

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 544.33+546.6

ТЕРМОХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ОКСИДА ВИСМУТА-КОБАЛЬТА-ДИСПРОЗИЯ:
ЭНТАЛЬПИЯ ОБРАЗОВАНИЯ, ЭНТАЛЬПИЯ РЕШЕТКИ

© 2023 г. Н. И. Мацкевич^{a, *}, А. Н. Семерикова^a, Н. В. Гельфонд^a,
В. П. Зайцев^{a, b}, М. Ю. Мацкевич^a, О. И. Ануфриева^a, А. А. Федоров^a

^aИнститут неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН,
пр-т Академика Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090 Россия

^bСибирский государственный университет водного транспорта,
ул. Щетинкина, 33, Новосибирск, 630033 Россия

*e-mail: nata.matskevich@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.07.2023 г.

После доработки 14.08.2023 г.

Принята к публикации 25.08.2023 г.

Методом твердофазных реакций получен оксид висмута-кобальта-диспрозия состава $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$. Показано, что соединение имеет кубическую структуру, пр. гр. Fmm , параметр решетки $a = 0.55279(5)$ нм. Энтальпия растворения и стандартная энтальпия образования для соединения $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ измерены методом калориметрии растворения и составили: $\Delta_{\text{sol}}H^0 = -1017.0 \pm 7.5$ кДж/моль, $\Delta_fH^0 = -5338.8 \pm 19.9$ кДж/моль соответственно. С использованием цикла Борна–Габер рассчитана энтальпия решетки: $\Delta_{\text{lat}}H^0 = -99020$ кДж/моль. Показано, что энтальпия решетки увеличивается по абсолютной величине с уменьшением радиуса редкоземельного элемента в ряду неодим–диспрозий–гольмий.

Ключевые слова: оксид висмута, оксид кобальта, оксид диспрозия, энтальпия образования, энтальпия решетки

DOI: 10.31857/S0044457X23601402, **EDN:** BWNIYL

ВВЕДЕНИЕ

Соединения на основе оксидов висмута, редкоземельных и переходных элементов являются перспективными материалами для использования в электрокатализе, кислородных керамических генераторах, электролитах топливных элементов, газовых сенсорах и др. [1–10]. Одним из уникальных свойств этих соединений является высокая ионная проводимость в области средних температур, связанная с существованием δ -формы оксида висмута ($\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$), которая имеет кубическую структуру флюорита. Ионная проводимость δ -формы оксида висмута составляет $\sigma = 1$ См/см при 750°C .

Известно, что в системе Bi-O существуют только две стабильные фазы: $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$ и $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$. Фаза $\alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$ имеет моноклинную структуру и является стабильной от комнатной температуры до 730°C , в то время как фаза $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ является устойчивой от 730°C до температуры плавления. Большое количество исследований было предпринято для стабилизации δ -формы оксида висмута до комнатных температур. Для этого проводили за-

мещение висмута как изовалентными (лантаноиды и др.), так и неизовалентными (вольфрам, ниобий) элементами [11–15]. В соединениях на основе оксида висмута, замещенных редкоземельными элементами (PЗЭ), обнаружена следующая тенденция. Ионная проводимость увеличивается с ростом радиуса PЗЭ , но стабильность при этом уменьшается [16, 17]. Таким образом, существует корреляция между ионной проводимостью и стабильностью.

Наибольшие успехи при замещении δ -формы оксида висмута были достигнуты для соединений $\text{Bi}_{12.5}\text{RE}_{1.5}\text{ReO}_{24.5}$, когда было проведено замещение висмута на рений и редкоземельные элементы [18, 19]. В данном случае удалось провести замещение на все редкоземельные элементы от лантана до лютеция. Ионная проводимость полученных новых соединений $\text{Bi}_{12.5}\text{RE}_{1.5}\text{ReO}_{24.5}$ сравнима с ионной проводимостью висмут-ванадиевых оксидов, замещенных PЗЭ [20, 21].

В работе [22] представлен обзор термодинамических свойств для соединений $\text{Bi}_{12.5}\text{RE}_{1.5}\text{ReO}_{24.5}$ со всеми лантаноидами (от лантана до лютеция).

На основе экспериментальных исследований показано, что энтальпия решетки уменьшается от лютеция до лантана. Сравнение с ионной проводимостью показывает, что ионная проводимость увеличивается при переходе от соединений с лютецием к соединениям с лантаном. Отсюда следует очень важный вывод о важности изучения термодинамических свойств ионных проводников, которые позволяют предсказывать направление изменения как термодинамических характеристик, так и ионной проводимости.

Как показано в литературе, перренаты являются достаточно гигроскопичными. Кроме того, рений является дорогостоящим элементом. В связи с этим в настоящей работе получено соединение, в котором висмут замещен на кобальт и диспрозий. Выбор кобальта обусловлен тем, что в ряде соединений он, как и рений в соединениях $\text{Bi}_{12.5}\text{RE}_{1.5}\text{ReO}_{24.5}$, имеет тетрагональную координацию.

Целью настоящей работы является термохимическое исследование оксида висмута-кобальта-диспрозия методом реакционной калориметрии, расчет стандартной энтальпии образования и энтальпии решетки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Соединение состава $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ было синтезировано методом твердофазных реакций [23]. Для синтеза использовали следующее оборудование: весы аналитические (точность 0.0001 г) ВЛ-224В-С, планетарную мельницу Fritsch Pulverisette 6, пресс гидравлический ПГР-400, печь SNOL 4/1300.

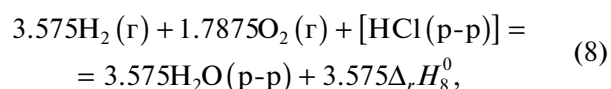
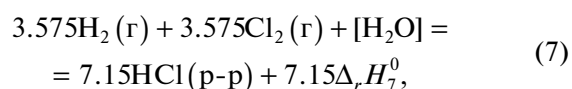
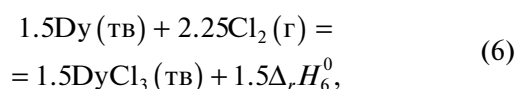
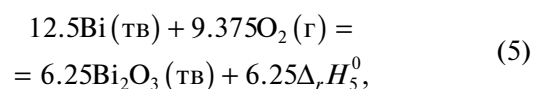
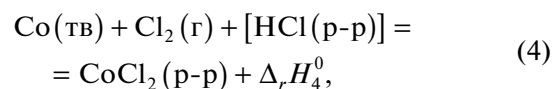
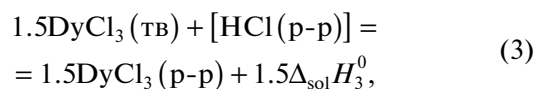
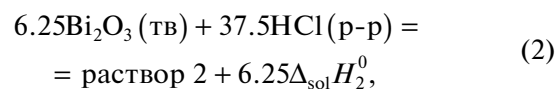
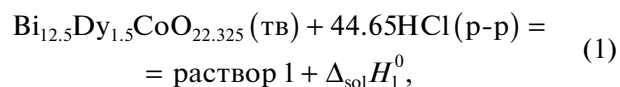
Для получения оксида висмута-кобальта-диспрозия применяли следующие прекурсоры: Bi_2O_3 (99.999%, Институт неорганической химии СО РАН), Co_3O_4 , Dy_2O_3 (>99.9%, Новосибирский завод редких металлов). Перед проведением синтеза оксиды прокаливали при температуре 773 К до постоянного веса с целью удаления адсорбированных веществ.

Соединение $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ было приготовлено следующим образом. Необходимую для синтеза стехиометрическую смесь взвешивали и измельчали в планетарной мельнице в течение 30 ч с несколькими промежуточными перетираниями. После этого смесь прессовали в таблетки и нагревали в печи на воздухе при температуре 1073 К в течение 50 ч.

Рентгенофазовый анализ продукта синтеза выполняли на приборе Shimadzu XRD-7000 ($\text{CuK}\alpha$ -излучение) при комнатной температуре. Поликристаллы растирали в агатовой ступке вместе с гептаном и упаковывали полученную суспензию в углубление стандартной кварцевой кюветы.

Определение энтальпии растворения исследуемого соединения и прекурсоров проводили в автоматизированном калориметре растворения с изотермической оболочкой при температуре 298.15 К. Конструкция калориметра и процедура измерений детально описаны в работах [24, 25]. Для определения энтальпий растворения вещества измельчали, помещали в ампулы из молибденового стекла и запаивали, после чего ампулы помещали в калориметр. Массу образцов определяли с использованием электронных весов ВЛ-224В-С с погрешностью 0.0001 г. Масса навески для измерения составляла ~50 мг. В качестве калибровочного образца использовали хлорид калия (KCl). Растворение хлорида калия было выполнено в дистиллированной воде при 298.15 К для того, чтобы откалибровать калориметр. Полученная нами энтальпия растворения хлорида калия составила 17.41 ± 0.08 кДж/моль. Величина хорошо согласуется с рекомендованными в литературе значениями: 17.42 ± 0.02 кДж/моль [26] и 17.47 ± 0.07 кДж/моль [27].

Для определения стандартной энтальпии образования $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ был построен термохимический цикл. Цикл был построен таким образом, что энтальпия растворения соединения $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ сравнивалась с энтальпиями растворения оксида висмута, хлорида кобальта и хлорида диспрозия. Схема термохимического цикла для определения стандартной энтальпии образования $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ представлена ниже. В качестве растворителя использовали 1 М раствор соляной кислоты.



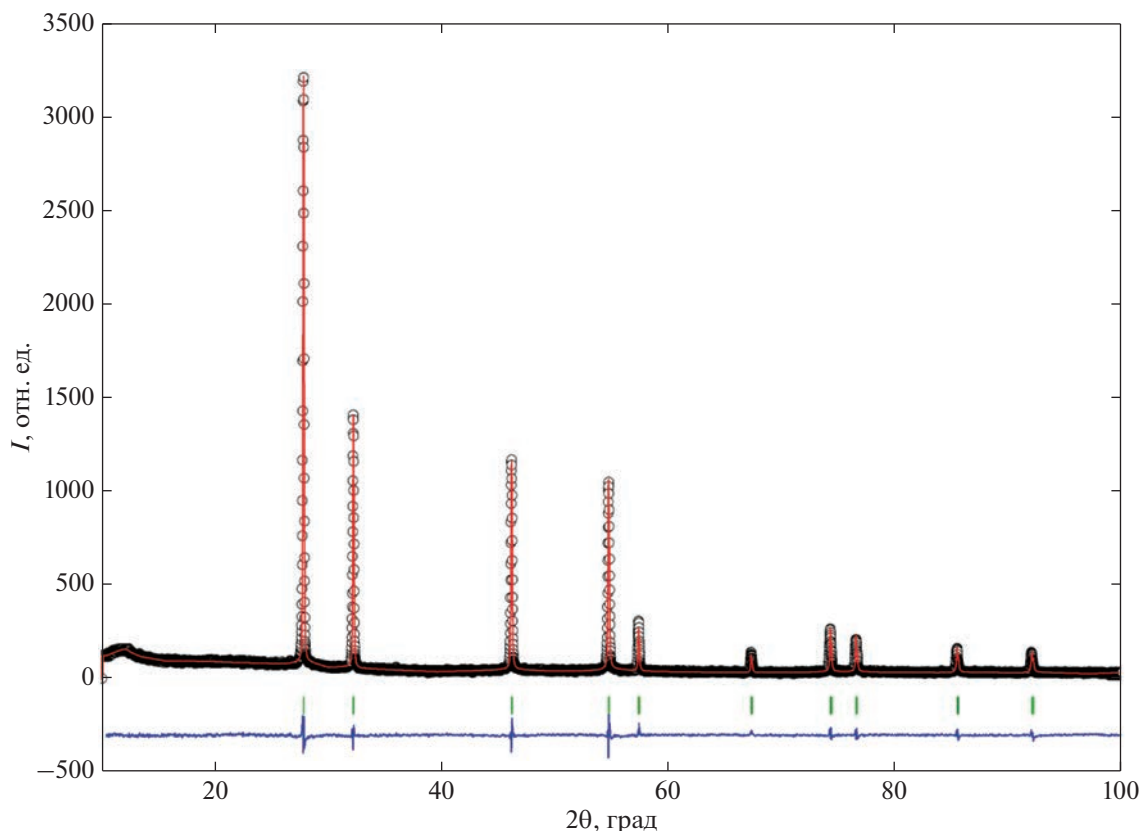
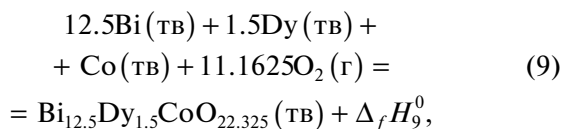


Рис. 1. Дифрактограмма образца $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ (черная — экспериментальная, красная — расчетная, зеленая — разностная).



где $\Delta_f H_9^0$ — стандартная энтальпия образования $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$.

Согласно закону Гесса, можно записать:

$$\begin{aligned}
 \Delta_f H_9^0 = & -\Delta_{\text{sol}} H_1^0 + 6.25\Delta_{\text{sol}} H_2^0 + 1.5\Delta_{\text{sol}} H_3^0 + \Delta_r H_4^0 + \\
 & + 6.25\Delta_r H_5^0 + 1.5\Delta_r H_6^0 - 7.15\Delta_r H_7^0 + 3.575\Delta_r H_8^0.
 \end{aligned}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгенофазовый анализ подтвердил, что изучаемое соединение является индивидуальной фазой и имеет кубическую решетку (пр. гр. $Fm\bar{3}m$) с параметром решетки $a = 0.55279(5)$ нм. Дифрактограмма образца представлена на рис. 1. Фотоэмиссионная спектроскопия, выполненная в диапазоне энергии фотонов 775–800 эВ, показала, что соединение $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ включает 35% Co^{2+} и 65% Co^{3+} .

Соединение $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ было проанализировано методами химического анализа и масс-

спектрометрии. Результаты химического анализа показали, что соединение имеет чистоту на уровне 99%.

Содержание примесей исследовали методом количественного атомно-эмиссионного спектрального химического анализа на спектрометре ThermoScientific ICAP-6500. Анализ на примеси металлов Ho, Eu, Yb, La, Tm, Er, Pr, Sm, Te, Ca, Mg, Mn, Pb, Ag показал, что общее содержание примесей не превышает 10^{-4} ат. %. Содержание кислорода было определено методом восстановительного плавления и составило $10.89 \pm 0.04\%$, рассчитано — 10.92% .

Для определения стандартной энтальпии образования было проведено по шесть параллельных опытов для энтальпий растворения оксида висмута и соединения $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ в 1 М соляной кислоте. Энтальпия растворения исследуемого соединения составила: $\Delta_{\text{sol}} H^0(\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}) = -1017.0 \pm 7.5$ кДж/моль ($n = 6$). Энтальпия растворения оксида висмута (Bi_2O_3) $\Delta_{\text{sol}} H^0(\text{Bi}_2\text{O}_3) = -115.6 \pm 4.4$ кДж/моль ($n = 6$). Погрешности были рассчитаны для 95%-ного доверительного интервала с использованием коэффициента Стьюдента.

Измеренные нами энтальпии растворения $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ и Bi_2O_3 были использованы для

определения стандартной энтальпии образования соединения $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ по следующей схеме:

$$\Delta_f H_9^0 = -\Delta_{\text{sol}} H_1^0 + 6.25\Delta_{\text{sol}} H_2^0 + 1.5\Delta_{\text{sol}} H_3^0 + \Delta_r H_4^0 + 6.25\Delta_r H_5^0 + 1.5\Delta_r H_6^0 - 7.15\Delta_r H_7^0 + 3.575\Delta_r H_8^0.$$

Для расчета стандартной энтальпии образования помимо измеренных в работе данных необходимы данные по энтальпиям реакций (3)–(8), т.е.

$\Delta_{\text{sol}} H_3^0 - \Delta_r H_8^0$. Стандартные энтальпии образования процессов (3)–(8) были заимствованы из работ [27, 28] и приведены ниже:

$$\Delta_{\text{sol}} H_3^0 (\text{DyCl}_3) = -198.8 \pm 0.3 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta_r H_4^0 (\text{CoCl}_2) = -383.7 \pm 2.1 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta_r H_5^0 (\text{Bi}_2\text{O}_3) = -577.8 \pm 4.2 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta_r H_6^0 (\text{DyCl}_3) = -995.8 \pm 8.4 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta_r H_7^0 (\text{HCl}) = -164.4 \pm 0.2 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta_r H_8^0 (\text{H}_2\text{O}) = -285.85 \pm 0.04 \text{ кДж/моль} [27, 28].$$

Величина стандартной энтальпии образования, рассчитанная с использованием полученных в работе экспериментальных данных, а также литературных данных, составила:

$$\Delta_f H^\circ (\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}) = -5338.8 \pm 19.9 \text{ кДж/моль}. \quad (10)$$

Далее была рассчитана энтальпия решетки. Для расчета энтальпии решетки соединения $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ использовали цикл Борна–Габера. Схема для расчета энтальпии решетки приведена ниже:

$$\begin{aligned} &12.5\text{Bi}(\text{тв}) + 1.5\text{Dy}(\text{тв}) + \\ &+ \text{Co}(\text{тв}) + 11.1625\text{O}_2(\text{г}) = \\ &= \text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}(\text{тв}) + \Delta_f H_{11}^0, \end{aligned} \quad (11)$$

$$12.5\text{Bi}^{3+}(\text{г}) = 12.5\text{Bi}(\text{тв}) + 12.5\Delta_r H_{12}^0, \quad (12)$$

$$1.5\text{Dy}^{3+}(\text{г}) = 1.5\text{Dy}(\text{тв}) + 1.5\Delta_r H_{13}^0, \quad (13)$$

$$0.35\text{Co}^{2+}(\text{г}) = 0.35\text{Co}(\text{тв}) + 0.35\Delta_r H_{14}^0, \quad (14)$$

$$0.65\text{Co}^{3+}(\text{г}) = 0.65\text{Co}(\text{тв}) + 0.65\Delta_r H_{15}^0, \quad (15)$$

$$22.325\text{O}^{2-}(\text{г}) = 11.1625\text{O}_2(\text{г}) + 22.325\Delta_r H_{16}^0. \quad (16)$$

На основании реакций (12)–(16) можно записать следующую реакцию:

$$\begin{aligned} &12.5\text{Bi}^{3+}(\text{г}) + 1.5\text{Dy}^{3+}(\text{г}) + 0.35\text{Co}^{2+}(\text{г}) + \\ &+ 0.65\text{Co}^{3+}(\text{г}) + 22.325\text{O}^{2-}(\text{г}) = \\ &= \text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}(\text{тв}) + \Delta_{\text{lat}} H_{17}^0. \end{aligned} \quad (17)$$

С использованием закона Гесса можно записать:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{lat}} H_{17}^0 &= \Delta_f H_{11}^0 + 12.5\Delta_r H_{12}^0 + 1.5\Delta_r H_{13}^0 + \\ &+ 0.35\Delta_r H_{14}^0 + 0.65\Delta_r H_{15}^0 + 22.325\Delta_r H_{16}^0. \end{aligned}$$

Для расчета энтальпии решетки нам потребуются энтальпия образования, определенная в настоящей работе, и энтальпии образования ионов висмута, диспрозия, кобальта и кислорода. Энтальпии образования ионов взяты из справочника [28] и приведены ниже: $\Delta_f H^\circ (\text{Bi}^{3+}) = 4994.0 \text{ кДж/моль}$; $\Delta_f H^\circ (\text{Dy}^{3+}) = 4188.6 \text{ кДж/моль}$; $\Delta_f H^\circ (\text{Co}^{2+}) = 2749.2 \text{ кДж/моль}$; $\Delta_f H^\circ (\text{Co}^{3+}) = 5981.4 \text{ кДж/моль}$; $\Delta_f H^\circ (\text{O}^{2-}) = 905.8 \text{ кДж/моль}$.

С использованием представленных выше данных была рассчитана энтальпия решетки:

$$\Delta_{\text{lat}} H^\circ (\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}) = -99020 \text{ кДж/моль}.$$

Ранее в работе [29] были определены стандартные энтальпии образования кобальтитов висмута, замещенных неодимом и гольмием: $\text{Bi}_{12.5}\text{Nd}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ и $\text{Bi}_{12.5}\text{Ho}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$. На основе измеренных стандартных энтальпий образования были рассчитаны энтальпии решеток этих соединений: $\Delta_{\text{lat}} H^\circ (\text{Bi}_{12.5}\text{Nd}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}) = -98650 \text{ кДж/моль}$, $\Delta_{\text{lat}} H^\circ (\text{Bi}_{12.5}\text{Ho}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}) = -99100 \text{ кДж/моль}$. Видно, что энтальпия решетки увеличивается по абсолютной величине от неодима к гольмию. Это коррелирует с уменьшением радиуса РЗЭ от неодима к гольмию: $r(\text{Nd}^{3+}) = 0.1109 \text{ нм}$; $r(\text{Dy}^{3+}) = 0.1027 \text{ нм}$; $r(\text{Ho}^{3+}) = 0.1015 \text{ нм}$. Величины радиусов редкоземельных элементов взяты из работы [30]. На рис. 2 представлена зависимость энтальпии решетки соединений $\text{Bi}_{12.5}\text{RE}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ от радиуса РЗЭ.

Для объяснения увеличения энтальпии решетки с уменьшением радиуса редкоземельного элемента обратимся к анализу формулы Капустинского:

$$U = 1070.9 \frac{mZ_a Z_k}{r_a + r_k},$$

где U – энергия решетки; m – количество ионов; Z_a – заряд аниона; Z_k – заряд катиона; r_a – радиус аниона; r_k – радиус катиона. Мы использовали систему ионных радиусов, взятых из работы Шеннона [30].

Как можно видеть, энергия решетки обратно пропорциональна радиусу катиона, поэтому при уменьшении радиуса катиона энергия решетки увеличивается.

Ранее в работе [22] нами была выведена модифицированная формула Капустинского. Показано, что для малых замещений энергия решетки является линейной функцией от радиуса редкоземельного элемента. Этим объясняется линейная зависимость энтальпии решетки от радиуса РЗЭ, представленная на рис. 2.

Таким образом, в настоящей работе методом твердофазных реакций был синтезирован оксид вис-

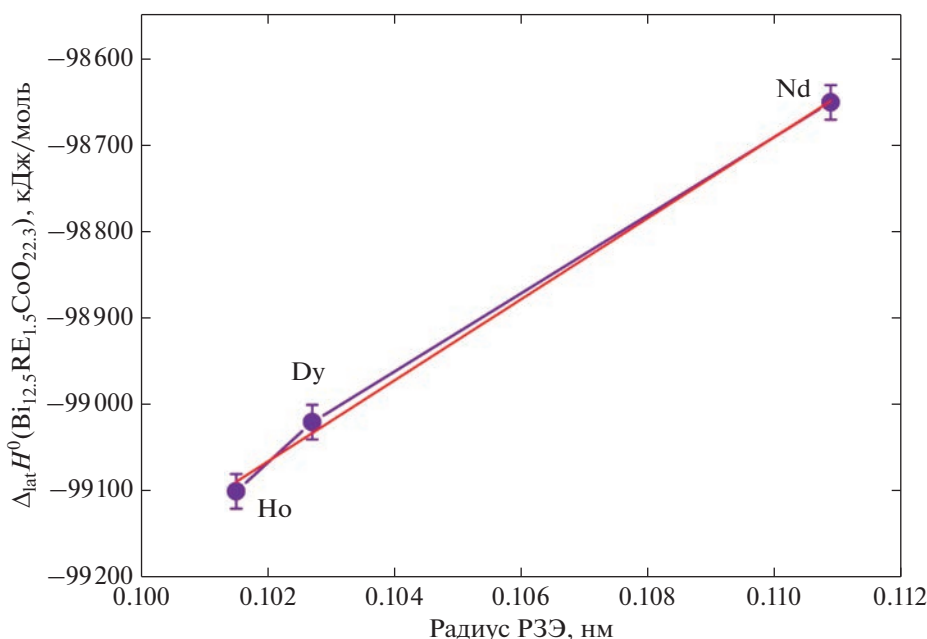


Рис. 2. Зависимость энтальпии решетки для соединений $\text{Bi}_{12.5}\text{RE}_{1.5}\text{CoO}_{22.3}$ от радиуса редкоземельного элемента.

мута-кобальта-диспрозия состава $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$. Соединение имеет кубическую структуру, пр. гр. $Fm\bar{3}m$. Методом калориметрии растворения определена энтальпия растворения $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ в 1 М соляной кислоте и рассчитана стандартная энтальпия образования. С использованием цикла Борна–Габера вычислена энтальпия решетки. Показано, что энтальпия решетки увеличивается по абсолютной величине с уменьшением радиуса редкоземельного элемента в ряду неодим–диспрозий–гольмий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показано в литературе, в ряде оксидных соединений кобальт имеет тетрагональное окружение. δ -Форма оксида висмута обладает самой высокой ионной проводимостью среди оксидных соединений. Для стабилизации δ -формы оксида висмута в настоящей работе методом твердофазных реакций синтезировано соединение состава $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$. Рентгенофазовый анализ показал, что полученное соединение обладает кубической структурой (пр. гр. $Fm\bar{3}m$). Для определения термодинамических характеристик использовали метод калориметрии растворения в 1 М соляной кислоте. На основе экспериментальных данных по энтальпиям растворения оксида висмута и соединения $\text{Bi}_{12.5}\text{Dy}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ определены стандартная энтальпия образования и энтальпия решетки вышеуказанного соединения. Сопоставление полученной энтальпии решетки с энтальпиями решетки для соединений $\text{Bi}_{12.5}\text{Nd}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ и

$\text{Bi}_{12.5}\text{Ho}_{1.5}\text{CoO}_{22.325}$ показало, что энтальпия решетки увеличивается по абсолютной величине с уменьшением радиуса РЗЭ в ряду неодим–диспрозий–гольмий. Полученную закономерность можно объяснить на основе формулы Капустинского для энергии решетки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Настоящая работа поддержана Российским научным фондом (проект № 19-19-00095-П). Мацкевич Н.И., Семерикова А.Н., Гельфонд Н.В., Мацкевич М.Ю., Ануфриева О.И., Федоров А.А. благодарят Министерство науки и высшего образования РФ (проект № 121031700314-5) за использование калориметра.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Crumpton T.E., Mosselmans J.F.W., Creaves C. // J. Mater. Chem. 2005. V. 15. P. 164. <https://doi.org/10.1039/b412108m>
2. Yue Ya., Dziegielewska A., Zhang M. et al. // Chem. Mater. 2023. V. 35. P. 189. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.2c03001>
3. Gagarin P.G., Guskov A.V., Gavrichev K.S. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. P. 2183. <https://doi.org/10.1134/S0036023622602070>
4. Lomanova N.A. // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. P. 741. <https://doi.org/10.1134/S0036023622060146>

5. Pandey P., Dixit P., Chauhan V. et al. // J. Alloys Compd. 2023. V. 952. P. 169911.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169911>
6. Kaimieva O.S., Sabirova I.E., Buyanova E.S. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. P. 1348.
<https://doi.org/10.1134/S0036023622090054>
7. Jankovsky O., Sedmidubsky D., Leitner J. et al. // Thermochim. Acta. 2014. V. 582. P. 40.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.02.022>
8. Dmitriev A.V., Vladimirova E.V., Kellerman D.G. et al. // J. Alloys Compd. 2019. V. 777. P. 586.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.387>
9. Elovikov D.P., Tomkovich M.V., Levin A.A. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. P. 850.
<https://doi.org/10.1134/S0036023622060067>
10. Steblevskaya N.I., Belobeletskaya M.V., Medkov M.A. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. P. 1228.
<https://doi.org/10.1134/S0036023622080265>
11. Milewska K., Maciejewski M., Lapinski M. et al. // J. Non-Cryst. Solids. 2023. V. 605. P. 122169.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2023.122169>
12. Balci M., Saatci B., Turk H. et al. // Mater. Today Comm. 2022. V. 33. P. 104542.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104542>
13. Crumpton T.E., Greaves C. // J. Mater. Chem. 2004. V. 14. P. 2433.
<https://doi.org/10.1039/b405770h>
14. Lv P., Huang F. // RSC Advances. 2019. V. 9. P. 8650.
<https://doi.org/10.1039/c8ra09565e>
15. Capoen E., Steil C., Boivin J.C. et al. // Solid State Ionics. 2006. V. 177. P. 483.
<https://doi.org/10.1016/j.ssi.2005.12.015>
16. Emel'yanova Yu.V., Mikhailovskaya Z.A., Buyanova E.S. et al. // Russ. J. Appl. Chem. 2017. V. 90. P. 354.
<https://doi.org/10.1134/S1070427217030053>
17. Krok F., Abrahams I., Holdynski M. et al. // Solid State Ionics. 2008. V. 179. P. 975.
<https://doi.org/10.1016/j.ssi.2008.02.015>
18. Hervoches C.H., Greaves C. // Solid State Ionics. 2014. V. 254. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.ssi.2013.10.032>
19. Matskevich N.I., Wolf Th., Pischur D. et al. // J. Therm. Anal. Calorim. 2016. V. 124. P. 1745.
<https://doi.org/10.1007/s10973-016-5316-y>
20. Kekade S.S., Gaikwad P.V., Raut S.A. et al. // ACS Omega. 2018. V. 3. P. 5853.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00564>
21. Pun R., Feteira A.M., Sinclair D.C. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2006. V. 128. P. 15386.
<https://doi.org/10.1021/ja065961d>
22. Matskevich N.I., Wolf Th., Greaves C. et al. // J. Chem. Thermodyn. 2015. V. 91. P. 234.
<https://doi.org/10.1016/j.jct.2015.07.036>
23. Minenkov Yu.F., Matskevich N.I., Stenin Yu.G. et al. // Thermochim. Acta. 1996. V. 278. P. 1.
[https://doi.org/10.1016/0040-6031\(95\)02801-3](https://doi.org/10.1016/0040-6031(95)02801-3)
24. Matskevich N.I., McCallum R.W. // Thermochim. Acta. 1999. V. 342. P. 41.
[https://doi.org/10.1016/s0040-6031\(99\)00314-7](https://doi.org/10.1016/s0040-6031(99)00314-7)
25. Matskevich N.I., Krabbes G., Berastegui P. // Thermochim. Acta. 2003. V. 397. P. 97.
[https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(02\)00330-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(02)00330-1)
26. Kilday M.V. // J. Res. Nat. Bur. Stand. 1980. V. 85. P. 467.
27. Gunther C., Pfestorf R., Rother M. et al. // J. Therm. Anal. Calorim. 1988. V. 33. P. 359.
28. Термические константы веществ (Thermal Constants of Substances) / Ed. Glushko V.P. M.: VINITI, 1965–1982. V. 1–10.
29. Matskevich N.I., Semerikova A.N., Samoshkin D.A. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2022. V. 67. P. 1825.
<https://doi.org/10.1134/S0036023622600988>
30. Shannon R.D. // Acta Crystallogr., Sect. A. 1976. V. 32. P. 751.
<https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>