

## ТЕРМОДИНАМИКА И КИНЕТИКА ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ДИССОЦИИИ ДОЛОМИТА

© 2016 г. **М.В. Белоусов, Е.Н. Селиванов, Р.И. Гуляева, С.Н. Тюшняков, Д.Ф. Ракипов**

Уральский федеральный университет (УрФУ) им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург  
Институт металлургии (ИМЕТ) УрО РАН, г. Екатеринбург

*Статья поступила в редакцию 06.06.14 г., доработана 14.04.15 г., подписана в печать 15.05.15 г.*

Приведены результаты исследований термодинамических основ и кинетики процессов термической диссоциации доломитов уральских месторождений. Образцы доломита отличаются долей и крупностью включений кальцита, что определяет отличия в кинетике их диссоциации. Установлено, что диссоциация доломитов протекает по двухстадийной модели, лимитируемой на первой стадии реакцией на трехмерной поверхности, а на второй – кинетическим уравнением, имеющим порядок, близкий к 0,3 и 0,6.

**Ключевые слова:** производство магния, силикотермия, термодинамика, кинетика, доломит, обжиг, диссоциация, моделирование.

**Белоусов М.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии алюминия УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: metalmg@yandex.ru.

**Селиванов Е.Н.** – докт. техн. наук, директор ИМЕТ УрО РАН (620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101). E-mail: pcmlab@mail.ru.

**Гуляева Р.И.** – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник ИМЕТ УрО РАН. E-mail: pcmlab@mail.ru.

**Тюшняков С.Н.** – аспирант ИМЕТ УрО РАН. E-mail: pcmlab@mail.ru.

**Ракипов Д.Ф.** – канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии легких металлов УрФУ. E-mail: rakipov@list.ru.

**Для цитирования:** Белоусов М.В., Селиванов Е.Н., Гуляева Р.И., Тюшняков С.Н., Ракипов Д.Ф. Термодинамика и кинетика процесса термической диссоциации доломита // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 2. С. 18–25. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-18-25.

*Belousov M.V., Selivanov E.N., Gulyaeva R.I., Tyushnyakov S.N., Rakipov D.F.*  
**Thermodynamics and kinetics of dolomite thermal dissociation**

Here we present the results of studying thermodynamic principles and kinetics of thermal dissociation of dolomites in the Urals deposits. Dolomite samples vary by fractions and grain size of calcite inclusions that determines the differences in their dissociation kinetics. It was found that dolomite dissociation occurs based on the two-stage model limited at the first stage by the reaction on a three-dimensional surface and at the second stage – by the kinetic equation with a degree close to 0,3 and 0,6.

**Keywords:** magnesium production, silicothermy, thermodynamics, kinetics, dolomite, roasting, dissociation, modeling.

**Belousov M.V.** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of aluminium metallurgy, Ural Federal University (UrFU) (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira str., 19). E-mail: metalmg@yandex.ru.

**Selivanov E.N.** – Dr. Sci (Eng.), Director of the Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy Science (IMET) (620016, Russia, Yekaterinburg, Amundsen str., 101). E-mail: pcmlab@mail.ru.

**Gulyaeva R.I.** – Cand. Sci, Senior researcher at the IMET. E-mail: pcmlab@mail.ru.

**Tyushnyakov S.N.** – Postgraduate at the IMET. E-mail: pcmlab@mail.ru.

**Rakipov D.F.** – Cand. Sci (Eng.), Associate Professor of the Department of light metals metallurgy, UrFU. E-mail: rakipov@list.ru.

**Citation:** Belousov M.V., Selivanov E.N., Gulyaeva R.I., Tyushnyakov S.N., Rakipov D.F. Termodinamika i kinetika protsesssa termicheskoi dissotsiatsii dolomita. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 2. P. 18–25. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-2-18-25.

## Введение

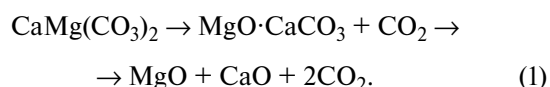
Сведения о термической диссоциации доломита  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  важны для производства магния силикотермическим способом. Диссоциация карбонатов щелочно-земельных металлов изучена достаточно подробно [1–8], однако и до настоящего

времени механизм процесса однозначно не установлен.

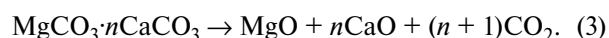
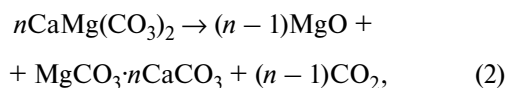
Современные представления о механизме разложения карбонатов магния и кальция не имеют существенных расхождений. В отношении доло-

мита ситуация несколько иная: исследования методами рентгеноструктурного анализа, электронной микроскопии, меченых атомов не дали окончательного суждения о механизме его разложения.

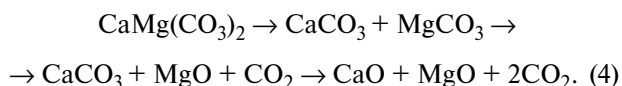
По мнению авторов [2, 3], излагающих точку зрения Ле-Шателье и Митчелла, в ходе термического разложения доломита образуется соединение  $MgO \cdot CaCO_3$ , в дальнейшем диссоциирующее на оксиды магния и кальция:



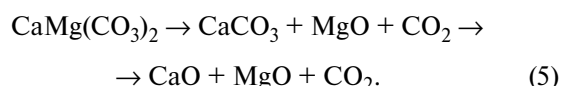
Согласно [4] диссоциация доломита происходит с выделением  $MgO$  и  $CO_2$ , остаток представляет собой твердый раствор избыточного кальцита в доломите. Этой же гипотезы придерживаются авторы [5, 6]:



Для крупнокристаллического доломита в работах [2, 6] предположен его распад при  $t = 750^\circ C$  на свободные карбонаты кальция и магния. Карбонат магния сразу разлагается с высокой скоростью на  $MgO$  и  $CO_2$  с образованием механической смеси оксида магния и карбоната кальция, который диссоциирует при повышенной температуре:



Большое распространение получило заключение авторов [7] о двухстадийном механизме термического распада доломита, определяемом парциальным давлением  $CO_2$  в газе. При  $P_{CO_2} > 2,66$  кПа диссоциация протекает в две стадии:



Если  $P_{CO_2} < 2,66$  кПа, то при распаде доломита сразу образуются  $CaO$  и  $MgO$ . Формирование  $CaCO_3$  возможно, как утверждается в [7], непосредственно из решетки доломита с сохранением кристаллов  $CaCO_3$  исходной ориентации.

Цель настоящей работы состоит в исследовании термодинамических и кинетических параметров процесса термической диссоциации доломитов Бойцовского и Чернореченского месторождений (Свердловская обл.).

## Методика исследований

Для достижения поставленной цели применялись следующие методы исследований:

— термодинамическое моделирование [8] для системы  $CaMg(CO_3)_2 - MgCO_3 - CaCO_3 - MgO - CaO - CO_2$  (HSC 6.1 Chemistry);

— термический анализ (NETZSCH STA 449C) с использованием дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ);

— рентгенофазовый анализ (RIGAKU,  $D_{max} = 2200$ ) продуктов взаимодействия;

— расчет кинетических параметров и оценка реакционной модели (NETZSCH Thermokinetics 3.0).

Для экспериментов взяты представительные пробы доломитовой руды Бойцовского (I) и Чернореченского (II) месторождений, состав которых приведен в табл. 1. Эти доломиты как сырье для производства магния имеют достаточно высокое качество, практически не загрязнены примесями щелочных и тяжелых металлов. Исходные пробы массой по 5 кг представляли собой куски размером до 25–70 мм. Для изучения их структуры использовались кусковые (25 мм) образцы, а для термического анализа их измельчали до крупности менее 0,074 мм.

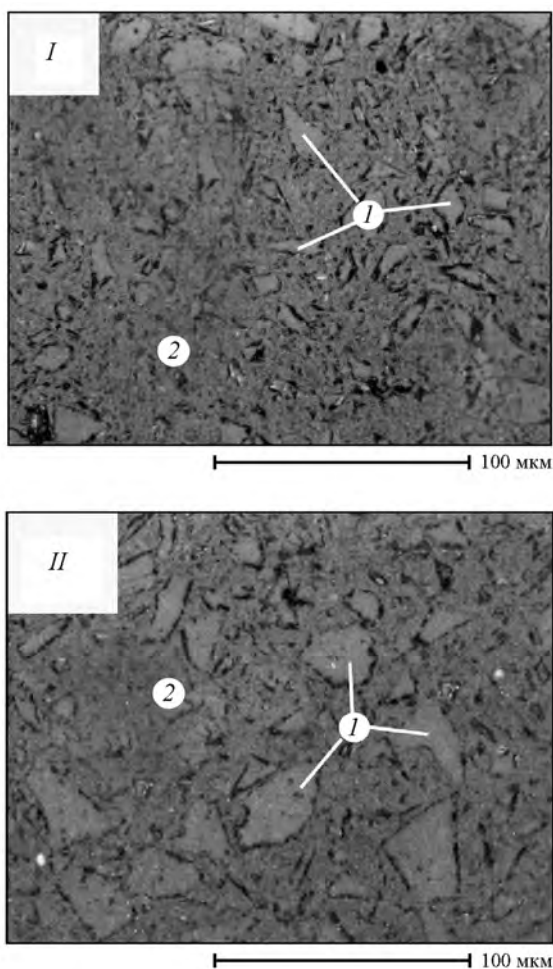
## Результаты и их обсуждение

Микроструктура (рис. 1) исследуемых образцов отличается долей и крупностью включений карбоната кальция: в обр. I они имеют размеры 10–

Таблица 1

Состав образцов руды Бойцовского (I) и Чернореченского (II) месторождений Свердловской обл.

Образец	Содержание, мас.%							
	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	п.п.п.	Сумма
I	20,4	31,1	0,08	0,03	0,02	0,04	46,0	97,6
II	18,7	33,0	0,17	0,04	0,05	0,07	47,2	99,3



**Рис. 1.** Структура образцов доломитов *I* и *II*  
 1 – CaCO<sub>3</sub>, 2 – CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

20 мкм и содержатся в количестве 7 %, а в обр. *II* – соответственно 20–30 мкм и 12,5 %.

По данным рентгенофазового анализа обоих порошкообразных образцов выявлены только рефлексы, характерные для CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> и CaCO<sub>3</sub>. Расчет параметров элементарных ячеек (ЭЯ) карбонатов в ромбоэдрической сингонии, пространственной группе *R3* при  $a = b$ ,  $\alpha = \beta = 90^\circ$  и  $\gamma = 120^\circ$  показал (табл. 2) небольшое превышение их значений для доломита в обр. *I* в сравнении с *II*. Причем параметры ЭЯ кальцита в обоих образцах различаются между собой: в обр. *II* отмечена большая величина параметра *c*. Исходя из значений рефлекса  $d_{104}$  для каждого из рассмотренных доломитов определено содержание в них кальция по уравнению [9]

$$N_{Ca} = (d_{104} - 0,28840)/0,003 + 0,50. \quad (6)$$

Для обр. *I*  $d_{104} = 0,28856$  нм, а для обр. *II* – 0,28811 нм, что соответствует составам доломитов

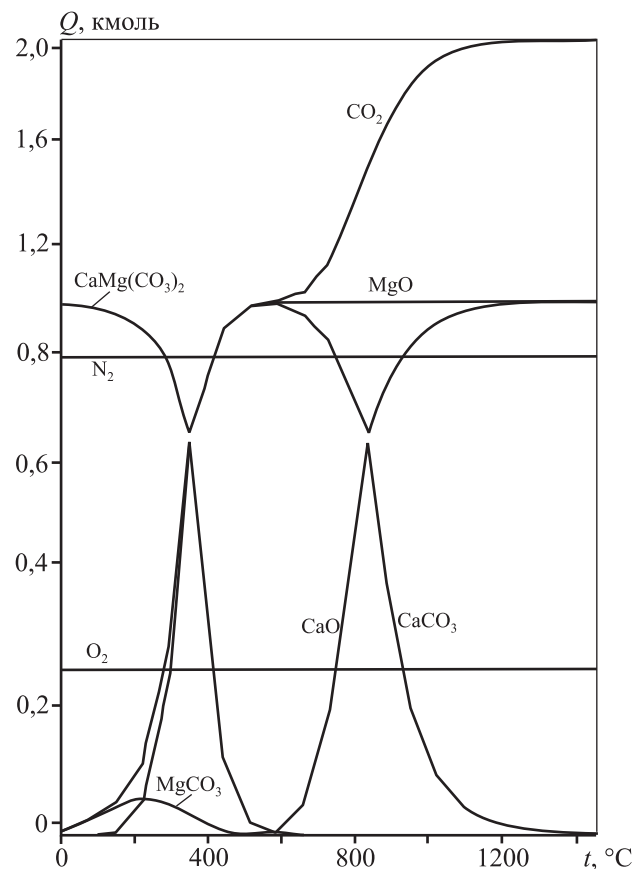
Ca<sub>0,505</sub>Mg<sub>0,495</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> и Ca<sub>0,490</sub>Mg<sub>0,510</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> и отношениям Ca : Mg = 1,021 (обр. *I*) и 0,962 (обр. *II*).

Термодинамическое моделирование в рабочем теле CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>–MgCO<sub>3</sub>–CaCO<sub>3</sub>–MgO–CaO–CO<sub>2</sub> выполнено в разных средах – на воздухе, в азоте и углекислом газе. Согласно полученным данным (рис. 2) диссоциация доломита (на воздухе) начинается при  $t > 200^\circ\text{C}$  и 100 %-но завершается для CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> около 600 °С, а CaCO<sub>3</sub> – при 900 °С. Изменение состава газовой фазы среды мало влия-

**Таблица 2**  
**Параметры элементарных ячеек\***  
**доломита и кальцита в исследуемых образцах**

Образец	Доломит			Кальцит		
	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>V</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>V</i>
<i>I</i>	0,4809	1,6005	0,3206	0,4991	1,7034	0,3674
<i>II</i>	0,4801	1,5992	0,3193	0,4973	1,7166	0,3677

\* *a* и *c* – размеры сторон, нм; *V* – объем элементарной ячейки, нм<sup>3</sup>.



**Рис. 2.** Результаты термодинамического моделирования нагрева доломита на воздухе

ет на последовательность превращений доломита, который первоначально разлагается на MgO и CaCO<sub>3</sub> с диссоциацией последнего при повышенных температурах. Необходимо отметить, что в среде CO<sub>2</sub> (0,1 МПа) диссоциация карбонатов начинается при более высоких температурах. Изменение доли CO<sub>2</sub> в газовой фазе свидетельствует о двухстадийной диссоциации доломита: разложение карбонатов магния на первой стадии и кальция — на второй в интервалах температур 500—650 °С и 800—1050 °С соответственно. Таким образом, термодинамическое моделирование подтверждает протекание процесса согласно реакции (5).

Расчет параметров элементарной ячейки доломита, выполненный исходя из данных высокотемпературного рентгенофазового анализа при нагреве обр. I (рис. 3), показал монотонное повышение

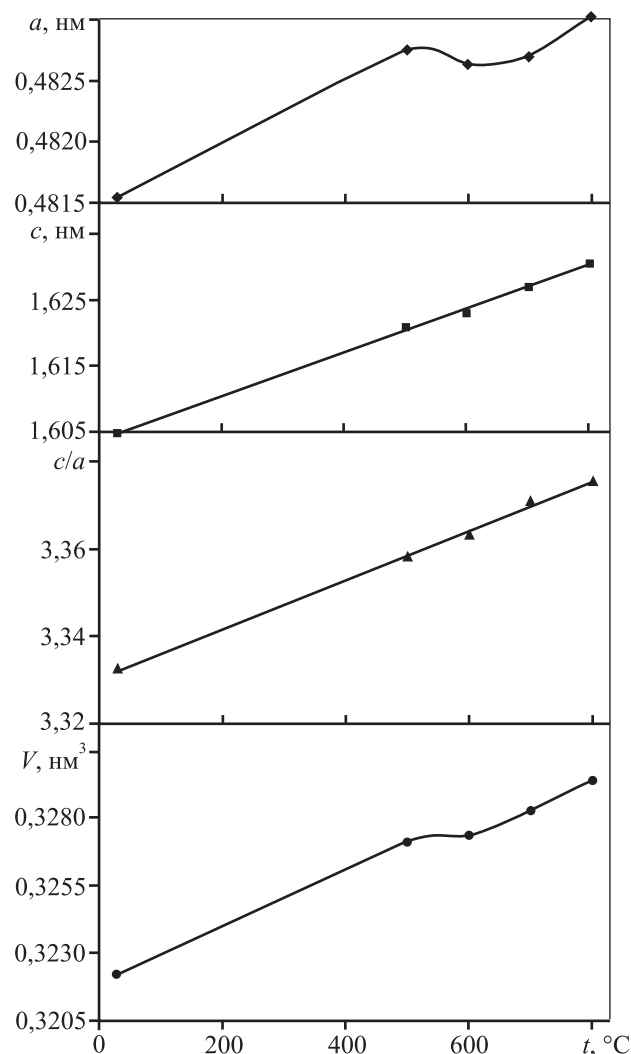


Рис. 3. Изменение параметров элементарной ячейки доломита (обр. I) при нагревании

величины  $c$  и отклонение от линейности параметра  $a$  при  $t = 500\text{--}700$  °С. Характерное повышение с температурой отношения  $c/a$  свидетельствует об анизотропном расширении кристаллической решетки доломита, т.е. о ее химической деформации, что было выявлено в работе [9].

Термоанализ измельченных образцов доломита (крупность частиц менее 0,074 мм, масса навески 15,85 мг) выполнен при непрерывном нагреве со скоростями  $v = 5, 10$  и  $20$  °С/мин в потоке (0,03 дм<sup>3</sup>/мин) аргона в тиглях из алунда. Результаты термического анализа обр. I (рис. 4, а) показали, что при  $v = 5$  °С/мин заметная убыль массы ( $\Delta m$ ) начинается с  $t = 400$  °С, при 810 °С она достигает 45,0 %, а при 1000 °С — 45,4 %. На кривой теплового потока ( $Q$ ) выявлен совмещенный эндотермический эффект с началом при 690 °С, теплота которого составила 1360 Дж/г (237 кДж/моль), связанный с разложением доломита. По кривой  $\Delta m/t$  выявлены два экстремума, отвечающие  $t = 760$  и  $793$  °С. Увеличение скорости нагрева до 20 °С/мин приводит к разделению эффектов на кривой  $Q$  и смещению начала и окончания разложения до 740 °С (первая стадия) и 850 °С (вторая).

Результаты термического анализа обр. II (см. рис. 4, б) показали, что при нагреве со скоростью 5 °С/мин его масса начинает убывать при  $t = 400$  °С, при 890 °С значение  $\Delta m$  достигает 46,8 %. На кривой теплового потока выявлены 3 совмещенных эндотермических эффекта с началом при  $t = 724$  °С (первая стадия) и максимумами при 751 и 798 °С (вторая). Суммарная их величина составила 1150 Дж/г (192 кДж/моль). Понижение величины теплового эффекта обр. II, вероятно, связано с большим содержанием CaCO<sub>3</sub> в исходном материале. Увеличение  $v =$  до 20 °С/мин приводит к смещению начала разложения доломита до 758 °С, а температур максимумов — до 790, 853 и 866 °С. Полученные данные удовлетворительно согласуются с результатами ранее проведенных измерений [10, 11].

Данные по изменению массы при разложении доломита положены в основу расчета кинетических параметров и выявления реакционной модели. Использование одностадийной модели процесса с лимитирующей кинетической реакцией  $n$ -го порядка позволило определить кинетические параметры с коэффициентами корреляции  $r^2 = 0,999$ . Результаты расчетов на основе последовательной двухстадийной модели  $A \rightarrow B \rightarrow C$  (рис. 5) выявили лимитирующие стадии, связанные с реакцией на трехмерной поверхности (R3) и кинети-

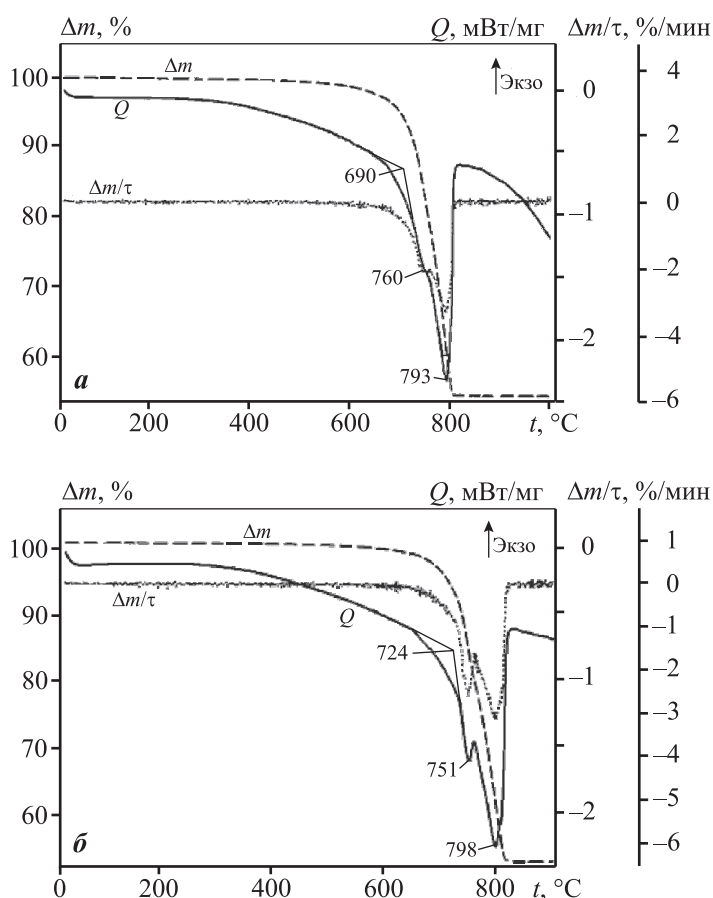


Рис. 4. Кривые изменения массы ( $\Delta m$ ), скорости ее изменения ( $\Delta m/\tau$ ) и теплового потока ( $Q$ ) при нагреве обр. I (а) и II (б) со скоростью 5 °С/мин

ческой реакцией  $n$ -го порядка ( $F_n$ ), описывающие экспериментальные данные с  $r^2 = 0,9993$ . Рассчитанные значения порядка реакции кинетической стадии оказались меньше единицы и составили 0,61 для обр. I и 0,28 для обр. II.

Общее кинетическое уравнение имеет вид [12, 13]

$$d\alpha/dt = k(T)f(\alpha), \quad (7)$$

где  $\alpha$  — степень превращения, определяемая как отношение текущего изменения массы к ее исходной величине;  $\tau$  — продолжительность;

$f(\alpha)$  — функция степени превращения по реакционной модели;  $T$  — температура;  $k(T)$  — константа скорости.

Температурная зависимость константы скорости подчиняется уравнению Аррениуса:

$$k(T) = A \exp[-E/(RT)], \quad (8)$$

где  $A$  — предэкспоненциальный множитель;  $E$  — энергия активации, кДж/моль;  $R$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Уравнение, описывающее процесс, лимитированный реакцией на трехмерной поверхности (R3), имеет вид

$$f_1(\alpha_1) = 3(1 - \alpha_1)^{2/3}, \quad (9)$$

а функция  $f_2(\alpha_2)$  для реакции  $n$ -го порядка (кинетический режим) —

$$f_2(\alpha_2) = (1 - \alpha_2)^n. \quad (10)$$

Рассчитанные кинетические параметры разложения образцов доломита приведены в табл. 3 и в целом согласуются с результатами работ [13, 14–18]. Однако литературные данные (табл. 4) свидетельствуют о значительном расхождении значений энергии активации разложения доломита (от 88 до 390 кДж/моль), что может быть обусловлено многообразием факторов, влияющих на

кинетику процесса, таких как генезис образцов, дисперсность зерен, несовершенство строения решетки, наличие дефектов, содержание примесей и т.д.

Микроструктура образцов и размеры элементарной ячейки карбонатов, по-видимому, оказывают некоторое влияние, особенно на начальном этапе разложения, связанном с распадом анионов  $\text{CO}_3^{2-}$  на  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}^{2-}$  на поверхности кристаллов [5, 19]. Десорбция и переход молекул  $\text{CO}_2$  в газовую фазу способствуют разрыхлению решетки. Хи-

Таблица 3

**Кинетические параметры разложения образцов доломита**

Образец	Модель	$E_1$ , кДж/моль	$\log A_1$ , $\text{c}^{-1}$	$E_2$ , кДж/моль	$\log A_2$ , $\text{c}^{-1}$	$n$	$r^2$
I	$F_n$	244	9,51	—	—	0,79	0,9985
	R3- $F_n$	292	11,1	248	9,7	0,61	0,9993
II	$F_n$	219	8,12	—	—	0,67	0,9991
	R3- $F_n$	252	9,88	216	7,8	0,28	0,9994

Таблица 4  
Кинетические параметры разложения доломита

Среда	1-я стадия			2-я стадия			<i>n</i>	Лит. источник
	Модель	$E_1$ , кДж/моль	$\log A_1$ , $c^{-1}$	Модель	$E_2$ , кДж/моль	$\log A_2$ , $c^{-1}$		
Аргон (обр. I)	<i>R3</i>	292	11,1	<i>Fn</i>	248	9,7	0,6	Наст. работа
Аргон (обр. II)	<i>R3</i>	252	9,9	<i>Fn</i>	216	7,8	0,3	
Аргон	<i>R3</i>	130	4,33	–	–	–	–	[13]
	<i>F1</i>	150	4,97	–	–	–	–	
	<i>D3</i>	274	11,30	–	–	–	–	
Воздух	<i>D1</i>	180	–	<i>F1</i>	130	–	–	[14]
Азот	–	181	8,38	–	–	–	–	[15]
Воздух	<i>Fn</i>	103	3,84	<i>Fn</i>	121	3,86	0,75	[16]
Воздух	<i>D1</i>	219	7,40	<i>F1</i>	390	15,82	–	[17]
Воздух	–	88	–	–	104	–	–	[18]

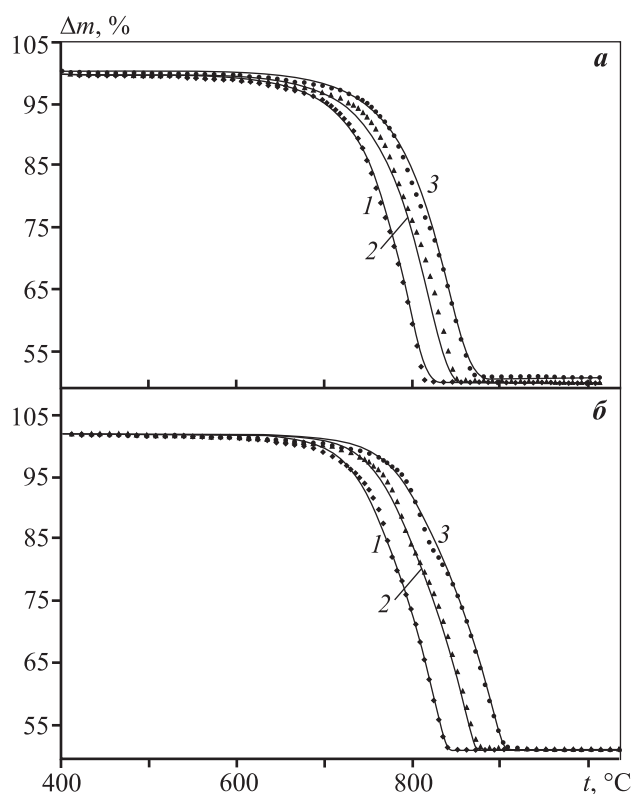


Рис. 5. Изменение массы при нагреве обр. I (а) и II (б) со скоростями 5 (1), 10 (2) и 20 (3) °С/мин  
Точки – эксперимент, линии – модель

мическая перестройка структуры, скорей всего, является лимитирующей стадией второй ступени. Различия значений кинетических параметров

разложения изученных образцов доломитов, вероятно, обусловлены их структурными особенностями. Мелкокристаллическая структура обр. I характеризуется более высокими значениями кинетических параметров. Важен также и состав фазы доломита: некоторый избыток содержания в ней кальция (обр. I) приводит к повышению устойчивости анионов  $CO_3^{2-}$  и, по-видимому, к росту величин энергии активации процесса разложения [5].

### Заключение

Методом термодинамического моделирования установлена последовательность равновесных превращений при нагреве доломита: первоначальное разложение на MgO и CaCO<sub>3</sub> с диссоциацией последнего при повышенных температурах. На основе данных термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии определены величины теплоты и кинетические параметры диссоциации доломитов Бойцовского и Чернореченского месторождений.

Методами неизотермической кинетики в потоке аргона установлено, что диссоциация доломита протекает по двухстадийному механизму, описываемому на первой стадии реакцией на трехмерной поверхности, а на второй – кинетическим уравнением, имеющим порядок меньше единицы. Изменение кинетических параметров изучаемых образцов связано со структурными различиями,

отношением Ca/Mg в доломите, а также долей и крупностью включений кальцита.

## Литература

1. Белоусов М.В., Ракипов Д.Ф., Никоненко Е.А., Колесникова М.П. Исследование механизма разложения доломита Среднего Урала // Цв. металлы. 2012. No. 4. С. 50—52.
2. Берг Л.Г. Введение в термографию. М.: Наука, 1969.
3. Вайвад А.Я., Гофман Б.Э., Кармон К.П. Доломитовые вяжущие вещества. Рига: АН Латвийской ССР, 1958.
4. Байков А.А., Тумашев А.С. Разложение природных углекислых солей при нагревании // Изв. АН СССР, ОТН. 1937. No. 4. С. 565—592.
5. Гельд П.В., Есин О.А. О возможности предварительной диссоциации доломита на отдельные карбонаты // Журн. прикл. химии. 1949. No. 3. С. 240—244.
6. Потепенко С.В. Термический анализ доломитов // Журн. прикл. химии. 1932. No. 15. С. 693—705
7. Haul R.A.W., Heystek H. Differential thermal analysis of the dolomite decomposition // Amer. Mineral. 1952. Vol. 37. P. 166—174.
8. Моисеев К.Г. Термодинамическое моделирование в неорганических системах. Челябинск: ЮУрГУ, 1999.
9. Boucif F., Marouf-Khelifa K., Batonneau-Gener I., Schott J., Khelifa A. Preparation, characterisation of thermally treated Algerian dolomite powders and application to azo-dye adsorption // Powder Technology. 2010. Vol. 201. P. 277—282.
10. Стрелец Х.Л., Тайц А.Ю., Гуляницкий Б.С. Metallurgy of magnesia. М.: Metallurgizdat, 1960.
11. Belousov M.V., Rakipov D.F. Nikonenko E.A. Kolesnikova M.P., Biserov A.G. Research of activity of burned dolomite in production of magnesium. Materials of the international research and practice conference: Science, Technology and Higher Education. Westwood. Canada, 2012. P. 142—148.
12. Vyazovkin S., Durnham A.K., Criado J.M., Perez-Maque-da L.A. Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data // Thermochim. Acta. 2011. Vol. 520. P. 1—19.
13. Criado J.M., Ortega A. Kinetic study of thermal decomposition of dolomite by controlled transformation rate thermal analysis (CRTA) and TG // J. Thermal Analys. 1991. Vol. 37. P. 2369—2375.
14. Ратко А.И., Иванец А.И., Кулак А.И., Морозов Е.А., Сахар И.О. Термическое разложение природного доломита // Неорган. матер. 2011. Т. 47. No. 12. С. 1502—1507.

15. Samtani M., Dollimore D., Alexander K.S. Comparison of dolomite decomposition Kinetics with related carbonates and effect of procedural variables on its kinetic parameters // Thermochim. Acta. 2002. Vol. 392-393. P. 135—145.
16. Maitra S., Choudhury A., Das H.S., Pramanik MS.J. Effect of compaction on the kinetics of thermal decomposition of dolomite under non-isothermal condition // J. Mater. Sci. 2005. Vol. 40. P. 4749—4751.
17. Olszak-Humienik M., Mozejko J. Kinetics of thermal decomposition of dolomite // J. Thermal Analys. Calorimetr. 1999. Vol. 56. P. 829—833.
18. Kök M.V., Smykatz-Kloss W. Characterization, correlation and kinetics of dolomite samples as outlined by thermal methods // J. Thermal Analys. Calorimetr. 2008. Vol. 91. P. 565—568.
19. Galai H., Pijolat M., Nahdi K., Trabelsi-Ayadi M. Mechanism of growth of MgO and CaCO<sub>3</sub> during a dolomite partial decomposition // Solid State Ion. 2007. Vol. 178. P. 1039—1047.

## References

1. Belousov M.V., Rakipov D.F., Nikonenko E.A., Kolesnikova M.P. Issledovanie mehanizma razlozhenija dolomita Srednego Urala [The research of dolomite decomposition on the Middle Urals]. *Tsvetnye Metally*. 2012. No. 4. P. 50—52.
2. Berg L.G. Vvedenie v termografiju [Introduction to Thermography]. Moscow: Nauka, 1969.
3. Vajvad A.Ja., Gofman B.Je., Karmon K.P. Dolomitovye vjazhushhie veshhestva [Dolomite binders]. Riga: Akademiya nauk Latvijas SSR. 1958.
4. Bajkov A.A., Tumashev A.S. Razlozhenie prirodnyh uglekislyh solej pri nagrevanii [Dissociation of natural carbonates when heated]. *Izvestija Akademii Nauk SSSR. OTN*. 1937. No. 4. P. 565—592.
5. Gel'd P.V., Esin O.A. O vozmozhnosti predvaritel'noj dissociacii dolomita na otdel'nye karbonaty [Dissociation of dolomite for individual carbonates]. *Zhurnal prikladnoj khimii*. 1949. No. 3. P. 240—244.
6. Potapenko S.V. Termicheskij analiz dolomitov [Thermal analysis of dolomite]. *Zhurnal prikladnoj khimii*. 1932. No. 15. P. 693—705.
7. Haul R.A.W., Heystek H. Differential thermal analysis of the dolomite decomposition. *Amer. Mineral*. 1952. Vol. 37. P. 166—174.
8. Moiseev K.G. Termodinamicheskoe modelirovanie v neorganicheskikh sistemah [Thermodynamic modeling in inorganic systems]. Chelyabinsk: South Ural State University, 1999.

9. Boucif F., Marouf-Khelifa K., Batonneau-Gener I., Schott J., Khelifa A. Preparation, characterisation of thermally treated Algerian dolomite powders and application to azo-dye adsorption. *Powder Technology*. 2010. Vol. 201. P. 277–282.
10. Strelec H.L., Tajc A.Ju., Guljanickij B.S. Metallurgija magnija [Metallurgy magnesium]. Moscow: Metallurgizdat, 1960.
11. Belousov M.V., Rakipov D.F. Nikonenko E.A. Kolesnikova M.P., Biserov A.G. Research of activity of burned dolomite in production of magnesium. Materials of the international research and practice conference: Science, Technology and Higher Education. Westwood. Canada, 2012. P. 142–148.
12. Vyazovkin S., Durnham A.K., Criado J.M., Perez-Maque-da L.A. Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. *Thermochim. Acta*. 2011. Vol. 520. P. 1–19.
13. Criado J.M., Ortega A. Kinetic study of thermal decomposition of dolomite by controlled transformation rate thermal analysis (CRTA) and TG. *J. Thermal Analys.* 1991. Vol. 37. P. 2369–2375.
14. Rai'ko A.I., Ivanec A.I., Kulak A.I., Morozov E.A., Sahar I.O. Termicheskoe razlozhenie prirodnogo dolomite [Thermal decomposition of natural dolomite]. *Neorganicheskie materialy*. 2011. Vol. 47. No. 12. P. 1502–1507.
15. Samtani M., Dollimore D., Alexander K.S. Comparison of dolomite decomposition Kinetics with related carbonates and effect of procedural variables on its kinetic parameters. *Thermochim. Acta*. 2002. Vol. 392-393. P. 135–145.
16. Maitra S., Choudhury A., Das H.S., Pramanik M.S.J. Effect of compaction on the kinetics of thermal decomposition of dolomite under non-isothermal condition. *J. Mater. Sci.* 2005. Vol. 40. P. 4749–4751.
17. Olszak-Humienik M., Mozejko J. Kinetics of thermal decomposition of dolomite. *J. Thermal Analys. Calorimetr.* 1999. Vol. 56. P. 829–833.
18. Kök M.V., Smykatz-Kloss W. Characterization, correlation and kinetics of dolomite samples as outlined by thermal methods. *J. Thermal Analys. Calorimetr.* 2008. Vol. 91. P. 565–568.
19. Galai H., Pijolat M., Nahdi K., Trabelsi-Ayadi M. Mechanism of growth of MgO and CaCO<sub>3</sub> during a dolomite partial decomposition. *Solid State Ion.* 2007. Vol. 178. P. 1039–1047.