

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ДОЛОМИТА В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

А.В. Митрофанов, В.Е. Мизонов, С.В. Василевич, М.В. Малько

Андрей Васильевич Митрофанов*, Вадим Евгеньевич Мизонов

Кафедра прикладной математики, Ивановский государственный энергетический университет,
ул. Рабфаковская, 34, Иваново, Российская Федерация, 153003
E-mail: and2mit@mail.ru*, mizonov46@mail.ru

Сергей Владимирович Василевич, Михаил Владимирович Малько

Институт энергетики НАН Беларуси, ул. Академическая, 15, корп. 2, Минск, Республика Беларусь,
220072
E-mail: svasilevich@yandex.ru

Целью предлагаемой работы является совершенствование описания гидродинамики, тепло- и массопереноса при термическом разложении частиц доломита в кипящем слое. Термическое разложение образцов доломита массой 0,5-1,4 г было выполнено в лабораторной печи. Константы скорости диссоциации отдельно для кальциевой и магниевой составляющих были установлены в форме аррениусовских уравнений. Модель кипящего слоя была дополнена полученными кинетическими зависимостями. Сама модель построена на основе теории цепей Маркова и позволяет описывать тепло- и массоперенос в кипящем слое. Она содержит две параллельные цепи ячеек: одна для частиц доломита, другая для окисляющего газа. Сходственные ячейки цепей могут обмениваться теплотой и массой, а продольное перемещение сред описывается матрицами переходных вероятностей. В ячейках для частиц содержатся источники теплоты, вызванной протеканием реакций. Переходные матрицы поставлены в соответствие с физическими параметрами протекания процессов, что делает предлагаемую модель нелинейной. При описании витания, прогрева и диссоциации одиночной частицы было получено хорошее соответствие с экспериментальными данными. Было выполнено расчетное исследование термической переработки навески доломита массой 350 г в кипящем слое. Одной из главных особенностей процесса, влияющих на гидродинамику слоя, является его расширение с течением времени. Это происходит из-за снижения скорости витания частиц доломита в течение их термической обработки. Расчетные результаты показали пространственную и временную неоднородность скорости диссоциации. Предложенная математическая модель может быть рассмотрена как достоверная научная основа для операционного контроля и проектирования установок кипящего слоя.

Ключевые слова: псевдоожигание, доломит, диссоциация, кинетика реакции, цепь Маркова, вектор состояния, матрица переходных вероятностей

EXPERIMENT-CALCULATING STUDY OF THERMAL DECOMPOSITION OF NATURAL DOLOMITES IN FLUIDIZED BED

A.V. Mitrofanov, V.E. Mizonov, S.V. Vasilevich, M.V. Malko

Andrey V. Mitrofanov*, Vadim E. Mizonov

Department of Applied Mathematics, Ivanovo State Power Engineering University, Rabfakovskaya st., 34, Ivanovo, 153003, Russia

E-mail: and2mit@mail.ru*, mizonov46@mail.ru

Sergey V. Vasilevich, Mikhail V. Malko

Institute of Power Engineering of the NAS of Belarus, 15, b. 2, Academicheskaya str., Minsk, 220072, Belarus

E-mail: svasilevich@yandex.ru

The aim of the present investigation is to develop a model to describe the hydrodynamics, heat and mass transfers during thermal decomposition of dolomite particles in a fluidized bed. The decomposition of dolomite samples with mass from the range of 0.5-1.4 g under heat treatment has been studied in a laboratory furnace. The dissociation rate constants for magnesium and calcium components of dolomite have been determined in form of the Arrhenius equation. The obtained kinetic equations have been used in the model of fluidized bed. The model is based on the Markov chain approach and allows simulating the heat and mass transfers in fluidized bed. It contains two parallel chains of cells: one for the dolomite particles and another one for the fluidizing gas. The homologous cells of the chains can exchange heat and mass while the longitudinal media is described by the matrices of transition probabilities. The cells for particles contain heat sources caused by the ongoing reactions. The transition matrices are associated with current physical properties of substances involved that makes the proposed model non-linear. A good agreement with the experimental data has been achieved in simulating of gas supplying, heating and decomposition of an individual particle. The modeling of the heat treatment of dolomite particles with mass 350 g under the action of fluidization was performed. One of the main features of the process influencing the bed hydrodynamics is the bed expansion with time. It occurs due to the dolomite particles settling velocity decrease during their thermal treatment. The calculating results have shown space and time non-homogeneity of the dissociation rate. The proposed mathematical model can be used as the scientific basis for operating control and design of fluidized bed reactors.

Key words: fluidization, dolomite, dissociation, reaction kinetics, Markov's chain, state vector, transition probabilities matrix

Для цитирования:

Митрофанов А.В., Мизонов В.Е., Василевич С.В., Малько М.В. Расчетно-экспериментальное исследование термического разложения природного доломита в кипящем слое. *Иzv. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 61. Вып. 3. С. 93–99

For citation:

Mitrofanov A.V., Mizonov V.E., Vasilevich S.V., Malko M.V. Experiment-calculating study of thermal decomposition of natural dolomites in fluidized bed. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 3. P. 93–99

ВВЕДЕНИЕ

Доломит является природным ископаемым сырьем для цементной, химической и смежных отраслей промышленности. В последние десятилетия его использование в сорбционных системах очистки продуктов энергохимической переработки дисперсного топлива обуславливает устойчивый интерес к изучению кинетики термического разложе-

ния доломита и со стороны инженеров и ученых энергетической отрасли. Процесс термического разложения доломита стал объектом исследования в широком ряду научных проектов [1-8].

Необходимо отметить, что действительный механизм термопреобразования доломита оказался достаточно сложным, и даже относительно упрощенной модели его термического разложения нет окончательного консенсуса, что позволяет иссле-

дователям использовать различные модели протекания реакции [2-4], а также придает актуальность дальнейшей работе, все более детализирующей происходящие в ходе реакции микро- и наноструктурные преобразования и эффекты.

Так, в работе коллектива ученых из университета Гренады был показан топотактический механизм первичных структурных преобразований при термическом разложении кальцита, при этом сам процесс разложения протекал по реакции первого порядка [5]. Топотактический механизм протекания реакции термического разложения доломита был показан в исследовании [6]. При этом сначала происходило формирование гранецентрированного кубического смешанного оксида $\text{Ca}_{0,5}\text{Mg}_{0,5}\text{O}$, который в дальнейшем разделялся на ориентированные кристаллы CaO и MgO [6]. Оба исследования были выполнены с привлечением электронной микроскопии и рентгеновской дифрактометрии. В то же время авторы [5-6] расходятся во мнении на влияние накопления CO_2 внутри частиц, подвергающихся тепловой обработке. Авторы [6] делают вывод, что давление CO_2 практически не влияет на протекание целевых реакций, в то же время в работах [5] указывается на необходимость учета этого эффекта как с точки зрения увеличения массы образцов (влияния на результаты термогравиметрического анализа), так и с точки зрения химического равновесия реакции разложения. Указанная необходимость индуцирует разработку и обсуждения моделей накопления и эвакуации CO_2 из разлагаемых частиц [5,8].

Даже поверхностный обзор работ отчетливо показывает, что детальное изучение процесса, несмотря на научную актуальность, практически не продвигает инженерные методы расчета, необходимость разработки которых подчеркивается в ряде исследований [8-9]. Во-первых, внимание исследователей часто направлено не на функционирование системы в целом, а на протекание некоторых процессов в ней и, соответственно, на получение достаточно частных решений (например, обсуждение и анализ моделей эвакуации CO_2 [5,8]). Во-вторых, следует иметь в виду, что условия протекания целевого процесса в технологическом аппарате могут значительно отличаться от таковых в лабораторных условиях, что влечет за собой переоценку значимости факторов, влияющих на процесс [8-11]. Очевидно, что для создания инженерной модели необходим некоторый синтез получаемых частных решений и их интеграция на единой программно-алгоритмической основе. В то же время,

излишняя детализация, громоздкость вычислительных процедур или перегруженность эмпирическими параметрами также может лимитировать использование модели процесса в инженерной практике

Таким образом, цель настоящей работы – разработка простой, но информативной модели мезомасштабного уровня, учитывающей основные физико-химические и теплофизические факторы протекания процесса, для описания термического преобразования доломита, – является, на наш взгляд, актуальной.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ДОЛОМИТА

Экспериментальное исследование термического разложения образцов природного белорусского доломита в воздушной среде при атмосферном давлении было выполнено в лабораторной печи SNOL 7,2/1300 (ОАО «Умега»). Эта печь позволяет проводить процесс в статических условиях, поддерживая постоянство температуры в интервале 773-1773 К с точностью ± 2 К.

В печь помещались кювета с небольшой навеской частиц доломита, в процессе эксперимента кювета периодически извлекалась для взвешивания на электронных весах (Stohl). По полученным данным была рассчитана динамика изменения относительной массы частиц доломита при различных температурах, которая проиллюстрирована на рис. 1.

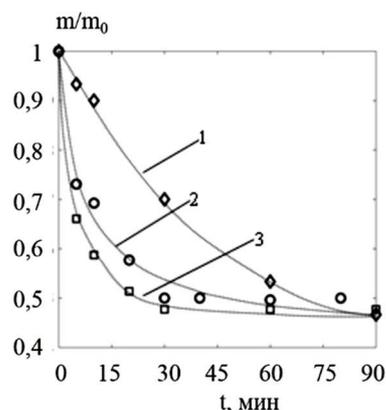


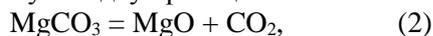
Рис. 1. Динамика изменения относительной массы частиц доломита ($m_0=0,55$ г) при различных температурах в печи, °C: 1 – 800, 2 – 850, 3 – 900

Fig.1. Dynamics of the relative mass change of dolomite particles ($m_0=0,55$ g) at different temperature in the furnace, °C: 1 – 800, 2 – 850, 3 – 900

Суммарное уравнение, соответствующее этой упрощенной схеме механизма термического разложения доломита, имеет вид [2]:



При анализе экспериментальных данных суммарная реакция разложения доломита была представлена как сумма двух реакций



Статистическая обработка данных позволила получить аррениусовские уравнения, определяющие значения констант скоростей реакций (2)-(3) в исследованном интервале температур [2,7]. Полученная зависимость для констант скорости реакции (2):

$$k_1 = 48,5 \cdot 10^4 \cdot \exp\left(-\frac{142700}{RT}\right), \text{ c}^{-1}, \quad (4)$$

а для реакции (3):

$$k_2 = 105 \cdot 10^4 \cdot \exp\left(-\frac{203000}{RT}\right), \text{ c}^{-1}. \quad (5)$$

ЯЧЕЕЧНАЯ МОДЕЛЬ ОБЖИГА ЧАСТИЦ ДОЛОМИТА В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Сформулированные выше требования к готовым инженерным моделям процесса обусловили выбор ячеечной методологии в качестве объединяющей основы для моделирования. Ячейка – это минимальный трехмерный мезообъем с идеальным смешением свойств внутри, на который разбита система. Для описания эволюции состояния системы ячеек могут быть задействованы различные математические подходы [11-13]. В настоящей работе использован математический аппарат теории цепей Маркова, хорошо зарекомендовавший себя при описании широкого спектра процессов с дисперсными средами [13-15].

Реактор представлен как совокупность из n ячеек малого, но конечного размера, а эволюция векторов состояний наблюдается в дискретные моменты времени $t_k = (k-1)\Delta t$, где Δt – продолжительность временного перехода, а k – номер временного перехода (целочисленный аналог времени).

Продольные миграции частиц и продвижение воздуха вдоль цепей описываются рекуррентными матричными равенствами

$$S_p^k + 1 = P_p^k (S_p^k - \Delta S_p^k), \quad (6)$$

$$S_g^k + 1 = P_g^k S_g^k + S_g^f, \quad (7)$$

где S_p и S_g – векторы-столбцы объемного содержания частиц и газа в ячейках, P_p^k и P_g^k – матрицы переходных вероятностей для частиц и газа, зависящие от векторов состояния и меняющиеся на каждом переходе, ΔS_p – убыли объема твердой фазы за счет эвакуации CO_2 из реагирующих частиц, вектор S_g^f – вектор подачи газа (при подаче через решетку он имеет единственный ненулевой элемент в первой ячейке, равный объему газа, подаваемому в нее за один переход).

Элемент на главной диагонали переходной матрицы представляет собой вероятность p_{si} остаться в текущей i -ой ячейке, элемент, расположенный под главной диагональю – вероятность p_{ui} перехода вперед, над главной диагональю – вероятность p_{di} перехода назад.

Рекуррентные матричные равенства (6)-(7) описывают миграцию частиц и продвижение оживающего агента вдоль цепей, а также и всех аддитивных свойств (теплоты, влаги и т.д.), связанных с этим перемещением. Таким образом, модель включает в себя несколько параллельных цепей, между сходственными ячейками которых возможен обмен некоторыми потоками (например, для описания межфазного теплообмена при оживлении частиц потоком жидкости: одна цепь описывает миграции частиц, другая – продвижение оживающего агента вдоль соответствующей цепи, между сходственными ячейками цепей происходит передача теплоты). Детальное описание тепло- и массопереноса, а также и процедура идентификации параметров модели описаны в наших предыдущих работах [13-15].

В работах [13-15] использовались материалы с высоким начальным влагосодержанием, соответственно в процессе тепловой обработки в широком диапазоне изменялись массогабаритные свойства частиц за счет удаления влаги и усадки частиц, что в свою очередь сопровождалось изменением характера псевдоожижения. Изменение аэродинамической крупности частиц выражалось через коэффициент сопротивления одиночной частицы, значение которого рассчитывалось как [15]:

$$C_d(\text{Re}_p, \text{Ar}) = \frac{24}{\text{Re}_p} + \frac{\text{Ar}}{\text{Re}_p^{1,96}}, \quad (8)$$

где Re_p – число Рейнольдса, рассчитываемое с учетом концентрации частиц в ячейке [13,15], Ar – число Архимеда для частиц.

В i -й ячейке скорость витания одиночной частицы V_{si} связана с ее весом через соотношение:

$$P = C_d \cdot f_p \cdot \rho_g \frac{V_{si}^2}{2}, \quad (9)$$

где f_p – площадь поверхности одиночной частицы; ρ_g – плотность оживающего газа.

Переходные вероятности p_{si} , p_{ui} и p_{di} , составляющие переходную матрицу P_p , связаны с параметрами процесса и крупностью фракции следующими зависимостями [13-15]:

$$p_{si} = 1 - p_{ui} - p_{di}, \quad (10)$$

$$p_{di} = 0 \text{ при } (w_i - V_{si}) > 0, \quad (11)$$

$$p_{di} = v_i \text{ при } (w_i - V_{si}) < 0, \quad (12)$$

$$p_{ui} = v_i \text{ при } (w_i - V_{si}) > 0, \quad (13)$$

$$p_{ui} = 0 \text{ при } (w_i - V_{si}) < 0, \quad (14)$$

где w_i – локальная скорость обтекания частиц ожигающим газом в i -й ячейке.

Таким образом, рассчитанная на каждом рекуррентном шаге по соотношениям (8)-(9) скорость витания частицы позволяет корректировать переходную матрицу, что делает предлагаемую модель нелинейной.

В настоящей работе скорость витания частиц изменяется по большей части в результате изменения плотности материала в ходе протекания реакции (содержание влаги в частицах незначительно – порядка 5% по массе [2], а изменением размера на данном этапе работы пренебрегаем). При использовании последнего допущения для $k=2, n$ текущее значение плотности ρ (принимается равным $(M_w^k + \rho_p S_p^k) / S_p^k$ при $k = 1$) рассчитывается как

$$\rho^k = (M_w^k + \rho_p S_p^k) / S_p^{k-1}, \quad (15)$$

где M_w^k – вектор масс влаги, связанной с частицами, рассчитываемый на каждом шаге с учетом процесса массоотдачи (сушки) по алгоритму, рассмотренному в [13-15], $\rho_p = 2872 \text{ кг/м}^3$ [9] – плотность доломита.

Протекание реакции допускается до полного удаления CO_2 , теоретическая степень разложения доломита для вычислительных экспериментов была принята равной 0,47, то есть потеря массы навески не может превышать 47% ($\sum(S_p^k) > \sum(0,47 \cdot S_p^k)$). Изменение объема твердой фазы в i -ой ячейке $\Delta S_p(i)$ за счет термического разложения доломита рассчитывается для каждого рекуррентного шага как

$$\Delta S_p^k(i) = \Delta t \cdot k_1 \cdot S_p^k(i) \text{ при } 350 \leq T_p^k(i) \leq 700, \quad (16)$$

$$\Delta S_p^k(i) = \Delta t \cdot (k_1 + k_2) S_p^k(i) \text{ при } T_p(i) > 700, \quad (17)$$

где $T_p^k(i)$ – температура твердой фазы в i -й ячейке, рассчитываемая для k -го шага по схеме, предложенной [13-15], но с учетом эндотермического характера реакции: вектор теплоты частиц на каждом шаге корректируется на величину $\Delta Q_p^k(i) = -\Delta t \cdot \rho_p (k_1 \cdot (Q_{\text{CaCO}_3} / M_{\text{CaCO}_3}) + k_2 \cdot \Delta S_p^k(i) \cdot (Q_{\text{MgCO}_3} / M_{\text{MgCO}_3}))$, здесь M_{CaCO_3} и M_{MgCO_3} , Q_{MgCO_3} и Q_{CaCO_3} – молярные массы и удельные затраты теплоты на диссоциацию соответствующих карбонатов ($Q_{\text{CaCO}_3} = 157 \text{ кДж/моль}$; $Q_{\text{MgCO}_3} = 102 \text{ кДж/моль}$) [2,4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для имитации термической обработки образцов доломита в лабораторной печи предложенная расчетная схема была упрощена: реактор был представлен как одна ячейка идеального смешения, в которую подается разогретый до $900 \text{ }^\circ\text{C}$ воздух. В качестве ячейки был выбран цилиндр, диаметр и высота которого равны $0,06 \text{ м}$. С точки зре-

ния функционирования модели такая ячейка рассматривается как цилиндрический реактор кипящего слоя конечного, но малого размера. Поступление воздуха с температурой $900 \text{ }^\circ\text{C}$ через основание цилиндра происходит с расходной скорости воздуха $1,5 \text{ м/с}$, что обеспечивает за временной интервал Δt обновление примерно половины воздуха в рассматриваемом объеме ($\Delta t = 0,02 \text{ с}$).

Размер ячейки был выбран меньше размера лабораторной печи, чтобы, с одной стороны, могли быть наглядно показаны локальные термические эффекты, связанные с реакцией и удалением физически связанной влаги из образца. С другой стороны, рассматриваемый объем оказался достаточно большим, а интенсивность энергоподвода с поступающим воздухом достаточно интенсивной, чтобы указанные эффекты мало противоречили условиям стационарности проведения реакции в лабораторной печи. Результаты сравнения натуральных и численных экспериментов представлены на рис. 2-4.

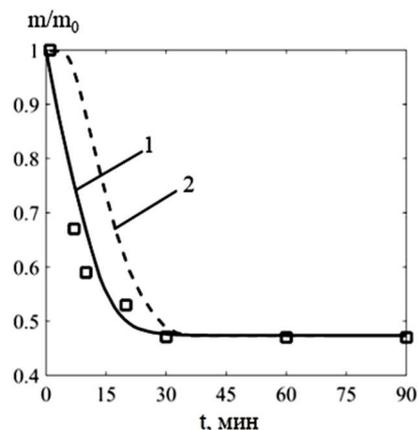


Рис. 2. Изменение относительной массы навески ($m_0=0,54 \text{ г}$) частиц доломита при прокалике в стационарных условиях ($T_g=900 \text{ }^\circ\text{C}$): точки – экспериментальные значения; 1 – расчет при начальных условиях $T_p=T_g=900 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – расчет при начальных условиях $T_p=30 \text{ }^\circ\text{C}$ и $T_g=900 \text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 2. Change in the sample relative mass ($m_0=0.54 \text{ g}$) of dolomite particles during annealing at steady-state conditions ($T_g=900 \text{ }^\circ\text{C}$): points – experimental data; 1 – calculation at the initial conditions $T_p=T_g=900 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – calculation at the initial conditions $T_p=30 \text{ }^\circ\text{C}$ and $T_g=900 \text{ }^\circ\text{C}$

На рис. 2 показано отношение текущего значения массы навески обрабатываемого материала m к массе сырьевого материала m_0 как функция времени. Как видно, расчетные и экспериментальные данные, касающиеся убыли относительной массы материала, находятся в хорошем соответствии при использовании допущения, что температура материала T_p сразу равна температуре окружающего воздуха $T_g = 900 \text{ }^\circ\text{C}$. Отказ от этого допущения (начальное значение $T_p = 30 \text{ }^\circ\text{C}$) приводит к незначительному изменению характера протекания реакции, но откладывает ее начало на время прогрева материала, при этом максимальное значение

убыли массы материала достигается практически за одно и то же время. Тем не менее видно (рис. 3), что модель фиксирует на начальном этапе незначительное понижение температуры частиц и воздуха в результате испарения влаги и затрат энергии на поддержание реакции. При значительной массе навески указанные эффекты должны в большей степени влиять не только на протекание реакции, но и на тепловое и гидродинамическое состояние псевдоожиженного слоя.

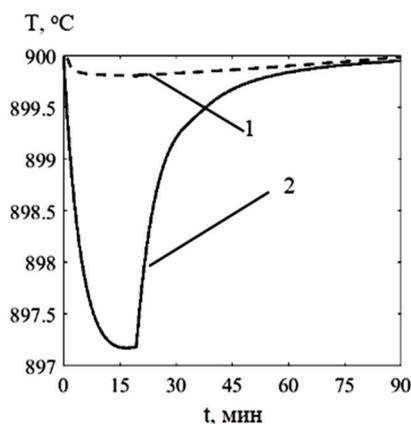


Рис. 3. Расчетное изменение локальной температуры газа (1) и частиц (2) в ячейке при начальных условиях $T_p=T_g=900\text{ }^\circ\text{C}$
Fig. 3. Calculated change in the gas (1) and particle (2) local temperature at the initial conditions $T_p=T_g=900\text{ }^\circ\text{C}$

На рис. 4-5 показаны некоторые результаты численных экспериментов ($\Delta x = 0,005\text{ м}$, $\Delta t = 0,02\text{ с}$), описывающих термическую обработку навески доломита ($m_0 = 350\text{ г}$) в цилиндрическом аппарате с внутренним диаметром $0,1\text{ м}$ и расходной скорости воздуха 3 м/с .

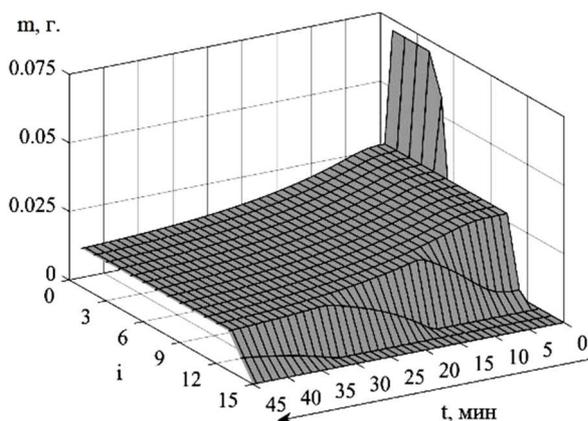


Рис. 4. Эволюция распределения массы твердого материала в аппарате
Fig. 4. Evolution of the mass distribution of solids in the bed

Рис. 4 иллюстрирует эволюцию распределения массы твердого материала в аппарате. За очень короткое расчетное время материал из плотного состояния переходит в псевдоожиженное, занимая 10 ячеек. С течением времени массовое содержание частиц в ячейках снижается. С одной

стороны, это объясняется протеканием реакции и соответствующим уменьшением массы навески, с другой стороны снижение веса частиц приводит к постепенному росту расширения слоя, что также сказывается на содержании частиц в ячейках.

Термическое разложение доломита рассматривается нами как одновременное протекание двух реакций первого порядка, скорость которых будет замедляться по мере убыли содержания исходных компонентов. Результат протекания этих двух реакций может быть охарактеризован относительной скоростью убыли массы материала $\beta = (\Delta m/m_0 \cdot \Delta t)$. Распределение этого параметра в пространстве и времени представлено на рис. 5.

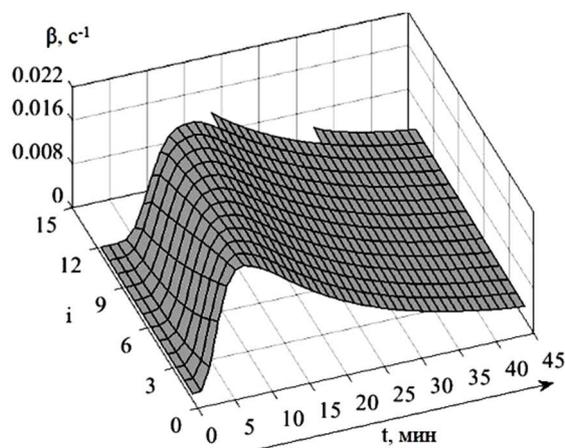


Рис. 5. Эволюция распределения относительной скорости убыли массы твердого материала в аппарате
Fig. 5. Evolution of the relative rate distribution of the mass loss of solids in the bed

Как видно, максимальная скорость реакции соответствует моменту, когда завершается стадия интенсивного прогрева материала, и он достигает некоторой квазистационарной температуры, но при этом еще высока концентрация реагирующих компонентов. Далее скорость снижается, стремясь к нулю, по мере убывания содержания реагирующих компонентов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, предложенная ячеечная модель в сочетании с эмпирическими зависимостями (4)-(5) позволяет без дополнительных идентификационных процедур и с хорошей для инженерных расчетов точностью имитировать процесс термической диссоциации доломита в лабораторной печи, а также качественно непротиворечиво описывать указанный процесс в псевдоожиженном слое. Вместе с тем сама модель не является следствием зависимостей (4)-(5), что дает основание рассматривать ее как достоверную научную основу для создания компьютерного метода расчета процессов в кипящем слое.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-08-00028А.

ЛИТЕРАТУРА

1. **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. V. 405. P.183-194. DOI: 10.1016/S0040-6031(03)00190-4.
2. **Малько М.В., Василевич С.В., Дегтеров Д.В., Богач В.Н.** Экспериментальное исследование кинетики термического разложения белорусских доломитов. *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук*. 2015. № 1. С. 95-101.
3. **Косенко Н.Ф., Филатова Н.В.** Кинетика разложения доломита в микроволновом поле. *Огнеупоры и техническая керамика*. 2010. № 3. С. 31-34.
4. **Rat'ko A.I. Ivanets A.I., Kulak A.I., Morozov E.A., Sakhar I.O.** Thermal decomposition of natural dolomite. *Inorg. Mat.* 2011. V. 47. № 12. P. 1372-1377.
5. **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. *Am. Mineralogist*. 2009. V. 94. P. 578-593. Doi: 10.2138/am.2009.3021.
6. **Rodriguez-Navarro C., Kudlacz K., Ruiz-Agudo E.** The mechanism of thermal decomposition of dolomite: New insights from 2D-XRD and TEM analyses. *Am. Mineralogist*. 2012. V. 97(1). P. 38-51. Doi: 10.2138/am.2011.3813.
7. **Малько М.В., Василевич С.В., Асадчий А.Н., Доброго К.В., Козначеев И.А., Шмелев Е.С., Позняк А.И.** Исследование кинетики и механизма термического разложения природных доломитов Беларуси. XV Минский международный форум по тепло- и массообмену. Тезисы докладов и сообщений. 2016. Т. 2. С. 125-128.
8. **Доброго К.В.** Макрокинетические модели термического разложения доломита для расчета сорбционных систем газогенераторов. *Изв. вузов и энергет. объединений СНГ. Энергетика*. 2015. № 5. С. 51-59.
9. **Mothilal T., Pitchandi K.** Effect of particles density on holdup mass and heat transfer rate in solid cyclone heat exchanger. *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 2016. V. 11. N 2. P. 1293-1297.
10. **Барочкин Е.В., Жуков В.П., Ненаездников А.Ю., Беляков А.Н., Росляков А.Н.** Оптимальное управление межфазной поверхностью в барботажной ступени атмосферных деаэраторов. *Вестн. ИГЭУ*. 2012. № 4. С. 58-61.
11. **Жуков В.П., Беляков А.Н.** Термодинамический подход к описанию механических процессов в сыпучих средах. *Вестн. ИГЭУ*. 2013. № 1. С. 74-77.
12. **Бобков С.П.** Применение вероятностных подходов для моделирования технологических процессов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2005. Т. 48. Вып. 7. С. 105-112.
13. **Mizonov V., Mitrofanov A., Ogurtzov A., Tannous K.** Modeling of particle concentration distribution in a fluidized bed by means of the theory of Markov chains. *Part. Sci. Technol.* 2014. V. 32. N. 2. P. 171-178.
14. **Митрофанов А.В., Таннус К., Мизонов В.Е.** Экспериментальное исследование гидродинамики частиц биотоплива в топке с кипящим слоем. *Вестн. ИГЭУ*. 2014. № 3. С. 65-67.
15. **Митрофанов А.В., Мизонов В.Е., Таннус К.** Математическая модель эволюции состояния псевдоожиженного слоя при влагопереносе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2015. Т. 58. Вып. 4. С. 75-78.

REFERENCES

1. **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. V. 405. P. 183-194. DOI: 10.1016/S0040-6031(03)00190-4.
2. **Mal'ko M.V., Vasilevich S.V., Degterov D.V., Bogach V.N.** Experimental study of kinetics of thermal decomposition of Belorussian dolomites. *Vesci Nacyjanal'noj akademii navuk Belarusi. Serija fizika-tjechnichnyh navuk*. 2015. N 1. P. 95-101 (in Russian).
3. **Kosenko N.F., Filatova N.V.** Kinetics of decomposition of dolomite in a microwave field. *Ogneupory i Tekhnicheskaya Keramika*. 2010. N 3. P. 31-34 (in Russian).
4. **Rat'ko A.I. Ivanets A.I., Kulak A.I., Morozov E.A., Sakhar I.O.** Thermal decomposition of natural dolomite. *Inorg. Mat.* 2011. V. 47. № 12. P. 1372-1377.
5. **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. *Am. Mineralogist*. 2009. V. 94. P. 578-593. Doi: 10.2138/am.2009.3021.
6. **Rodriguez-Navarro C., Kudlacz K., Ruiz-Agudo E.** The mechanism of thermal decomposition of dolomite: New insights from 2D-XRD and TEM analyses. *Am. Mineralogist*. 2012. V. 97(1). P. 38-51. Doi: 10.2138/am.2011.3813.
7. **Mal'ko M.V., Vasilevich S.V., Asadchij A.N., Dobrego K.V., Koznacheev I.A., Shmelev E.S., Poznyak A.I.** Study of the kinetics and mechanism of thermal decomposition of natural dolomites of Belarus. XV Minsk International Forum on Heat and Mass Exchange. 2016. V. 2. P. 125-128 (in Russian).
8. **Dobrego K.V.** Macrokinetic models of thermal decomposition of dolomite for calculation of sorption systems of gas generators. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. SNG. Energetika*. 2015. N 5. P. 51-59 (in Russian).
9. **Mothilal T., Pitchandi K.** Effect of particles density on holdup mass and heat transfer rate in solid cyclone heat exchanger. *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 2016. V. 11. N 2. P. 1293-1297.
10. **Barochkin E.V., Zhukov V.P., Nenaezdnikov A.Yu., Belyakov A.N., Roslyakov A.N.** Optimum control of the interphase surface in the bubbling stage of atmospheric deaerators. *Vestn. IGEU*. 2012. N 4. P. 58-61 (in Russian).
11. **Zhukov V.P., Belyakov A.N.** Thermodynamic approach to the description of mechanical processes in granular media. *Vestn. IGEU*. 2013. N 1. P. 74-77 (in Russian).
12. **Bobkov S.P.** Application of probabilistic approaches for modeling of technological processes. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2005. V. 48. N 7. P. 105-112 (in Russian).
13. **Mizonov V., Mitrofanov A., Ogurtzov A., Tannous K.** Modeling of particle concentration distribution in a fluidized bed by means of the theory of Markov chains. *Part. Sci. Technol.* 2014. V. 32. N 2. P. 171-178.
14. **Mitrofanov A.V., Tannous K., Mizonov V.E.** Experimental study of the hydrodynamics of biofuel particles in a fluidized bed furnace. *Vestn. IGEU*. 2014. N 3. P. 65-67 (in Russian).
15. **Mitrofanov A.V., Mizonov V.E., Tannous K.** A mathematical model of fluidized bed state evolution at moisture transfer. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2015. V. 58. N 4. P. 75-78 (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 12.09.2017

Принята к опубликованию (Accepted) 30.01.2018