

С. В. Василевич¹, М. В. Малько², Д. В. Дегтеров², А. Н. Асадчий²

¹*Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь*

²*Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ДОЛОМИТА НА КИНЕТИКУ ПРОЦЕССА ЕГО ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

Аннотация. Обсуждаются результаты экспериментального исследования термического разложения природного доломита, выполненного на лабораторном оборудовании при постоянных температурах 650 °С, 700, 750, 800 и 850 °С. В качестве исследуемых образцов использовались частицы белорусского доломита массой 0,58 г, 0,88, 2,3, 2,7, 7,6 и 16,3 г. Приведено уравнение, описывающее кинетику термического разложения природных доломитов Беларуси. Показано, что скорость реакции термического разложения доломита зависит не только от температурного режима в реакционной зоне, но и в значительной мере определяется массой исследуемых образцов. Установлено, что константа скорости термического разложения доломита в исследуемом диапазоне масс образцов может быть рассчитана по эмпирическому выражению, идентифицированному в ходе настоящего исследования. Определены константы скорости термического разложения частиц доломита различной массы. Приведено сравнение значений констант скорости, полученных эмпирическим путем и рассчитанных с учетом массы образцов. Отмечено, что разработанная модель является физически обоснованной, а предложенная в работе зависимость может быть инкорпорирована в существующие инженерные методики расчетов систем очистки генераторных газов, использующих доломит в качестве катализатора и сорбента.

Ключевые слова: топливный газ, доломит, термическое разложение, сорбент, термогравиметрический анализ, кинетика разложения, энергия активации, предэкспоненциальный фактор

Для цитирования: Влияние размера частиц доломита на кинетику процесса его термического разложения / С. В. Василевич [и др.] // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2022. – Т. 67, №2. – С. 204–213. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-2-204-213>

Siarhei V. Vasilevich¹, Mikhail V. Malko², Dmitry V. Degterov², Andrei N. Asadchyi²

¹*Belarusian State Aviation Academy, Minsk, Republic of Belarus*

²*Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

INFLUENCE OF DOLOMITE PARTICLE SIZE ON THE KINETICS OF ITS THERMAL DECOMPOSITION PROCESS

Abstract. The results of an experimental study of the thermal decomposition of natural dolomite, carried out on laboratory equipment at constant temperatures of 650 °C, 700, 750, 800 and 850 °C, are discussed. Particles of Belarusian dolomite weighing 0.58 g, 0.88, 2.3, 2.7, 7.6 and 16.3 g were used as the test samples. An integral equation describing the kinetics of thermal decomposition of natural dolomites of Belarus is presented. It is shown that the reaction rate of thermal decomposition of dolomite depends not only on the temperature regime in the reaction zone, but is also largely determined by the mass of the samples under study. It has been established that the rate constant of thermal decomposition of dolomite in the studied range of sample masses can be determined by the empirical expression identified in the course of this study. The rate constants of thermal decomposition of dolomite particles of various masses have been determined. The values of the rate constants obtained empirically and those calculated taking into account the mass of the samples are compared. It is noted that the developed model is physically justified, and the dependence proposed in the work can be incorporated into existing engineering methods for calculating generator gas purification systems using dolomite as a catalyst and sorbent.

Keywords: fuel gas, dolomite, thermal decomposition, sorbent, thermogravimetric analysis, decomposition kinetics, activation energy, pre-exponential factor

For citation: Vasilevich S. V., Malko M. V., Degterov D. V., Asadchyi A. N. Influence of dolomite particle size on the kinetics of its thermal decomposition process. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 2, pp. 204–213 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-2-204-213>

Введение. В настоящее время наблюдается тенденция к поиску решения проблем энергетической эффективности производств, диверсификации энергетики, в том числе за счет вовлечения неиспользуемых ранее видов топлива и/или расширения диапазона исходных характеристик используемых топлив. При этом интенсивно развивается система тепловых электрических станций (ТЭС), обладающих сравнительно малой мощностью и использующих различные виды местного топлива [1–4]. Подобные малые энергетические объекты, как правило, предполагают получение генераторного газа, а не прямое сжигание топлива [3–5].

Эффективность данного типа электростанций в настоящее время существенно лимитируется несовершенством процесса очистки и охлаждения генераторного газа при высокой стоимости (до 15–20 % от общей цены строительства ТЭС с парогазовой установкой [3]) аппаратного оформления необходимых для этого систем [3–5].

Перспективным катализатором-сорбентом для очистки генераторного газа является доломит. Использование доломита для этих целей обосновано на качественном уровне технологическим решением [4, 5]. Продукты разложения доломита (CaO и MgO) связывают содержащийся в газогенераторном газе диоксид углерода (CO₂), образуя карбонаты кальция и магния (CaCO₃ и MgCO₃) соответственно.

Частицы доломита при работе в качестве сорбента и катализатора обычно организуются в неподвижный слой, через который фильтруется генераторный газ. Подобный слой является объектом с распределенными параметрами, и одна из важных задач при проектировании оборудования очистки генераторного газа состоит в формировании условий, обеспечивающих разложение доломита с заданной скоростью. Продуктивное решение указанной задачи затруднительно, если нет достаточно простых, но физически адекватных макрокинетических моделей термического разложения доломита.

Таким образом, первоосновой для расчета аппаратуры очистки генераторных газов является достаточный уровень знания о реализации процесса в одиночной частице и ключевых факторах, влияющих на этот процесс. Изучение данных процессов, на наш взгляд, достаточно противоречиво. С одной стороны, в настоящее время достаточно широк фронт исследовательских работ, посвященных этой проблеме [5–16]. С другой стороны, авторы, излишне детализируя микро- и наноструктурные преобразования материала и эффекты, оставляют вне зоны своего внимания технологические аспекты процесса.

Так, в [6–8] затронуты вопросы относительно действительного механизма термопреобразования доломита. В [7] приведены результаты, свидетельствующие о топотактическом механизме реализации первичных структурных преобразований при термическом разложении кальцита, и показано, что сам процесс разложения может быть описан как реакция первого порядка.

Цель данной работы – определение значений кинетических параметров реакции термического разложения доломита в зависимости от размера (массы) исследуемого образца и температурного режима реализации процесса.

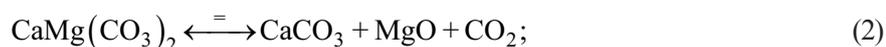
Методика исследования. Для экспериментального исследования процесса термического разложения использовались образцы природного белорусского доломита. Опыты проводились в статических условиях при температурах от 500 до 850 °С (с шагом 50 °С). Вне зависимости от выбранного температурного режима и массы навески образец доломита помещался в специальной кювете в лабораторную печь SNOL7,2/1300 (ОАО «Умега», Россия). Эта печь позволяет поддерживать постоянство температуры в интервале 500–1500 °С с точностью ± 2 °С. После достижения определенного периода времени кювета извлекалась из печи и взвешивалась на электронных весах Stohl с точностью ± 0,02 г.

В образце доломита в зависимости от температуры материала могут происходить последовательно и/или параллельно следующие химические реакции [14]:

при температуре от 311,2 °С



при температуре от 315,5 °С



при температуре от 331,9 °С



при температуре от 538,2 °С



при температуре от 845,8 °С



Согласно химическому уравнению (1) в области рассматриваемых в настоящем исследовании температур магнезит (MgCO_3) полностью распадается до оксида магния и диоксида углерода. Последнее позволяет сам процесс образования магнезита не рассматривать в контексте работы. Также можно допустить, что на брутто-реакцию термопреобразования образца практически не оказывает влияние образование оксида кальция (CaO), хотя теоретически оно возможно при температуре выше 846 °С.

Исходный доломит имеет кристаллическую атомарную структуру, которая нарушается после его термической обработки (рис. 1). Обработанный материал содержит сравнительно большее количество пор и мелких структур. Последнее обстоятельство косвенно указывает на то, что диффузия углекислого газа (CO_2) происходит в затрудненных условиях, а эвакуация газа из образца сопровождается разрушением структуры материала. Таким образом, построение адекватной физической модели продвижения и удаления CO_2 из частиц материала, очевидно, является необходимым для совершенствования методик расчета систем очистки генераторных газов.

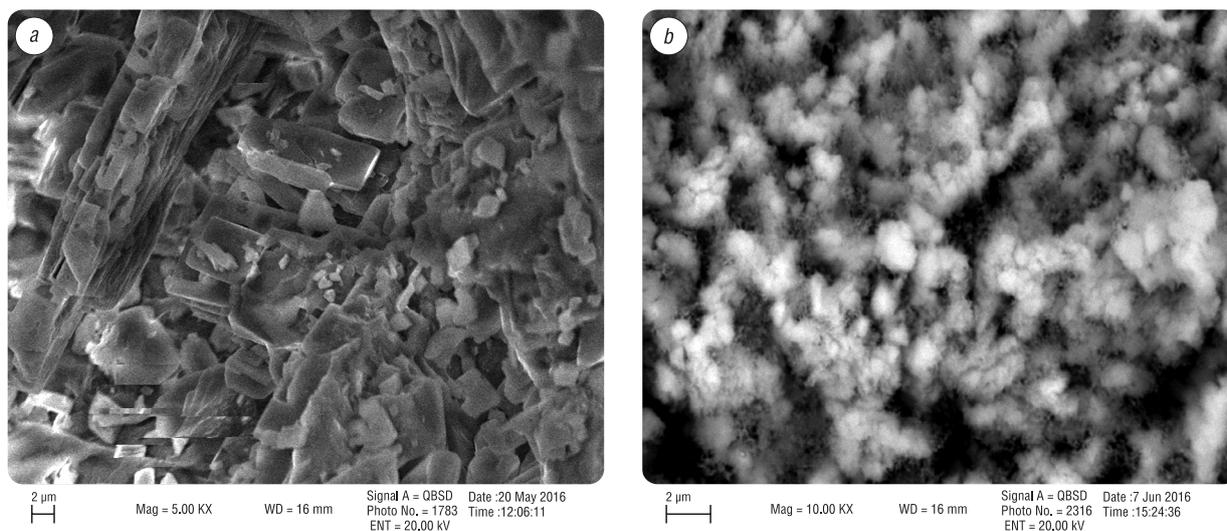


Рис. 1. Микрофотографии неотожженного (а) и отожденного (б) доломита

Fig. 1. Micrographs of unannealed (a) and annealed (b) dolomite

На рис. 2 представлены результаты экспериментальных термогравиметрических исследований по изучению динамики обжига частиц доломита разной массы при двух различных температурных режимах (в статических условиях при 650 и 850 °С). Погрешность измерения массы составляла 4 %.

Частицы с разной массой использовались и при проведении термогравиметрических опытов для других исследованных температурных режимов. В качественном отношении результаты этих экспериментов оказались хорошо согласованными. В частности, было определено, что при температуре до 500 °С химические процессы, определяющие брутто-реакцию разложения доломитов, происходят крайне медленно. В потерю массы частицами при этой температуре вносит вклад испарение гигроскопической воды в исходных образцах. При этом гигроскопичность

мелкой крошки ($m < 0,58$ г) необожженного доломита составляет от 5 до 7 %. Более крупная крошка ($m > 0,58$ г) имеет гигроскопичность от 0 до 3 %. Время выхода влаги из доломита – от 5 до 10 мин.

В случае использования более высоких температур (выше 600 °С) разложение доломита становится заметным, ускоряется с ростом температуры и уменьшением массы частиц, что подтверждается данными рис. 2. Зависимость степени разложения от массы образца указывает на существенное влияние процесса эвакуации молекул углекислого газа (CO₂) из объема образца.

Обсуждение полученного результата. Полученные экспериментальные данные были проанализированы на основе кинетических уравнений, применяемых при исследовании термического разложения доломита, а также других твердофазных процессов. Значение степени разложения определялось по выражению [12–15]

$$\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_\infty}, \quad (6)$$

где m_0 – масса исходного образца, г; m – масса образца в текущий момент времени, г; m_∞ – минимальное значение массы образца, достигаемое в эксперименте, г.

На предыдущих этапах исследования [17–18] было установлено, что наиболее точное описание кинетики термического разложения природных доломитов Беларуси дает уравнение

$$\alpha^n = k \cdot t, \quad (7)$$

где n – эмпирический параметр; k – константа скорости брутто-реакции, с⁻¹; t – время выдержки, с.

В логарифмической форме равенство (7) примет вид:

$$\ln(\alpha) = (\ln(k) + \ln(t))/n. \quad (8)$$

Данные, представленные на рис. 3, показывают зависимость $\ln(\alpha)$ от $\ln(t)$, построенную на основании эмпирических значений степени разложения, которые были установлены в опытах по термическому разложению образца природного доломита Беларуси при температуре 800 °С.

Из рис. 3 видно, что для рассматриваемых образцов характерны линейные зависимости $\ln(\alpha)$ от $\ln(t)$, что указывает на возможность использования уравнения (7) для описания механизма термической конверсии доломита.

Для получения адекватного уравнения, которое приводит к линейности функции $\ln(\alpha)$ от $\ln(t)$, использован метод наименьших квадратов. Такая линейная зависимость возможна только в случае коэффициента детерминации R^2 аппроксимации значений этой функции от $\ln(t)$ близкого 1. Данное обстоятельство было использовано при нахождении для каждого эксперимента конкретных параметров линейной зависимости $Y = f(x)$, где $Y = \ln(\alpha)$, $x = \ln(t)$. Полученные зависимости также представлены на рис. 3. В общем виде эти зависимости можно записать как

$$Y = (1/n) \cdot x + z. \quad (9)$$

Здесь $Y = \ln(\alpha)$, $x = \ln(t)$, $z = (1/n) \cdot \ln(k)$.

Зная величины параметров линейной аппроксимации (которые определяются методом наименьших квадратов по данным экспериментов) и используя выражение (9), можно найти значения параметра n и k для всех зависимостей, графики которых представлены на рис. 3:

$$k = \exp(z \cdot n).$$

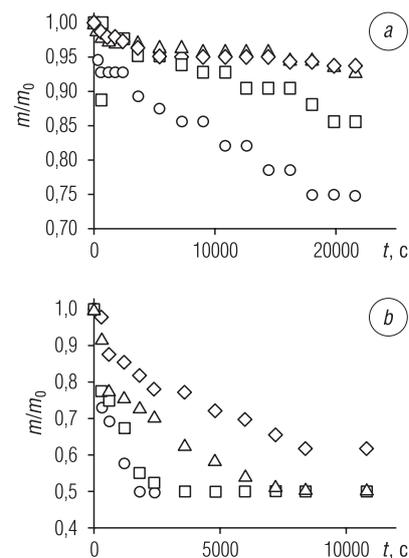


Рис. 2. Динамика изменения относительной массы частиц доломита при обжиге при температурах 650 °С (а) и 850 °С (б); \circ – масса исходного образца $m_0 = 0,58$ г, \square – масса исходного образца $m_0 = 0,88$ г, Δ – масса исходного образца $m_0 = 2,3$ г, \diamond – масса исходного образца $m_0 = 2,7$ г.

Fig. 2. Dynamics of change in the relative mass of dolomite particles during firing at temperatures of 650 °C (a) and 850 °C (b); \circ – mass of the initial sample $m_0 = 0.58$ g, \square – mass of the initial sample $m_0 = 0.88$ g, Δ – mass of the initial sample $m_0 = 2.3$ g, \diamond – mass of the initial sample $m_0 = 2.7$ g.

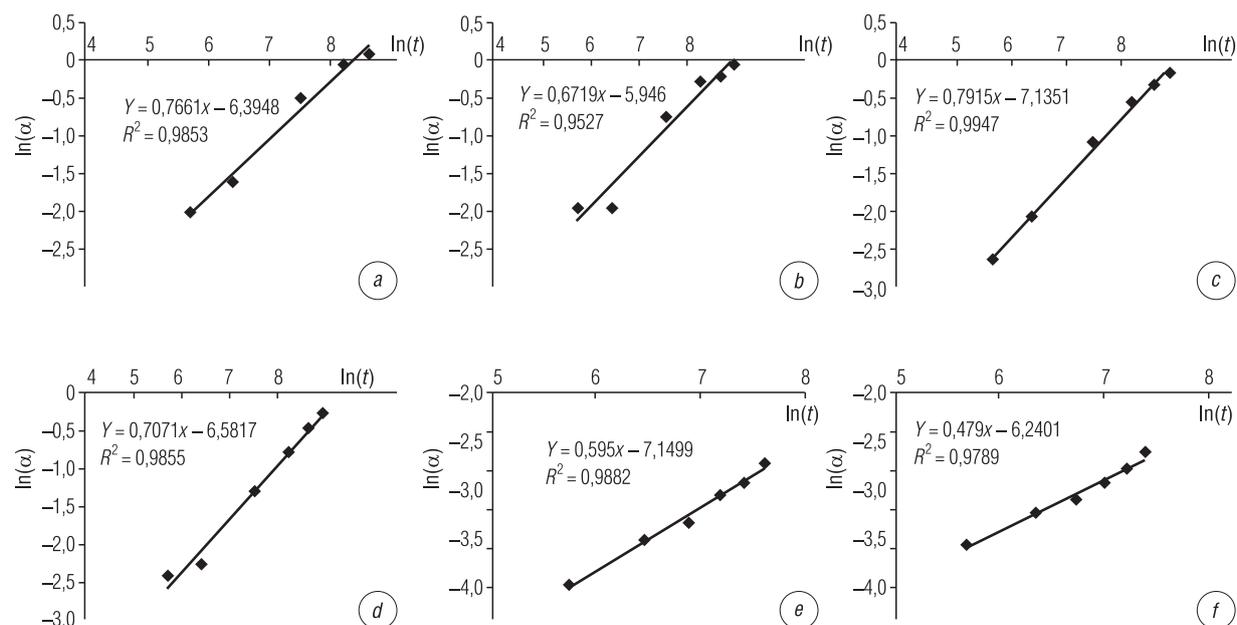


Рис. 3. Зависимость значения логарифма степени превращения α от логарифма времени тепловой обработки при 800 °С; маркеры – экспериментальные значения, линии – аппроксимация: *a* – масса исходного образца $m_0 = 0,58$ г; *b* – масса исходного образца $m_0 = 0,88$ г; *c* – масса исходного образца $m_0 = 2,3$ г; *d* – масса исходного образца $m_0 = 2,6$ г; *e* – масса исходного образца $m_0 = 7,6$ г; *f* – масса исходного образца $m_0 = 16,3$ г

Fig. 3. Dependence of the value of the logarithm of the degree of conversion α on the logarithm of the heat treatment time at 800 °С; markers – experimental values, lines – approximations: *a* – mass of the initial sample $m_0 = 0.58$ g; *b* – mass of the initial sample $m_0 = 0.88$ g; *c* – mass of the initial sample $m_0 = 2.3$ g; *d* – mass of the initial sample $m_0 = 2.6$ g; *e* – mass of the initial sample $m_0 = 7.6$ g; *f* – mass of the initial sample $m_0 = 16.3$ g

В ходе обработки полученных экспериментальных данных было определено, что эмпирический параметр n зависит от начальной массы m_0 (см. рис. 3), что объясняется влиянием диффузионных процессов на механизм термического разложения доломита. На рис. 4 приведен пример графика зависимости обратного параметра $1/n$ от начальной массы частицы доломита.

Показанная на графике зависимость описывается уравнением

$$1/n = -0,0174 \cdot m_0 + 0,7562. \quad (10)$$

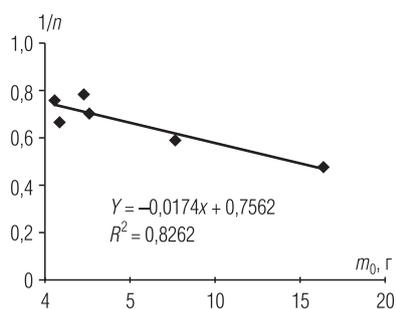


Рис. 4. Зависимость значения обратного параметра $1/n$ от начальной массы частицы доломита при 800 °С; маркеры – экспериментальные значения, линия – аппроксимация

Fig. 4. Dependence of the value of the inverse parameter $1/n$ on the initial mass of a dolomite particle at 800 °С; markers – experimental values, line – approximations

На основании экспериментальных зависимостей $\ln(\alpha)$ от $\ln(t)$ для всех рассматриваемых температур и начальных масс были определены значения параметров n и k , однако особое внимание авторами было уделено исследованию влияния массы частиц доломита на значение константы скорости реакции, так как данный параметр в большей степени характеризует темп протекания реакции, при этом значения константы скорости брутто-реакции определялись с помощью уравнения (8).

В таблице представлены значения констант скорости термического разложения частиц доломита различной массы, полученные при анализе результатов всех экспериментов (для различных температур и масс навесок) и использовании уравнения (8).

Из приведенных данных можно заключить, что для любой используемой температуры константа скорости существенно зависит от массы образца и для исследованного диапазона размеров отличается на один-два порядка.

Константы скорости термического разложения природного доломита
Rate constants of thermal decomposition of natural dolomite

$T, ^\circ\text{C}$	650	700	750	800	850
$m_0 = 0,58 \text{ г}$					
k, c^{-1}	$14,7 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$26,7 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$103,1 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$205,5 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$760,0 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$
$m_0 = 0,88 \text{ г}$					
k, c^{-1}	$7,2 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$36,5 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$37,9 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$143,5 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$313,6 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$
$m_0 = 2,3 \text{ г}$					
k, c^{-1}	$4,2 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$22,0 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$121,6 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$266,7 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$
$m_0 = 2,7 \text{ г}$					
k, c^{-1}	$2,5 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$23,6 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$90,7 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$272,9 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$
$m_0 = 7,6 \text{ г}$					
k, c^{-1}	$2,0 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$6,1 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$39,8 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$93,7 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$
$m_0 = 16,3 \text{ г}$					
k, c^{-1}	$0,6 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$17,7 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$	$74,9 \pm 0,1 \cdot 10^{-6}$

На рис. 5 представлены графики зависимости $\ln(k)$ от $\ln(1/m_0)$ (логарифма обратной величины начальной массы частицы) для некоторых температурных режимов обработки образцов.

Из рис. 5 видно, что в пределах рассматриваемых масс частиц зависимость $\ln(k)$ от $\ln(1/m)$ имеет линейный вид, а угол наклона графиков практически не зависит от температуры. В общем виде зависимость описывается выражением

$$\ln(k) = C \cdot \ln(1/m_0) + B, \tag{11}$$

где C – безразмерный эмпирический параметр, связанный с углом наклона и имеющий постоянное значение (определялся как среднее арифметическое для всех рассматриваемых образцов и составил 0,88); B – эмпирический параметр, не зависящий от массы образца.

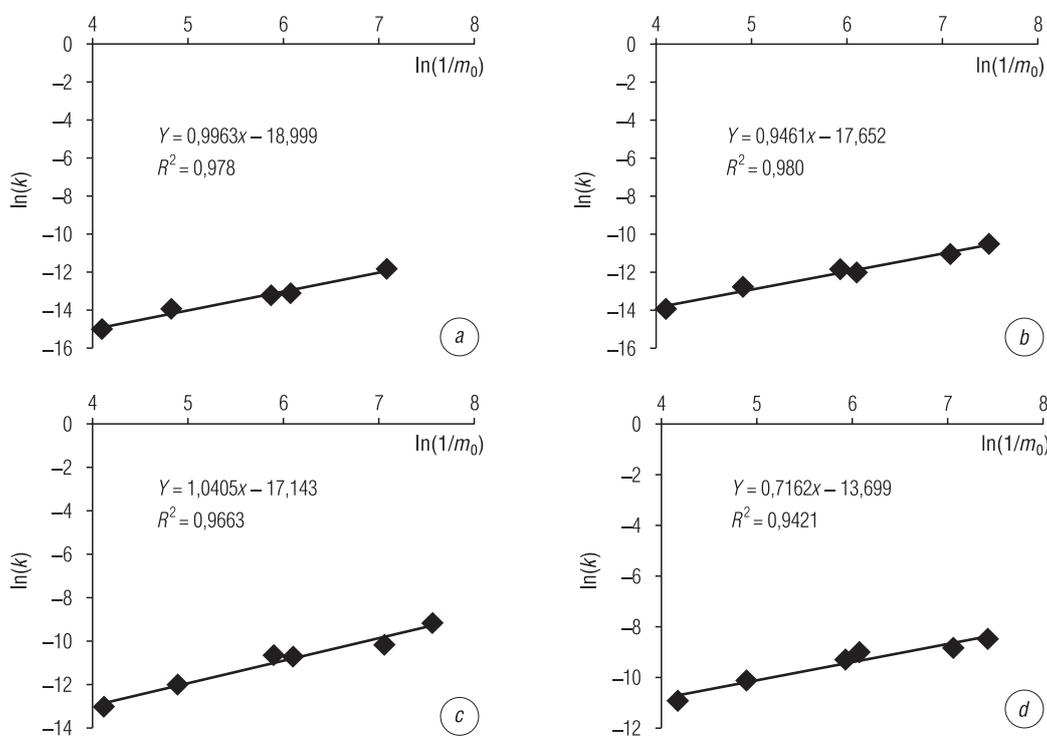


Рис. 5. Графики зависимости $\ln(k)$ от $\ln(1/m)$ для различных температур: a – 650 °C, b – 700 °C, c – 750 °C, d – 800 °C; маркеры – экспериментальные значения, линии – расчетные значения

Fig. 5. Plots of $\ln(k)$ versus $\ln(1/m)$ for various temperatures: a – 650 °C, b – 700 °C, c – 750 °C, d – 800 °C; markers – experimental values, lines – calculated values

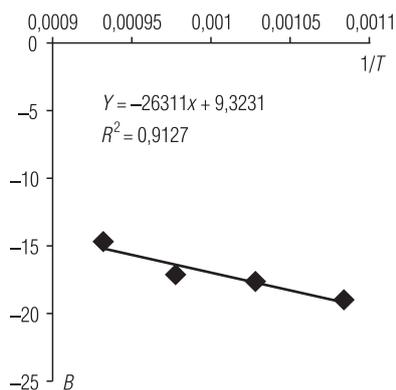


Рис. 6. График зависимости эмпирического параметра B от $1/T$
 Fig. 6. Graph of the dependence of the empirical parameter B on $1/T$

Параметр B обусловлен температурой процесса конверсии и может быть использован для определения энергии активации. На рис. 6 представлен график зависимости B от обратной величины температуры $1/T$.

Из рис. 6 видно, что зависимость B от $1/T$ имеет линейный вид, на что указывает близость коэффициента детерминации R^2 к 1. Подставляя выражение линейной аппроксимации в уравнение (11), получим:

$$\ln(k) = 0,88 \cdot \ln(1/m_0) + 9,3231 - 26311 \cdot (1/T),$$

$$k = (1/m_0)^{0,88} \cdot 11194 \cdot \exp(-26311/T), \text{ с}^{-1}, \quad (12)$$

$$k = (1/m_0)^{0,88} \cdot 671640 \cdot \exp(-26311/T), \text{ мин}^{-1}.$$

Исходя из (12) константа скорости может быть выражена в форме аррениусовского уравнения

$$k = f(m_0) \cdot A \cdot \exp(-E/R \cdot T), \quad (13)$$

где $f(m_0)$ – эмпирическая функция массы образца (для рассматриваемого процесса $f(m_0) = (1/m_0)^C$), A и E – соответственно предэкспоненциальный параметр и энергия активации процесса. Выше представлены кинетические параметры этого соотношения, что позволяет записать его в виде

$$k = (1/m_0)^C \cdot A \cdot \exp(-E/R \cdot T), \text{ мин}^{-1}, \quad (14)$$

где $A = 671\,600 \pm 50 \text{ мин}^{-1}$, $E = 218\,700 \pm 50 \text{ Дж/моль}$, $C = 0,88$.

На рис. 7 представлены графики зависимости константы скорости от массы для различных температур.

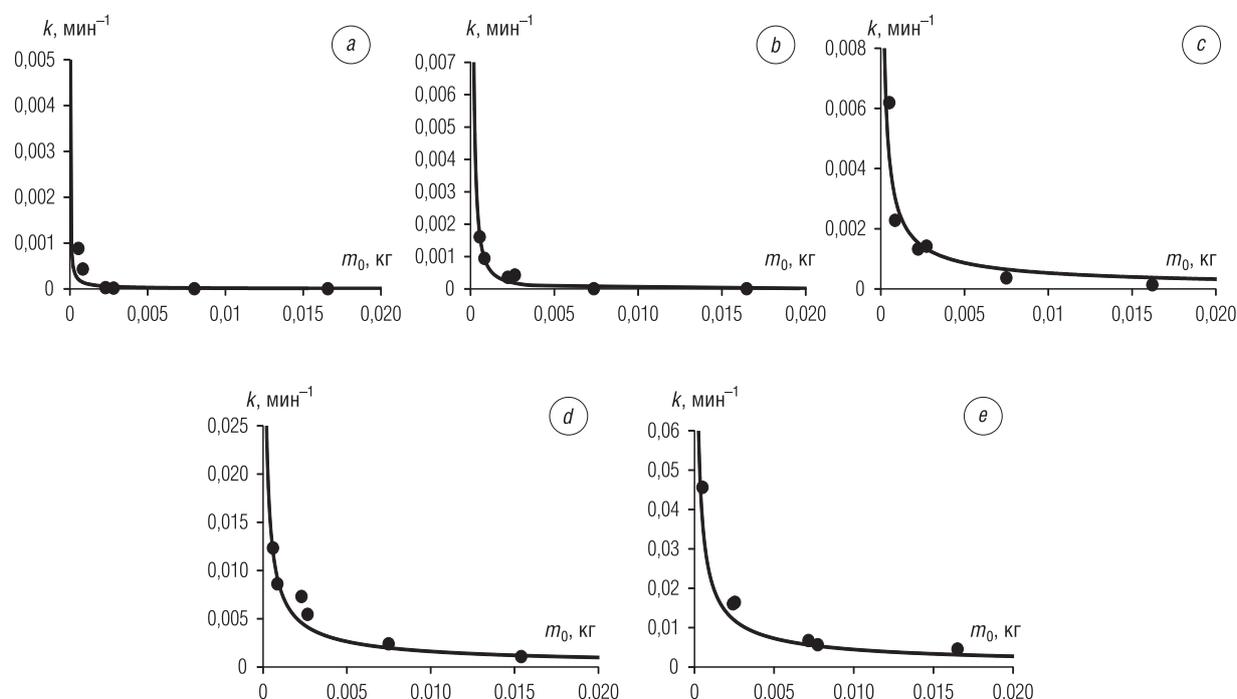


Рис. 7. Графики зависимости константы скорости термического разложения доломита от массы для различных температур: $a - 650 \text{ }^\circ\text{C}$, $b - 700 \text{ }^\circ\text{C}$, $c - 750 \text{ }^\circ\text{C}$, $d - 800 \text{ }^\circ\text{C}$, $e - 850 \text{ }^\circ\text{C}$; маркеры – экспериментальные значения, линии – расчетные значения

Fig. 7. Plots of the dependence of the rate constant of thermal decomposition of dolomite on the mass for different temperatures: $a - 650 \text{ }^\circ\text{C}$, $b - 700 \text{ }^\circ\text{C}$, $c - 750 \text{ }^\circ\text{C}$, $d - 800 \text{ }^\circ\text{C}$, $e - 850 \text{ }^\circ\text{C}$; markers – experimental values, lines – calculated values

Из рис. 7 видно, что расчетные значения константы скорости достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментов для всех рассматриваемых масс частиц и температурных режимов обработки материала, что указывает на целесообразность использования выражений (13) и (14) при расчете константы скорости термического разложения доломита.

Выводы. Результаты анализа экспериментального исследования термического разложения природного доломита, выполненного в условиях на лабораторном оборудовании при постоянных температурах 650 °С, 700, 750, 800 и 850 °С, показали, что константа скорости термического разложения доломита в исследуемом диапазоне масс образцов может быть определена по эмпирическому выражению, идентифицированному в ходе настоящего исследования:

$$k = (1/m_0)^C \cdot A \cdot \exp(-E/R \cdot T), \text{ мин}^{-1}$$

где m_0 – начальная масса исследуемого образца доломита, кг; C – эмпирический параметр ($C = 0,88$), A – предэкспоненциальный параметр реакции термического разложения доломита ($A = 671600 \pm 50 \text{ мин}^{-1}$), E – энергия активации ($E = 218700 \pm 50 \text{ Дж/моль}$).

Следует отметить, что полученные в данном исследовании результаты (прежде всего зависимость кинетических параметров брутто-реакции от размера исходной частицы) имеют практическое значение, поскольку могут быть включены в различные методы расчета сорбционно-каталитических системы газоочистки на основе доломита, повышающие достоверность описания процесса и качество прогнозирования его параметров.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т22КИ-003).

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (grant no. T22KI-003).

Список использованных источников

1. Фортов, В.Е. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России / В.Е. Фортов, О.С. Попель // Теплоэнергетика. – 2014. – № 6. – С. 4–13. <http://dx.doi.org/10.1134/S0040363614060022>
2. Coal and Biomass Gasification. Recent Advances and Future Challenges / S. De [et al.]. – Springer Nature, 2018. – 521 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7335-9>
3. Афанасьева, О.В. Эксергетическая эффективность угольных малых теплоэлектростанций как критерий перспективности их широкого использования / О.В. Афанасьева, Г.Р. Мингалеева // Химия твердого топлива. – 2009. – № 1. – С. 64–69.
4. Steam Gasification of Apricot Stones with Olivine and Dolomite as Downstream Catalysts / G. Hu [et al.] // Fuel Processing Technology. – 2006. – Vol. 87, № 5. – P. 375–382. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.07.008>
5. Доброго, К.В. Макрокинетические модели термического разложения доломита для расчета сорбционных систем газогенераторов / К.В. Доброго // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2015. – № 5. – С. 51–59.
6. Термическое разложение природного доломита / А.И. Ратько [и др.] // Неорганические материалы. – 2011. – Т. 47, № 12. – С. 1502–1507.
7. Thermal Decomposition of Calcite: Mechanisms of Formation and Textural Evolution of CaO Nanocrystals / C. Rodriguez-Navarro [et al.] // Am. Mineralogist. – 2009. – Vol. 94, № 4. – P. 578–593. <http://dx.doi.org/10.2138/am.2009.3021>
8. Rodriguez-Navarro, C. The mechanism of thermal decomposition of dolomite: New insights from 2D-XRD and TEM analyses / C. Rodriguez-Navarro, K. Kudlacz, E. Ruiz-Agudo // Am. Mineralogist. – 2012. – Vol. 97, № 1. – P. 38–51. <https://doi.org/10.2138/am.2011.3813>
9. Effect of compaction on the kinetics of thermal decomposition of dolomite under non-isothermal condition / S. Maitra [et al.] // J. Mater. Sci. – 2005. – Vol. 40. – P. 4749–4751. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-0843-0>
10. Gunasekaran, S. Thermal decomposition of natural dolomite / S. Gunasekaran, G. Anbalagan // Bull. Mater. Sci. – 2007. – Vol. 30. – P. 339–344. <https://doi.org/10.1007/s12034-007-0056-z>
11. Beruto, D.T. Solid Products and rate-limiting step in the thermal half decomposition of natural dolomite in a CO₂ (g) atmosphere / D.T. Beruto, R. Vecchiattini, M. Giordani // Thermochim. Acta. – 2003. – Vol. 405. – P. 183–194. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(03\)00190-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(03)00190-4)
12. Olszak-Humienik, M. Kinetics of thermal decomposition of dolomite / M. Olszak-Humienik, J. Mozejko // J. Therm. Anal. Calorim. – 1999. – Vol. 56, iss. 2. – P. 829–833. <https://doi.org/10.1023/A%3A1010174726982>
13. Samtani, M. Comparison of dolomite decomposition kinetics with related carbonates and the effect of procedural variables on its kinetic parameters / M. Samtani, D. Dollimore, K. Alexander // Thermochim. Acta. – 2002. – Vol. 392–393. – P. 135–145. [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6031\(02\)00094-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6031(02)00094-1)

14. Olszak-Humienik, M. Thermal behavior of natural dolomite / M. Olszak-Humienik, M. Jablonski // *J. Therm. Anal. Calorim.* – 2015. – Vol. 119. – P. 2239–2248. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-4301-6>
15. Predicting the rate of thermal decomposition of dolomite / M. Hartman [et al.] // *Chem. Eng. Sci.* – 1996. – Vol. 51, № 23. – P. 5229–5232. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(96\)00363-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(96)00363-6)
16. Characterization of monumental carbonate stones by thermal analysis (TG, DTG and DSC) / L.M. Barcina [et al.] // *Thermochim. Acta.* – 1997. – Vol. 290. – P. 181–189. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(96\)03074-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(96)03074-2)
17. Экспериментальное исследование кинетики термического разложения Белорусских доломитов / М. В. Малько [и др.] // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2015. – № 1. – С. 95–101.
18. Исследование кинетики и механизма термического разложения природных доломитов Беларуси / М. В. Малько [и др.] // *Тезисы докладов и сообщений XV Минского международного форума по тепло- и массообмену. Минск, 23–26 мая 2016 г. / Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси.* – Минск, 2016. – С. 125–128.

References

1. Fortov V. E., Popel' O. S. The current status of the development of renewable energy sources worldwide and in Russia. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 6, pp. 389–398. <http://dx.doi.org/10.1134/S0040601514060020>
2. De S., Agarwal A. K., Moholkar V. S., Bhaskar T. *Coal and Biomass Gasification. Recent Advances and Future Challenges*. Springer Nature, Singapore Pte Ltd., 2018. 521 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7335-9>
3. Afanas'eva O. V., Mingaleeva G. R. Energy Efficiency of Small Coal-Fired Power Plants as a Criterion of Their Wide Applicability. *Solid Fuel Chemistry*, 2009, vol. 43, no. 1, pp. 55–59. <https://doi.org/10.3103/S0361521909010121>
4. Hu G., Xu S., Li S., Xiao C., Liu S. Steam Gasification of Apricot Stones with Olivine and Dolomite as Downstream Catalysts. *Fuel Processing Technology*, 2006, vol. 87, no. 5, p. 375–382. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.07.008>
5. Dobrego K. V. Dolomite Thermal-Decomposition Macrokinetic Models for Evaluation of the Gasgenerators Sorbent Systems. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 2015, no. 5, pp. 51–59 (in Russian).
6. Rat'ko A. I., Ivanets A. I., Kulak A. I., Morozov E. A., Sakhar I. O. Thermal decomposition of natural dolomite. *Inorganic Materials*, 2011, vol. 47, no. 12, pp. 1372–1377. <https://doi.org/10.1134/S0020168511120156>
7. Rodriguez-Navarro C., Ruiz-Agudo E., Luque A., Rodriguez-Navarro A. B., Ortega-Huertas M. Thermal Decomposition of Calcite: Mechanisms of Formation and Textural Evolution of CaO Nanocrystals. *American Mineralogist*, 2009, vol. 94, no. 4, pp. 578–593. <http://dx.doi.org/10.2138/am.2009.3021>
8. Rodriguez-Navarro C., Kudlacz K., Ruiz-Agudo E. The mechanism of thermal decomposition of dolomite: New insights from 2D-XRD and TEM analyses. *American Mineralogist*, 2012, vol. 97, no. 1, pp. 38–51. <https://doi.org/10.2138/am.2011.3813>
9. Maitra S., Chowdhury A., Das H., Pramanik Ms. Effect of compaction on the kinetics of thermal decomposition of dolomite under non-isothermal condition. *Journal of Materials Science*, 2005, vol. 40, pp. 4749–4751. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-0843-0>
10. Gunasekaran S., Anbalagan G. Thermal decomposition of natural dolomite. *Bulletin of Materials Science*, 2007, vol. 30, pp. 339–344. <https://doi.org/10.1007/s12034-007-0056-z>
11. Beruto D. T., Vecchiattini R., Giordani M. Solid Products and rate-limiting step in the thermal half decomposition of natural dolomite in a CO₂ (g) atmosphere. *Thermochimica Acta*, 2003, vol. 405, pp. 183–194. [https://doi.org/10.1016/s0040-6031\(03\)00190-4](https://doi.org/10.1016/s0040-6031(03)00190-4)
12. Olszak-Humienik M., Mozejko J. Kinetics of thermal decomposition of dolomite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1999, vol. 56, iss. 2, pp. 829–833. <https://doi.org/10.1023/A%3A1010174726982>
13. Samtani M., Dollimore D., Alexander K. Comparison of dolomite decomposition kinetics with related carbonates and the effect of procedural variables on its kinetic parameters. *Thermochimica Acta*, 2002, vol. 392–393, pp. 135–145. [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6031\(02\)00094-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6031(02)00094-1)
14. Olszak-Humienik M., Jablonski M. Thermal behavior of natural dolomite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2015, vol. 119, pp. 2239–2248. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-4301-6>
15. Hartman M., Trnka O., Vesely V., Svoboda K. Predicting the rate of thermal decomposition of dolomite. *Chemical Engineering Science*, 1996, vol. 51, no. 23, pp. 5229–5232. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(96\)00363-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(96)00363-6)
16. Barcina L. M., Espina A., Suárez M., García J. R., Rodríguez J. Characterization of monumental carbonate stones by thermal analysis (TG, DTG and DSC). *Thermochimica Acta*, 1997, vol. 290, pp. 181–189. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(96\)03074-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(96)03074-2)
17. Malko M. V., Vasilevich S. V., Degterov D. V., Bogach V. N. Experimental study of the kinetics of thermal decomposition of Belarusian dolomites. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2015, no. 1, pp. 95–101 (in Russian).
18. Malko M. V., Vasilevich S. V., Asadchii A. N. et al. Investigation of kinetics and mechanism of thermal decomposition of natural dolomites of Belarus. *Tezisy dokladov i soobshchenii XV Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplo- i massoobmenu. Minsk, 23–26 maya 2016 g.* [Abstracts of Reports and Reports of the XV Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer. Minsk, May 23–26, 2016]. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National academy of Sciences of Belarus, 2016, pp. 125–128 (in Russian).

Информация об авторах

Василевич Сергей Владимирович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Белорусская государственная академия авиации (ул. Уборевича, 77, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: svasilevich@yandex.ru

Малько Михаил Владимирович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mikhailvm@bas-net.by

Дегтерев Дмитрий Валентинович – старший научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ddegterov@mail.ru

Асадчий Андрей Николаевич – научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: asadchyi@tut.by

Information about the authors

Siarhei V. Vasilevich – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory, Belarusian State Aviation Academy (77, Uborevich Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svasilevich@yandex.ru

Mikhail V. Malko – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, building 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mikhailvm@bas-net.by

Dmitry V. Degterov – Senior Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, building 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ddegterov@mail.ru

Andrei N. Asadchyi – Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, building 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: asadchyi@tut.by