

Разработка модели термического разложения доломита в кипящем слое для обеспечения сорбционных систем газогенераторных установок¹

А.В. Митрофанов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: and2mit@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В энергетике все большую нишу занимают твердотопливные мини-ТЭС. Это расширение поддерживается необходимостью развития независимых и надежных источников энергообеспечения, а также успехами в термохимической переработке твердых видов топлива. В то же время нельзя не отметить наличие лимитирующих процесс факторов. Комплексная энерготехнологическая переработка сопряжена с трудностями, возникающими при очистке генераторных газов. Сорбенты на кальциевой основе широко используются для удаления из газа диоксида серы, серного ангидрида и других соединений. Доломит представляется наиболее подходящим выбором такого сорбента. По этой причине развитие простой, но информативной модели описания технологического процесса термического разложения доломитосодержащих материалов в настоящее время требует специального внимания.

Материалы и методы: Теория цепей Маркова используется для моделирования комплексного технологического процесса, включающего термическое разложение частиц доломита во взвешенном состоянии. Предложенная модель дополнена следующими полуэмпирическими субмоделями: охижения твердой фазы в потоке воздуха, межфазного теплообмена, термического разложения твердой фазы. Преобразование доломита до оксидов рассматривается как специфический одностадийный процесс.

Результаты: На основе теории цепей Маркова предложена ячеечная модель комплексного технологического процесса, включающего термическое разложение частиц доломита во взвешенном состоянии. Переходные матрицы поставлены в соответствие с физическими параметрами протекания процессов, что делает предлагаемую модель нелинейной. Заимствованные из литературы экспериментальные данные и полученные расчетные результаты находятся в хорошем соответствии для изотемпературного процесса. Расчетным путем показано влияние термического эффекта реакции на термодинамическое состояние слоя.

Выводы: Модель, основанная на теории цепей Маркова и дополненная независимыми полуэмпирическими субмоделями процессов в кипящем слое, успешно использована для описания термической диссоциации доломита. Расчеты показывают необходимость учета термического эффекта реакции разложения доломита для надлежащего описания технологического процесса. Предложенная математическая модель может быть рассмотрена как достоверная научная основа для операционного контроля и проектирования установок кипящего слоя.

Ключевые слова: псевдооживленный слой, вектор состояния, матрица переходных вероятностей, скорость витания частицы, теплоотдача, массоотдача, доломит, термическое разложение, твердое топливо.

Development of a model of thermal decomposition of dolomite in fluidized bed for providing sorbent systems of gas-plants

A.V. Mitrofanov

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: and2mit@mail.ru

Abstract

Background: Small solid fuel power plants are gaining popularity in the energy industry. This trend is connected to the problem of obtaining an independent and reliable power supply source and also with the development of thermochemical treatment of solid fuels. At the same time, there are several limitation factors in this process. The complex power technological processing has several problems associated with exhaust gas cleaning. Calcium-based sorbents are widely used to remove sulfur dioxide and sulfur trioxide and other gaseous pollutants. Dolomite seems to be the most appropriate choice among calcium-based sorbents. That is why the development of a simple but informative model for describing the technological process of thermal decomposition of dolomitic materials now requires special attention.

Materials and methods: The Markov chain approach is used to model the complex technological processes involving thermal decomposition of dolomite particles in fluidized stage. The proposed model is complemented by the following semi-empirical sub-models: solid suspension in gas upstream, gas-solid heat transfer, solid thermal decomposition. Dolomite conversion to oxides is considered as a special one-stage process.

Results: A cell model of complex technological processes involving thermal decomposition of dolomite particles in fluidized bed is proposed. The transition matrices are associated with the current physical properties of the substances involved, which makes the proposed model nonlinear. The comparison of experimental results from the literature sources with the obtained model predictions shows a good agreement for the constant-temperature process. The obtained calculation results show the effect of decomposition enthalpy on the thermodynamic stage of fluidized bed.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-08-01684.

Conclusions: The Markov chains model has been modified by adding independent semi-empirical sub-models of processes in fluidized bed and has been successfully used to simulate dolomite thermal decomposition. The calculations have made it clear that in order to properly describe the industrial process we should take into account the enthalpy of dolomite decomposition. The obtained mathematical model can be considered as the scientific basis for operating control and design of fluidized bed reactors.

Key words: fluidized bed, state vector, matrix of transition probabilities, particle settling velocity, heat transfer, mass transfer, dolomite, thermal decomposition, solid fuel.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.4.056-061

Состояние вопроса. В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к диверсификации энергетики и расширению ее твердо-топливной ниши [1–3]. Увеличение числа ТЭС малой мощности (мини-ТЭС), работающих на различных видах твердого топлива (в основном местного: торф, солома, отходы деревообработки и др.), происходит как в нашей стране, так и за рубежом. Подобные малые энергетические объекты, как правило, предполагают получение генераторного газа, а не прямое сжигание топлива [1, 4].

В связи с наметившимися тенденциями актуальными являются не только разработки, касающиеся непосредственно энергетических установок, но и развитие инженерных методов осуществления и расчета сопутствующих процессов, в том числе обеспечивающих функционирование очистных систем газогенераторных установок. По некоторым оценкам, стоимость системы очистки и охлаждения генераторного газа может достигать 15–20 % от общей стоимости тепловой электростанции с парогазовой установкой [1], а высокая степень загрязненности генераторных газов в значительной мере лимитирует распространение когенерационных энергетических установок [4].

Особый интерес вызывает использование доломита в качестве сорбента для очистки генераторных газов. При работе в качестве сорбента доломит подвергается термическому разложению, поэтому адекватное представление и моделирование кинетики этого процесса имеет интерес для энергетической отрасли.

Минерал доломит представляет собой карбонатную горную породу, отвечающую формуле $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ и теоретически состоящую из 30,3 % CaO; 20,0 % MgO; 47,8 % CO_2 [5–7]. Таким образом, максимальная потеря массы навески доломита при термообработке должна составлять 47–48 %.

Использование доломита химической промышленностью и рядом смежных отраслей привело к формированию широкого фронта исследовательских работ, направленных на изучение процесса его термической диссоциации [5–9]. Большинство рассмотренных работ излишне детализируют микро- и наноструктурные трансформации и эффекты, которые сопровождают процесс термопреобразования доломита, что не только не приближает разработку инженерного метода расчета, но и в известной мере лимитирует его создание.

Нельзя не согласиться, что действительный механизм термопреобразования доломита оказался достаточно сложным, поэтому даже относительно упрощенной модели реакции его термического разложения нет окончательного консенсуса, что позволяет исследователям использовать различные модели протекания реакции [2–4]. Как правило, уравнение брутто реакции записывают в виде



Однако при описании кинетических закономерностей брутто реакцию рассматривают как двустадийное разложение карбонатов магния и кальция [4–6]. Оба превращения рассматриваются как реакции первого порядка, при этом в зависимости от температуры эти реакции могут происходить последовательно или параллельно, накладываясь друг на друга. Такой подход значительно усложняет расчетную схему модели и увеличивает количество ее параметров.

Материалы и методы. Задачей настоящей статьи является синтез предложенной ранее [10] модели эволюции термодинамического и гидромеханического состояния кипящего слоя, основанной на теории цепей Маркова, хорошо зарекомендовавших себя при моделировании смежных процессов [11–14], и инженерной модели для описания термического разложения доломита как одностадийной реакции [15].

В основу модели положена ячеечная схема, формирующая единую основу для построения модели: аппарат представлен как совокупность из n ячеек, а эволюция векторов состояний наблюдается в дискретные моменты времени $t_k = (k - 1)\Delta t$, где Δt – продолжительность временного перехода; k – номер временного перехода (целочисленный аналог времени). Продольные миграции частиц и продвижение воздуха вдоль цепей ячеек описываются рекуррентными матричными равенствами:

$$\mathbf{S}_p^{k+1} = \mathbf{P}_p^k (\mathbf{S}_p^k - \Delta \mathbf{S}_p^k), \quad (2)$$

$$\mathbf{S}_g^{k+1} = \mathbf{P}_g^k \mathbf{S}_g^k + \mathbf{S}_{gf}, \quad (3)$$

где \mathbf{S}_p и \mathbf{S}_g – векторы-столбцы объемного содержания частиц и газа в ячейках; \mathbf{P}_p^k и \mathbf{P}_g^k – матрицы переходных вероятностей для частиц и газа, зависящие от векторов состояния и меняющиеся на каждом переходе; $\Delta \mathbf{S}_p$ – убыли объема твердой фазы за счет эвакуации CO_2 из реагирующих частиц; \mathbf{S}_{gf} – вектор подачи газа (при подаче через решетку он имеет единст-

венный ненулевой элемент в первой ячейке, равный объему газа, подаваемому в нее за один переход). Расчетная схема процесса псевдоожижения показана на рис. 1.

Рекуррентные матричные равенства (2)–(3) позволяют описать миграцию частиц и прохождение оживающего агента вдоль соответствующих цепей. Аналогичным образом на основании расчета этих перемещений может быть описано и распространение всех аддитивных свойств (теплоты, влаги и т.д.), связанных с этим перемещением. Дополнительно модель включает в себя несколько параллельных цепей, между сходственными ячейками которых возможен обмен потоками теплоты ΔQ и влаги ΔM_w (для описания межфазного тепло- и массообмена). В результате кинетика распределенного тепло- и массообмена в слое может быть описана в матричной форме при помощи балансовых соотношений, детальное описание которых приводится в [10–11].

Особенностью предлагаемой модели является то, что, в отличие от подобных линейных моделей [13], локальные скорости обтекания частиц газом в ячейках и пропорциональные этим скоростям коэффициенты межфазного взаимодействия (коэффициенты сопротивления частиц, теплообмена, массообмена) рассчитываются с учетом локальной порозности и ее влияния на уменьшение живого сечения потока.

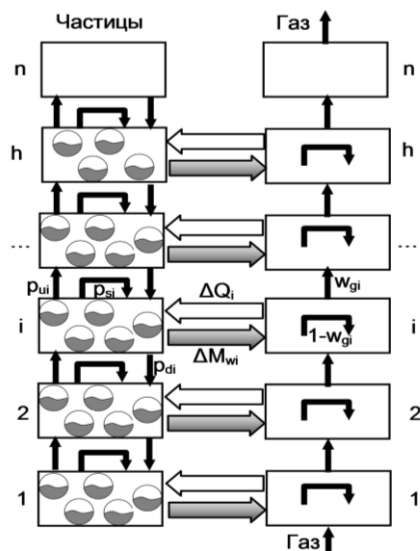


Рис. 1. Расчетная схема модели псевдоожижения

Расчет коэффициента сопротивления частиц C_d , который определяет их скорости витания, значения переходных вероятностей в матрице P_p , расширение кипящего слоя, был выполнен по предложенной ранее [10] эмпирической зависимости:

$$C_d(Re_p, Ar) = \frac{24}{Re_p} + \frac{Ar}{Re_p^{1,96}}, \quad (4)$$

где Re_p – число Рейнольдса; Ar – число Архимеда.

Для расчета значений чисел Нуссельта (Nu) и Шервуда (Sh), необходимых для количественной оценки коэффициентов теплоотдачи α и массоотдачи β , были использованы заимствованные из [16] соотношения:

$$Nu = 2,0 + 0,6(Re_p)^{1/2}(Pr)^{1/3}, \quad (5)$$

$$Sh = 2,0 + 0,6(Re_p)^{1/2}(Sc)^{1/3}, \quad (6)$$

где Pr – число Прандтля; Sc – число Шмидта.

Кинетическое уравнение, описывающее изменение степени завершения химической реакции термической диссоциации доломита как одностадийного процесса, заимствовано из [15]:

$$\frac{dX}{dt} = A \cdot e^{-E/RT} (1-X)^{0,4043}, \quad (7)$$

где A – предэкспоненциальный фактора константы скорости ($A = 0,1628 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$); E – энергия активации реакции ($E = 0,19067 \cdot 10^6 \text{ Дж/моль}$); R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,3144 \text{ Дж/моль}$); T – температура материала, К; X – степень завершения процесса термопреобразования доломита.

Степень завершения процесса может быть найдена через соотношение

$$X = \frac{M_{CaMg(CO_3)_2} m_0 - m}{2 \cdot M_{CO_2} y m_0}, \quad (8)$$

где $M_{CaMg(CO_3)_2} = 184,4 \text{ г/моль}$ и $M_{CO_2} = 44,01 \text{ г/моль}$ – молярные массы соответствующих компонентов; m_0 и m – начальное и текущее значения массы навески доломита; y – теоретическая степень разложения доломита ($y = 0,4772$) [15].

В рамках ячейечной модели (2)–(3) зависимости (7)–(8) представляются в дискретной форме и используются для расчета локальных параметров протекания процесса в каждой ячейке.

Тогда изменение степени завершенности реакции в i -й ячейке может быть записано аналогично соотношению (7):

$$\Delta X_i^k = A \cdot e^{-E/RT} (1-X_i^k)^{0,4043} \Delta t. \quad (9)$$

Для k -го шага текущее значение степени разложения доломита может быть записано в матричной форме:

$$X^k = \frac{M_{CaMg(CO_3)_2}}{2 \cdot M_{CO_2} y} (S_p^k / S_p^1), \quad (10)$$

а изменение содержания твердой фазы, дополнительно корректирующее вектор состояния, может быть определено как

$$\Delta S_p^k = \left[[1]_{n \times 1} - (X^k + \Delta X^k) \right] \cdot S_p^k. \quad (11)$$

В предлагаемой модели скорость витания частиц изменяется по большей части в зависимости от плотности материала в результате протекания реакции (содержание влаги в частицах незначительно – около 5 % по массе [5]). При использовании последнего допущения те-

кущее значение плотности может быть рассчитано как

$$\rho^k = (\mathbf{M}_w^k + \rho_p \mathbf{S}_p^k) / \mathbf{S}_p^k, \quad (12)$$

где \mathbf{M}_w^k – вектор масс влаги, связанной с частицами, рассчитываемый на каждом шаге с учетом процесса массоотдачи (сушки) по алгоритму, рассмотренному в [10]; $\rho_p = 2930 \text{ кг/м}^3$ – плотность доломита [15].

Поскольку число частиц в аппарате считалось постоянным, то средний их размер в i -й ячейке может быть определен как диаметр шара, объем которого \mathbf{S}_p^k / N_p (где N_p – число частиц в рассматриваемой навеске).

Результаты. Результаты расчетных экспериментов с моделью (1)–(12) представлены на рис. 2, 3. Необходимо отметить, что поскольку коэффициент сопротивления (4) зависит и от плотности частицы, и от размера, то изменение любого из этих параметров сказывается на расчетном расширении слоя.

Численные расчеты проводились для моделирования термического разложения доломита в процессе псевдоожижения навески массой 1 кг в цилиндрическом реакторе с внутренним диаметром 0,1 м, который был представлен как цепь 15 ячеек высотой $\Delta x = 0,02 \text{ м}$. Расходная скорость воздуха составляла 1,5 м/с, а диаметр ожижаемых частиц $d_p = 1 \text{ мм}$.

На рис. 2 показана эволюция распределения массы твердого материала в аппарате при начальных условиях $T_g(t=0) = T_p(t=0) = 700 \text{ }^\circ\text{C}$. За очень короткое расчетное время материал из плотного состояния переходит в псевдоожиженное, занимая 9–10 ячеек.

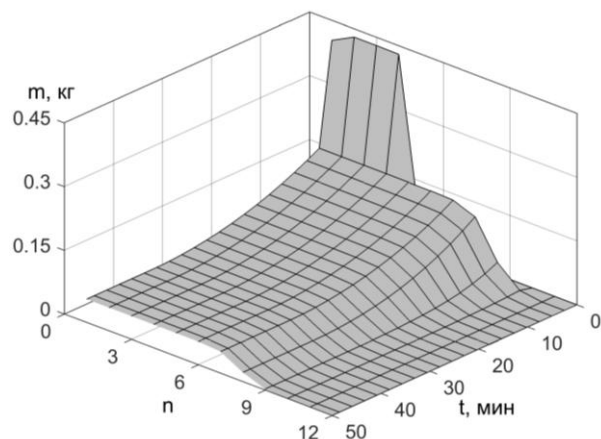


Рис. 2. Эволюция распределения массы твердого материала в аппарате при $\Delta H = 0 \text{ кДж/моль}$

С течением времени объемное содержание материала в аппарате снижается, в то же время происходит изменение размера и массы частиц. В результате такого комплекса процессов происходит стабильное псевдоожижение в мало изменяющемся объеме, в отличие, например, от сушки частиц, при которой высота слоя значительно увеличивается [10].

Результаты, показанные на рис. 2, получены без учета условия эндотермического характера протекания реакции, поэтому их корректно будет сопоставить с экспериментальными данными [15] по изотермическому разложению доломита. На рис. 3 показаны результаты сравнения расчетных значений (линия) степени завершения реакции с экспериментальными данными (точки) [15]. Анализ полученных данных показывает, что расчетные и экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии друг с другом.

Пренебрежение тепловым эффектом реакции при получении результатов, представленных на рис. 2, 3, является оправданным, так как экспериментальные точки были получены в заведомо изотермическом процессе – при термической обработке малой навески частиц в печи. Однако при организации проведения реакции в слое, масса которого достаточна для нарушения стационарности теплового процесса, пренебрежение в расчетах тепловым эффектом самой реакции может оказаться достаточно грубым допущением.

На рис. 3 пунктирной линией показан результат учета в тепловом балансе эндотермического эффекта реакции, принятого равным $\Delta H = 295,6 \text{ кДж/моль}$ [15] (все остальные условия были сохранены).

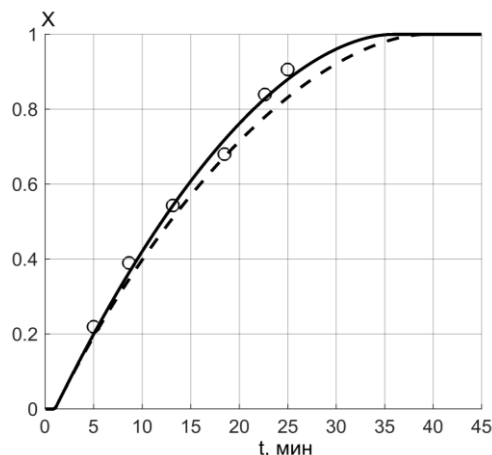


Рис. 3. Рассчитанные по модели (1)–(12) значения величин степени завершения реакции: сплошная линия – без учета теплового эффекта реакции; пунктирная – тепловой эффект реакции $\Delta H = 295,6 \text{ кДж/моль}$; точки – экспериментальные значения, полученные в [15]

Анализ полученных результатов (рис. 4) показывает, что температура частиц и ожижающего агента оказывается сниженной на несколько градусов, причем ее восстановление до начального значения ($T_g(t=0) = T_p(t=0) = 700 \text{ }^\circ\text{C}$) достигается только через некоторое время после полного прекращения реакции.

На рис. 5 показана эволюция распределения массы твердого материала в аппарате при учете термического эффекта ($\Delta H = 295,6 \text{ кДж/моль}$), однако значительно более наглядным примером замедления протекания реакции может

быть рис. 6, на котором показаны изменения размера частиц. При отсутствии энергетических потерь уменьшение размера частиц происходит одинаково во всех ячейках, замедляясь по мере убыли концентрации реагирующего материала. При расходовании теплоты на поддержание реакции возникает разница между размером частиц в ячейках (в нижней ячейке реакция проходит быстрее). Вместе с тем в таком случае происходит снижение скорости разложения доломита во всем объеме слоя.

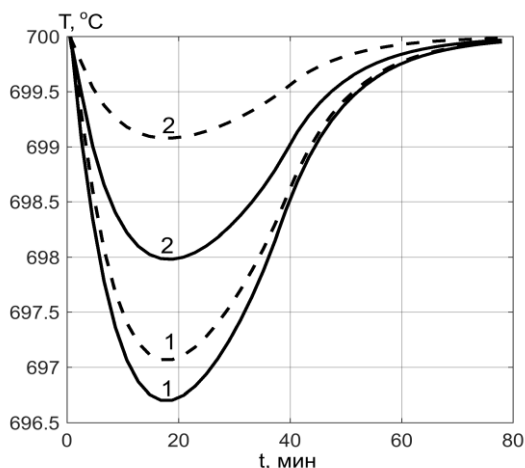


Рис. 4. Расчетные значения температур теплоносителя (пунктирная линия) и частиц (сплошная линия) в первой (индекс 1) и десятой (индекс 2) ячейках

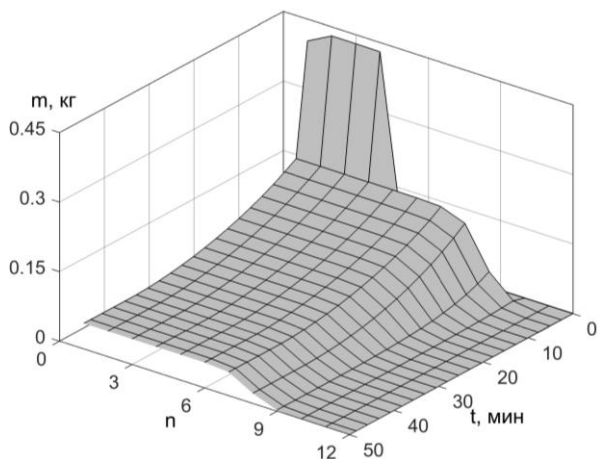


Рис. 5. Эволюция распределения массы твердого материала в аппарате при $\Delta H = 295,6$ кДж/моль

Выводы. Несмотря на то, что используемая при моделировании масса навески (1 кг) скорее отвечает процессу в небольшой лабораторной установке и локальные температурные эффекты не являются критически значимыми, все-таки они оказывают заметное влияние на интегральные показатели протекания реакции и поэтому требуют учета при расчете даже небольшого лабораторного оборудования.

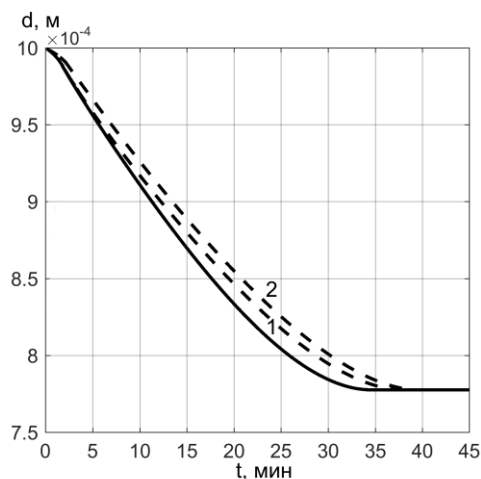


Рис. 6. Изменение диаметра частиц: сплошная линия – без учета теплового эффекта реакции; пунктирные линии – при $\Delta H = 295,6$ кДж/моль (1 – нижняя ячейка; 2 – десятая ячейка)

Таким образом, предлагаемая ячеечная математическая модель и эмпирические зависимости для описания кинетики реакции, с одной стороны, являются независимыми, а с другой – обеспечивают хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. На этом основании предложенная модель и ее программно-алгоритмическое обеспечение может рассматриваться как достоверная научная основа инженерного компьютерного метода расчета теплового разложения дисперсного доломита в кипящем слое.

Список литературы

1. 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, №. 1. – P. 55–59.
2. Митрофанов А.В., Таппоус К., Мизонов В.Е. Экспериментальное исследование гидродинамики частиц биотоплива в топке с кипящим слоем // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 3. – С. 65–67.
3. Афанасьева О.В., Мингалева Г.Р. Очистка генераторного газа на угольной мини-ТЭС // Энергетика Татарстана. – 2012. – № 4(28). – С. 25–28.
4. Доброго К.В. Макрокинетические модели термического разложения доломита для расчета сорбционных систем газогенераторов // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2015. – № 5. – С. 51–59.
5. Экспериментальное исследование кинетики термического разложения белорусских доломитов / М.В. Малько, С.В. Василевич, Д.В. Дегтерев, В.Н. Богач // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2015. – № 1. – С. 95–101.
6. 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. – P.183–194.
7. Thermal decomposition of natural dolomite / A.I. Raťko, A.I. Ivanets, A.I. Kulak, E.A. Morozov, I.O. Sakhar // Inorganic Materials. – 2011. – Vol. 47, №.12. – P. 1372–1377.
8. Косенко Н.Ф., Филатова Н.В. Кинетика разложения доломита в микроволновом поле // Огнеупоры и техническая керамика. – 2010. – № 3. – С. 31–34.
9. 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(1). – P. 38–51.

10. **Mitrofanov A.V., Mizonov V.E., Tannous K.** Markov chain model of particulate solids batch drying in a conical fluidized bed // *Известия высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология.* – 2016. – Т. 59. – № 12. – С. 93–99.

11. **Расчетно-экспериментальное** исследование распределения твердых частиц в аппарате с двухмерным псевдооживленным слоем / А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, В.Е. Мизонов и др. // *Изв. вузов. Химия и химическая технология.* – 2009. – Т. 52, № 11. – С. 131–134.

12. **Балагуров И.А., Мизонов В.Е., Митрофанов А.В.** Математическая модель формирования многокомпонентной смеси сегрегирующих компонентов // *Изв. вузов. Химия и химическая технология.* – 2014. – Т. 57, № 8. – С. 67–70.

13. **Dehling H.G., Hoffman A.C., Stuu H.W.** Stochastic Models for Transport in a Fluidised Bed // *SIAM Journal of Applied Mathematics.* – 1999. – Vol. 60, № 1. – P. 337–358.

14. **Жуков В.П., Беляков А.Н.** Термодинамический подход к описанию механических процессов в сыпучих средах // *Вестник ИГЭУ.* – 2013. – Вып. 1. – С. 74–77.

15. **Predicting** the rate of thermal decomposition of dolomite / M. Hartman, O. Trnka, V. Vesely, K. Svoboda // *Chemical Engineering Science.* – 1996. – Vol. 51, № 23. – P. 5229–5232.

16. **Bird R.B., Steward W.E., Lightfoot E.N.** Transport Phenomena // John Wiley & Sons, Inc. – New York, 2002. 1069 p.

References

1. 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.

2. Mitrofanov, A.V., Tannous, K., Mizonov, V.E. Eksperimental'noe issledovanie gidrodinamiki chastits biotopliva v topke s kipyashchim sloem [Experimental study of hydrodynamics of biofuel particles in fluidized bed furnaces]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 3, pp. 65–67.

3. Afanas'eva, O.V., Mingaleeva, G.R. Ochistka generatornogo gaza na ugol'noy mini-TES [Cleaning of generator gas at mini coal steam power plants]. *Energetika Tatarstana*, 2012, no. 4(28), pp. 25–28.

4. Dobrego, K.V. Makrokineticheskie modeli termicheskogo razlozheniya dolomita dlya rascheta sorbtionnykh sistem gazogeneratorov [Macrokinetic models of dolomite thermal decomposition for calculating gas generator sorption systems]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG. Energetika*, 2015, no. 5, pp. 51–59.

5. Malko, M.V., Vasilevich, S.V., Degterov, D.V., Bogach, V.N. Eksperimental'noe issledovanie kinetiki termicheskogo razlozheniya belorusskikh dolomitov [Experimental study of

Belorussian dolomite thermal decomposition kinetics]. *Vesti Natsyonal'noy akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk*, 2015, no. 1, pp. 95–101.

6. 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.

7. Rač'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.

8. Kosenko, N.F., Filatova, N.V. Kinetika raz-lozheniya dolomita v mikrovolnovom pole [Dolomite decomposition kinetics in microwave field]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2010, no. 3, pp. 31–34.

9. 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(1), pp. 38–51.

10. Mitrofanov, A.V., Mizonov, V.E., Tannous, K. Markov chain model of particulate solids batch drying in a conical fluidized bed. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2016, vol. 59, no. 12, pp. 93–99.

11. Oгурцов, А.В., Митрофанов, А.В., Мизонов, В.Е., Огурцов, В.А., Таннус, К. Расчетно-экспериментальное исследование распределения твердых частиц в аппарате с двухмерным псевдо-оживленным слоем [Calculation and experimental study of solid particle distribution in the apparatus with two-dimensional fluidized bed]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2009, vol. 52, no. 11, pp. 131–134.

12. Balagurov, I.A., Mizonov, V.E., Mitrofanov, A.V. Matematicheskaya model' formirovaniya mnogokomponentnoy smesi segregiruyushchikh komponentov [A mathematical model of formation of multi-component mixture of segregating components]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2014, vol. 57, no. 8, pp. 67–70.

13. Dehling, H.G., Hoffman, A.C., Stuu, H.W. Stochastic Models for Transport in a Fluidised Bed. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 1999, vol. 60, no. 1, pp. 337–358.

14. Zhukov, V.P., Belyakov, A.N. Termodinamicheskiy podkhod k opisaniyu mekhanicheskikh protsessov v sypuchikh sredakh [A thermodynamic approach to describing mechanical processes in granular media]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 1, pp. 74–77.

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.

16. Bird, R.B., Steward, W.E., Lightfoot, E.N. Transport Phenomena. John Wiley & Sons, Inc. New York, 2002. 1069 p.

Митрофанов Андрей Васильевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики,

e-mail: and2mit@mail.ru

Mitrofanov Andrei Vasilyevich,

Ivanovo State Power Engineering University,

Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Applied Mathematics Department,

e-mail: and2mit@mail.ru