м интегрально соединен с ФЭУ диаметром 0.0762 м. ФЭУ имеет 14-контактный цоколь и может быть установлен на двух типах предусилителей. В данном исследовании использовался коаксиальный линейный предусилитель. Разрешение детектора по  $^{137}Cs$  составило 8.5%.

Сигнал с предусилителя подается на многоканальный анализатор (МКА) для анализа необходимого спектра.

Образцы оксидов иттрия, церия и празеодима готовились из тонкодисперсных порошков и формировались в таблетки на штамповом наборе с помощью гидравлического пресса. Образцы прочно закреплялись на держателе и вставлялись в вакуумированную кварцевую трубку. Для точного измерения температуры к образцу подсоединялась термопара. Сборка закладывалась в печь. Вся работа контролировалась с помощью электрического цифрового счетчика.

Печь управляется микропроцессором и запрограммирована на повышение температуры на 50 К на каждом этапе, начиная с 300 К, и ее стабилизацию в течение определенного периода времени для проведения измерений. На каждом шаге по температуре считывались и регистрировались средние значения девяти измерений  $\gamma$ -излучения до и после помещения образца в печь. Применялись различные скорости охлаждения. Они составляли 10 К/мин для интервала 1000–800 К, 6 К/мин для 800–500 К, 4 К/мин для 500–400 К и 2 К/мин до 300 К (рис. 2). Процедура повторялась до тех пор, пока образцы не проходили весь диапазон температур 1000–300 К. Счетчики  $\gamma$ -излучения регистрировали значения при нагревании и при охлаждении образца. Разница в показаниях была незначительной, поэтому окончательные показания регистрировались при охлаждении образца. Про-

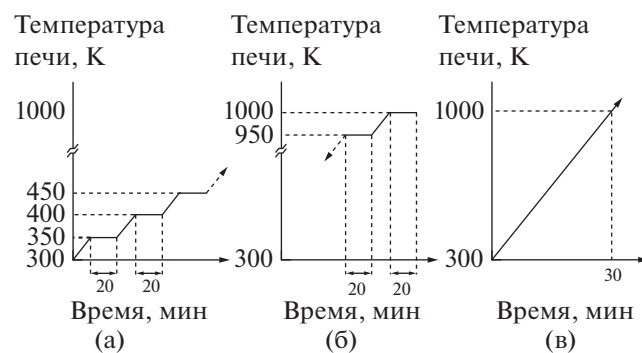


Рис. 2. Профили нагрева (а), охлаждения (б) образца и нагрева пустой печи (в).

токол измерений температур во время нагрева и охлаждения подробно обсуждался в [7].

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основное уравнение, используемое в методе ослабления  $\gamma$ -излучения, имеет вид

$$I(T) = I_0(T) \exp[-\mu_m \rho(T) l(T)], \quad (1)$$

где  $I_0$ ,  $I$  – интенсивности  $\gamma$ -излучения с материалом образца и без него;  $\mu_m$  – массовый коэффициент ослабления;  $\rho$ ,  $l$  – плотность и толщина гранулы в направлении луча.

Из уравнения (1) видно, что любое изменение температуры вызывает изменение плотности материала и интенсивности излучения. Метод [22] используется для определения коэффициента теплового расширения и плотности материалов.

Зависимость плотности от температуры рассчитывается при различных температурах по уравнению

$$\rho(T) = \left[ \frac{1}{\mu_m l} \right] \ln \left[ \frac{I_0(T)}{I(T)} \right]. \quad (2)$$

Средние объемный и линейный коэффициенты теплового расширения рассчитываются в температурном интервале  $\Delta = T_2 - T_1$  с помощью следующих выражений:

$$\alpha_p = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1 \Delta T}, \quad (3)$$

$$\alpha_l = \frac{(l_2 - l_1)}{l_1 \Delta T}, \quad (4)$$

где  $\rho_1 = \rho_1(T_1)$ ,  $\rho_2 = \rho_2(T_2)$ ,  $l_1 = l(T_1)$ ,  $l_2 = l(T_2)$ .

Из уравнений (3), (4) получаем

$$\begin{aligned} \Delta T^2 \alpha_l \alpha_p &= \frac{1}{\rho_1 l_1} (\rho_2 - \rho_1) (l_2 - l_1) = \\ &= \left[ \frac{\rho_2 l_2}{\rho_1 l_1} - 1 \right] - \left[ \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \right] - \left[ \frac{l_2 - l_1}{l_1} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Принимая

$$\left( \frac{\rho_2 l_2}{\rho_1 l_1} \right) - 1 = Z, \quad (6)$$

из (3)–(6) имеем

$$\Delta T^2 \alpha_l \alpha_p = Z - (\Delta T) \alpha_l - (\Delta T) \alpha_p. \quad (7)$$

Величина  $Z$  рассчитывается по интенсивностям, измеренным при различных температурах, с использованием уравнения

$$Z = \left( \frac{\rho_2 l_2}{\rho_1 l_1} \right) - 1 = \left\{ \frac{\ln \left[ \frac{I_0(T_2)}{I(T_2)} \right]}{\ln \left[ \frac{I_0(T_1)}{I(T_1)} \right]} \right\} - 1. \quad (8)$$

Выражение, связывающее коэффициент объемного и линейного теплового расширения для

материалов, обладающих свойством изотропии, имеет вид

$$\alpha_p = -3\alpha_l(1 - 2\alpha_l \Delta T). \quad (9)$$

Из (7), (9) с учетом  $X = \frac{\Delta l}{l} = \alpha_l \Delta T$  запишем

$$-3\Delta T^2 \alpha_l^2 (1 - 2\alpha_l \Delta T) = Z - \Delta T \alpha_l (1 - 2\alpha_l \Delta T).$$

И тогда из предыдущих уравнений получаем

$$6X^3 + 3X^2 - 2X - Z = 0. \quad (10)$$

Подставляя выражение для  $Z$  в уравнение (10), получаем  $X$  и, следовательно,  $\alpha$ .

Коэффициент линейного затухания, зависящий от температуры, рассчитывается по уравнению

$$\mu_l(T) = \mu_m \rho(T). \quad (11)$$

Интенсивности  $\gamma$ -излучения без образца  $I_0$  и с образцом  $I$  регистрируются при каждой температуре. При температуре  $T_1$  измеряется толщина образца  $l_1$  и определяется  $\mu_l$ . Экспериментальные данные обрабатываются методом наименьших квадратов для получения квадратичного полинома вида

$$\rho(T) = a + bT + cT^2.$$

Экспериментальная погрешность оценена в  $\sim 2\%$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, полученные для  $\mu_l$ ,  $\rho$  и  $\alpha$  для  $Y_2O_3$ ,  $CeO_2$  и  $Pr_6O_{11}$  в зависимости от температуры, приведены в табл. 1–4. Значения коэффициента теплового линейного расширения, полученные методами рентгеноструктурного анализа и интерферометрии в [20, 21], также включены в табл. 2–4 для сравнения. Данные о коэффициенте теплового расширения  $Pr_6O_{11}$ , полученные методом интерферометрии, недоступны. Представленные значения показывают довольно хорошее соответствие результатам [20, 21]. Однако значения по методу интерферометрии немного ниже, чем значения, полученные по ослаблению рентгеновского и  $\gamma$ -излучения. На рис. 3–8 представлены графики зависимостей коэффициентов затухания, плотности и коэффициента теплового линейного расширения от температуры для  $Y_2O_3$ ,  $CeO_2$  и  $Pr_6O_{11}$ .

**Оксид иттрия  $Y_2O_3$ .** Линейный коэффициент затухания  $Y_2O_3$  уменьшается от 36.75 1/м при 350 К до 36.34 при 1000 К. Зависимость линейного коэффициента затухания от температуры описывается нелинейным полиномом второй степени

$$\mu_l(T) = 36.92 - 0.4155 \times 10^{-3} T - 1.6231 \times 10^{-7} T^2.$$

Угол наклона зависимости составляет 0.0004155 1/(м К).

Плотность  $Y_2O_3$  уменьшается от 4985 кг/м<sup>3</sup> при 350 К до 4929 при 1000 К, т.е. примерно на 1.12%. Температурная зависимость  $\rho$  является отрицательной нелинейной функцией:

$$\rho(T) = 5006 - 0.5164 \times 10^{-1} T - 2.5275 \times 10^{-5} T^2.$$

Температурный коэффициент для плотности составляет  $-0.05164$  кг/(м<sup>3</sup> К).

**Таблица 1.** Данные по коэффициенту линейного ослабления  $\gamma$ -излучения  $\mu_l$  и плотности  $\rho$  оксидов иттрия, церия и празеодима при 350–1000 К

T, К	$\mu_l$ , 1/м			$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>		
	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CeO <sub>2</sub>	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CeO <sub>2</sub>	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>
350	36.75	57.23	52.51	4985	7166	6449
400	36.72	57.16	52.46	4981	7158	6443
450	36.69	57.1	52.40	4977	7151	6435
500	36.66	57.04	52.33	4974	7143	6427
550	36.64	56.97	52.26	4970	7134	6419
600	36.61	56.91	52.18	4966	7126	6409
650	36.58	56.84	52.10	4962	7117	6399
700	36.55	56.77	52.01	4957	7108	6388
750	36.51	56.7	51.91	4953	7100	6375
800	36.48	56.63	51.80	4948	7092	6362
850	36.44	56.56	51.67	4944	7083	6347
900	36.41	56.48	51.55	4939	7073	6331
950	36.37	56.41	51.38	4934	7063	6311
1000	36.34	56.34	51.23	4929	7055	6292

**Таблица 2.** Данные по  $\alpha$  оксида иттрия при 350–1000 К

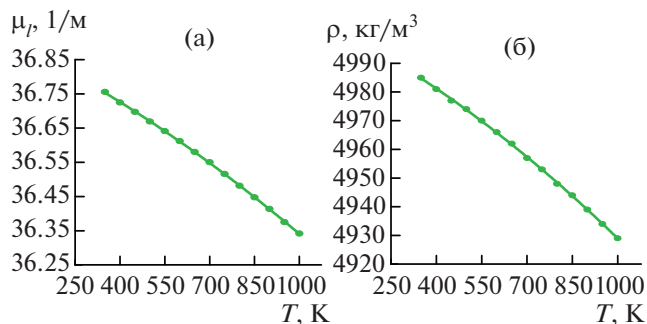
Данная работа		[20], рентгеноструктурный анализ		[21], интерферометрия	
T, К	$\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	T, К	$\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	T, К	$\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>
350	6.92	301	6.7	373	6.52
400	7.1	353	7		
450	7.15	379	6.8	475	6.87
500	7.2	499	7.2		
550	7.25			575	7.14
600	7.31	609	7.3		
650	7.42			679	7.34
700	7.48	712	7.5		
750	7.61			774	7.49
800	7.72	814	7.8		
850	7.82			876	7.63
900	7.91				
950	8.05	930	8	973	7.77
1000	8.11				

**Таблица 3.** Данные по  $\alpha$  оксида церия при 350–1000 К

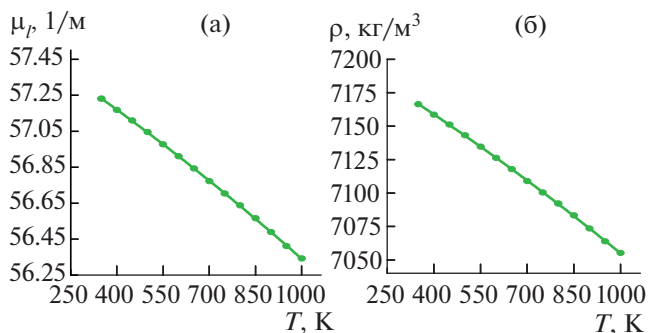
Данная работа		[20], рентгеноструктурный анализ		[21], интерферометрия	
T, К	$\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	T, К	$\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	T, К	$\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>
350	10.68	299	10.7	370	9.97
400	10.7	391	10.6		
450	10.66	413	10.5	472	10.4
500	10.73	493	10.9		
550	10.85	541	11	573	10.64
600	10.93	619	11.2		
650	11			672	10.91
700	11.12	688	11.1		
750	11.19	776	11.3	771	11.13
800	11.22				
850	11.31	843	11.3	874	11.36
900	11.45	889	11.5		
950	11.58			973	11.56
1000	11.62	993	11.7	1076	11.76

**Таблица 4.** Данные по  $\alpha$  оксида празеодима при 350–1000 К

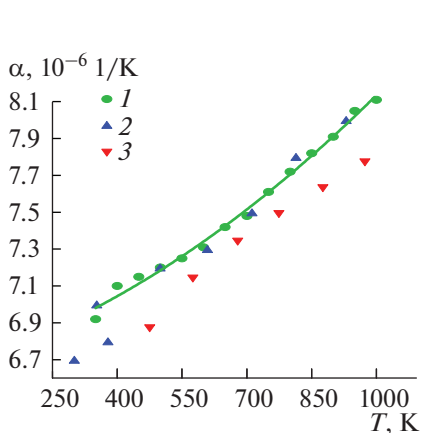
Данная работа		[20], рентгеноструктурный анализ	
$T, K$	$\alpha, 10^{-6} K^{-1}$	$T, K$	$\alpha, 10^{-6} K^{-1}$
350	11.1	298	10.8
400	11	374	11.3
450	11.06	479	11
500	11.21	481	11.6
550	11.36		
600	11.68		
650	12.05		
700	12.38	699	12.3
750	12.92		
800	13.41	793	13
850	14.1		
900	14.66	898	15
950	15.61		
1000	16.38	999	16.6



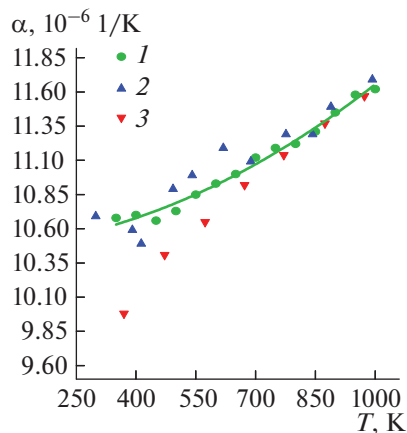
**Рис. 3.** Зависимости  $\mu_l$  (а) и  $\rho$  (б) от температуры для  $Y_2O_3$ .



**Рис. 5.** Зависимость  $\mu_l$  (а) и  $\rho$  (б) от температуры для  $CeO_2$ .



**Рис. 4.** Зависимость  $\alpha$  от температуры для  $Y_2O_3$ : 1 – данная работа, 2 – [20], 3 – [21].



**Рис. 6.** Зависимость  $\alpha$  от температуры для  $CeO_2$ : 1 – данная работа, 2 – [20], 3 – [21].

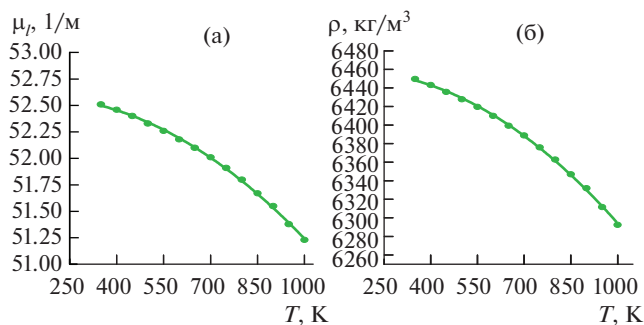


Рис. 7. Зависимость  $\mu_l$  (а) и  $\rho$  (б) от температуры для  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ .

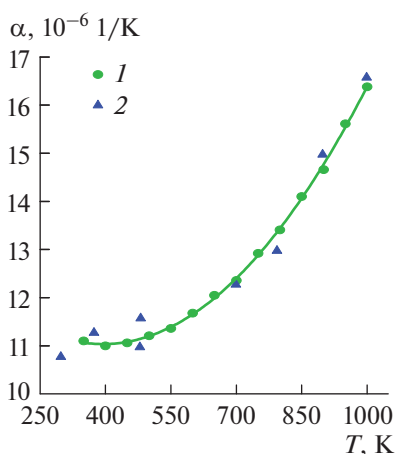


Рис. 8. Зависимость  $\alpha$  от температуры для  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ : 1 – данная работа, 2 – [20].

Коэффициент теплового линейного расширения увеличивается с температурой, а результаты для  $\alpha$  можно представить следующим выражением:

$$\alpha(T) = 6.65 + 6.525 \times 10^{-4}T + 8.3242 \times 10^{-7}T^2.$$

**Оксид церия  $\text{CeO}_2$ .** Линейный коэффициент затухания  $\text{CeO}_2$  снижается с 57.23 1/м при 350 К до 56.34 при 1000 К. Уменьшение линейного коэффициента затухания описывается уравнением второй степени

$$\mu_l(T) = 57.63 - 10.72 \times 10^{-4}T - 2.215 \times 10^{-7}T^2.$$

Температурный коэффициент  $\mu_l$  составляет  $-0.001072$  1/(м К).

Плотность оксида церия уменьшается с увеличением температуры с 7166 при 350 К до 7055 кг/м<sup>3</sup> при 1000 К, примерно на 1.54%. Температурная зависимость так же, как у  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , является отрицательной нелинейной функцией:

$$\rho(T) = 7217 - 1.342 \times 10^{-1}T + 2.7743 \times 10^{-5}T^2.$$

Температурный коэффициент  $\rho$  составляет  $-0.1342$  кг/(м<sup>3</sup> К).

Коэффициент теплового линейного расширения растет с температурой, и его зависимость также можно записать в виде

$$\alpha(T) = 10.45 + 0.1466 \times 10^{-3}T + 1.0577 \times 10^{-6}T^2.$$

**Оксид празеодима  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ .** Линейный коэффициент затухания  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  снижается от 52.51 1/м при 350 К до 51.23 при 1000 К. Уменьшение линейного коэффициента затухания описывается нелинейной зависимостью

$$\mu_l(T) = 52.56 + 0.4437 \times 10^{-3}T - 1.761 \times 10^{-6}T^2.$$

Температурный коэффициент  $\mu_l$  равен  $-0.0004437$  1/(м К).

Плотность  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  также уменьшается при нагреве: от 6449 кг/м<sup>3</sup> при 350 К до 6292 при 1000 К, примерно на 2.43%. Температурная зависимость является отрицательной и имеет вид

$$\rho(T) = 6454 + 0.5937 \times 10^{-1}T - 2.194 \times 10^{-4}T^2.$$

Температурный коэффициент плотности равен  $-0.05937$  кг/(м<sup>3</sup> К). Изменение плотности при 350–1000 К составляет 1.12% для оксида иттрия и 2.43% для оксида празеодима. Уменьшение плотности с повышением температуры почти в два раза больше для оксида празеодима по сравнению с оксидом иттрия.

Коэффициент теплового линейного расширения увеличивается с температурой, и результаты измерения коэффициента теплового расширения в диапазоне температур от 350 до 1000 К проанализированы и представлены полиномом второй степени:

$$\alpha(T) = 13.29 - 11.47 \times 10^{-3}T + 1.4560 \times 10^{-5}T^2.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Образцы оксидов иттрия, церия и празеодима подвергались воздействию  $\gamma$ -излучения с использованием источника  $\gamma$ -излучения <sup>137</sup>Cs, и измерялось ослабление проходящего излучения. Приведены данные о линейном коэффициенте затухания, плотности и коэффициенте теплового линейного расширения  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$  и  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  в зависимости от температуры, и получены нелинейные полиномиальные уравнения для них. Для оксида иттрия уменьшение плотности с повышением температуры от 350 до 1000 К составляет 1.12%, тогда как для оксидов церия и празеодима – 1.54 и 2.43% соответственно. Снижение плотности с повышением температуры примерно в два раза больше для оксида празеодима по сравнению с оксидом иттрия, что свидетельствует о лучшей термической стабильности оксида иттрия по сравнению с оксидами празеодима и церия. Полученные значения коэффициента теплового расширения довольно хорошо согласуются со значениями, полученными с помощью рентгеноструктурного анализа и интерферометрии. Однако значения по интерферометрии немного ниже, чем значения, полученные

при измерении ослабления рентгеновского и  $\gamma$ -излучения. Температурные зависимости плотности, коэффициента теплового расширения и линейного коэффициента ослабления  $\gamma$ -излучения для  $Y_2O_3$ ,  $CeO_2$  и  $Pt_6O_{11}$ , полученные с использованием метода ослабления  $\gamma$ -излучения, публикуются впервые.

Авторы выражают благодарность за помощь проф. К. Goralkishan Rao и проф. С. Radhakrishnamurthy из Инструментального центра университета им. Какатия (Варангал, Индия).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rajeshkumar S., Poonam N.* Synthesis and Biomedical Applications of Cerium Oxide Nanoparticles – A Review // *Biotechno. Rep.* 2018. V. 17. P. 1.
2. *Eagleson M.* Concise Encyclopedia of Chemistry. De Gruyter, 1994. P. 680.
3. *Emsley J.* Nature's Building Blocks. Oxford: Oxford University press, 2011. P. 268.
4. *Narender K., Madhusuddhan Rao A.S., Gopal Kishan Rao K., Gopi Krishna N.* Thermophysical Properties of Wrought Aluminum Alloys 6061, 2219, and 2014 by Gamma Ray Attenuation Method // *Thermochimica Acta.* 2013. V. 569. P. 90.
5. *Narender K., Rao A., Rao K., Krishna N.* Temperature Dependence of Density and Thermal Expansion of Wrought Aluminum Alloys 7041, 7075, and 7095 by Gamma Ray Attenuation Method // *J. Modern Phys.* 2013. V. 4. № 3. P. 331.
6. *Madhusuddhan Rao A.S., Narender K., Gopal Kishan Rao K., Gopi Krishna N.* Thermal Expansion of Alkali Halides by Gamma-Ray Attenuation // *J. Adv. Phys.* 2013. V. 2. № 2. P. 96.
7. *Ammiraju S., Madusudhan R., Narender K., Rao K.G.K., Krishna N.G.* Thermophysical Properties of Rubidium and Lithium Halides by  $\gamma$ -ray Attenuation Technique // *TBT.* 2014. T. 52. № 5. С. 677.
8. *Madhusudhan Rao A.S., Narender K.* Studies on Thermophysical Properties of CaO and MgO by  $\gamma$ -Ray Attenuation // *J. Thermodynamics.* 2014. V. 2014. 123478.
9. *Rao A., Narender K., Rao K., Krishna N.* Thermophysical Properties of NaCl, NaBr, and NaF by  $\gamma$ -Ray Attenuation Technique // *J. Modern Phys.* 2013. V. 4. № 2. P. 208.
10. *Ranga Rao M., Gopikrishna N., Chandralingam S.* Thermal Properties of Sesquioxide of Samarium in the Temperature Range 300 to 1000 K // *Materials Today: Proc.* 2020. V. 27. Pt. 2. P. 1854.
11. *Русанов Б.А., Багласова Е.С., Попель П.С., Сидоров В.Е., Сабирзянов А.А.* Гамма-плотномер для исследования высокотемпературных металлических расплавов // *TBT.* 2018. T. 56. № 3. С. 455.
12. *Abdullaev R.N., Kozlovskii Yu.M., Khairulin R.A., Stankus S.V.* Density and Thermal Expansion of High Purity Nickel over the Temperature Range from 150 K to 2030 K // *Int. J. Thermophys.* 2015. V. 36. № 4. P. 603.
13. *Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Мозговой А.Г.* Экспериментальное исследование плотности и термического расширения перспективных материалов и теплоносителей жидкометаллических систем термоядерного реактора. Литий // *TBT.* 2011. T. 49. № 2. С. 196.
14. *Станкус С.В., Хайрулин Р.А., Мозговой А.Г., Рошупкин В.В., Покрасин М.А.* Экспериментальное исследование плотности висмута в конденсированном состоянии в широком интервале температур // *TBT.* 2005. T. 43. № 3. С. 374.
15. *Курочкин А.Р., Попель П.С., Ягодин Д.А., Борисенко А.В., Оханкин А.В.* Плотность сплавов медь-алюминий при температурах до 1400°C по результатам измерений гамма-методом // *TBT.* 2013. T. 51. № 2. С. 224.
16. *Сивков Г.М., Ягодин Д.А., Попель П.С.* Объемные характеристики сплавов Pd–Si при температурах от комнатной до 1600°C // *TBT.* 2006. T. 44. № 4. С. 539.
17. *Станкус С.В., Хайрулин Р.А.* Плотность сплавов системы олово–свинец в твердом и жидком состояниях // *TBT.* 2006. T. 44. № 3. С. 393.
18. *Станкус С.В., Тягельский П.В.* Плотность высокочистого диспрозия в твердом и жидком состояниях // *TBT.* 2000. T. 38. № 4. С. 579.
19. *Stankus S.V., Tyagelsky P.V.* Thermal Properties of  $Al_2O_3$  in the Melting Region // *Int. J. Thermophys.* 1994. V. 15. № 2. P. 309.
20. *Stecura S., Campbell W.J.* Thermal Expansion and Phase Inversion of Rare-Earth Oxides. U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 5847, 1961. 47 p.
21. *Wilfong R.L., Domingues L.P., Furlong L.R., Finlayson J.A.* Thermal Expansion of the Oxides of Yttrium, Cerium, Samarium, Europium, and Dysprosium. U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 6180, 1963. 25 p.
22. *Drotning W.D.* Thermal Expansion of Solids at High Temperature by the Gamma Attenuation Technique // *Rev. Sci. Instrum.* 1979. V. 50. № 12. P. 567.