

УДК 549.74:66.09

## МАКРОКИНЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ДОЛОМИТА ДЛЯ РАСЧЕТА СОРБЦИОННЫХ СИСТЕМ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ

Докт. физ.-мат. наук ДОБРЕГО К. В.

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: dobrego@bntu.by

Применение доломита в качестве сорбента для очистки генераторного газа вызывает интерес, поскольку именно загрязненность генераторных газов является основным препятствием на пути создания дешевых и эффективных когенерационных установок. Для проектирования систем очистки газа необходимы простые, но физически адекватные макрокинетические модели термического разложения доломита. В статье проанализированы особенности ряда современных моделей термического разложения доломита и кальцита. Сделан вывод о целесообразности создания компактных инженерных макрокинетических моделей разложения доломита и универсальных методов восстановления параметров этих моделей для конкретных образцов доломита. Такие методы могут основываться на термогравиметрических данных и стандартных алгоритмах минимизации погрешности аппроксимации.

Сделано предположение, что эвакуация  $\text{CO}_2$  из зоны реагирования может происходить по механизму диффузии и/или фильтрации Дарси. Показано, что для указанных механизмов функциональная зависимость скорости термического разложения от размеров частиц и температуры различна. Сформулированы четыре макрокинетические модели, адекватность которых проверена на основе экспериментальных данных. В данном направлении следует проводить работы по исследованию образцов доломита и выбору модели, наилучшим образом описывающей экспериментальные данные в широком диапазоне температур, скоростей прогрева, размера частиц.

**Ключевые слова:** доломит, кинетика, моделирование, фильтрация, газогенерация.

Табл. 1. Библиогр.: 15 назв.

## DOLOMITE THERMAL-DECOMPOSITION MACROKINETIC MODELS FOR EVALUATION OF THE GASGENERATORS SORBENT SYSTEMS

DOBREGO K. V.

*Belarusian National Technical University*

Employing dolomite in the capacity of a sorbent for generator gas purification is of considerable interest nowadays, as it is the impurity of generator gas that causes the major problem for creating cheap and effective co-generator plants. Designing gas purification systems employs simple but physically adequate macrokinetic models of dolomite thermal decompo-

sition. The paper analyzes peculiarities of several contemporaneous models of dolomite and calcite thermal decomposition and infers on reasonable practicality for creating compact engineering dolomite-decomposition macrokinetic models and universal techniques of these models parameter reconstruction for specific dolomite samples. Such techniques can be founded on thermogravimetric data and standard approximation error minimizing algorithms.

The author assumes that CO<sub>2</sub> evacuation from the reaction zone within the particle may proceed by diffusion mechanism and/or by the Darcy filtration and indicates that functional dependence of the thermal-decomposition rate from the particle sizes and the temperature differs for the specified mechanisms. The paper formulates four macrokinetic models whose correspondence verification is grounded on the experimental data. The author concludes that further work in this direction should proceed with the dolomite samples investigation and selecting the best approximation model describing experimental data in wide range of temperatures, warming up rates and the particle sizes.

**Keywords:** dolomite, kinetics, modeling, filtering, gas generation.

Tab. 1. Ref.: 15 titles.

**Введение.** Доломит является ископаемым минеральным сырьем, используемым в цементной промышленности, химическом производстве, а также как сорбент и катализатор при очистке газов [1–5]. Доломит белорусских месторождений – это плотный слоистый материал, в основной массе (>95 %) на микроструктурном уровне состоящий из чередующихся слоев карбонатов кальция и магния. Применение доломита в качестве сорбента для очистки генераторного газа вызывает особый интерес, поскольку именно загрязненность генераторных газов – основное препятствие на пути создания дешевых и эффективных когенерационных установок [4–6]. При работе в качестве сорбента и катализатора в неподвижном слое доломит термически разлагается. Скорость разложения зависит от термодинамических условий, структуры и размера частиц составляющих слоя. Для проектирования систем очистки генераторного газа необходимы достаточно простые, но физически адекватные макрокинетические модели термического разложения доломита.

В настоящее время имеется немало работ, посвященных этой проблеме [7–15]. Однако предлагаемые модели либо не учитывают существенных физических особенностей системы, либо включают слишком много параметров, излишне детализируя микро- и наноструктурные преобразования. Так, в работе ученых из университета Гренады [7] изучается механизм разложения кальцита на уровне микро- и наноструктурных трансформаций и брутто-процесса разложения при температурах до  $T = 1150$  °С. Первичные структурные трансформации идут по топотактическому механизму с формированием пучков наностержней СаО на псевдоморфных плоскостях кальцита независимо от экспериментальных условий. Брутто-процесс протекает по реакции первого порядка (гомогенное разложение) с эффективной энергией активации  $E \sim 176$  кДж/моль. Микроструктурные трансформации в [7] изучались при помощи сканирующей электронной микроскопии и двумерной рентгеновской дифрактометрии. Утверждалось, что раскрытие топотактического механизма первичной трансформации поможет интерпретации имеющихся данных по термопреобразованию кальцита. Особый упор делался на микротекстурных исследованиях образцов кальцита. Общая (брутто) кинетика изучалась на основе термогравиметрических (ТГ) исследований. Для ТГ-исследований брали кристалл

размером 1×1×2 мм и массой около 10 мг. Малая масса образца оправдывалась необходимостью уменьшения погрешности, возникающей от накопления CO<sub>2</sub> внутри образца. На эффект накопления CO<sub>2</sub> или повышения его парциального давления на результат ТГ-анализа указывалось также в других работах, например в [8]. Отметим, что накопление CO<sub>2</sub> внутри кристаллитов не должно интерпретироваться только как фактор повышения массы образца при ТГ-анализе, а прежде всего как фактор сдвига в химическом равновесии реакций разложения.

В [9] доломит кальцинировался в условиях воздушной атмосферы и в вакууме (ячейка ТЕМ). ТЕМ-исследования показали, что при кальцинировании идет первоначальное формирование гранцентрированного кубического смешанного оксида (Ca<sub>0,5</sub>Mg<sub>0,5</sub>O). Эта фаза претерпевает разделение на ориентированные кристаллы CaO (обедненные Mg) и MgO (обедненные Ca). Микроскопический и рентгеновский анализы показывают формирование пористой псевдоморфной фазы, состоящей из оксидных нанокристаллов. Высокая скорость диффузии ионов при  $T > 500$  °C способствует формированию чистых оксидов во время разрастания кристаллитов. Авторы [9] делают вывод о том, что разложение доломита – топотактический процесс, не зависящий от давления CO<sub>2</sub>. Формирование нанокристаллов Mg-кальцита во время так называемого полуразложения наблюдается при температурах 650–750 °C. Эта переходная фаза сформирована топотактически после протекания реакции между нанокристаллами CaO (твёрдый раствор с ~9 mol% Mg) и CO<sub>2</sub>, присутствующим в атмосфере. С увеличением температуры Mg-кальцит трансформируется в кальцит, который проходит через топотактические отношения  $\{10\bar{1}4\}_{\text{calcite}} // \{110\}_{\text{CaO}}$  и  $\{441\}_{\text{calcite}} // \{110\}_{\text{CaO}}$ . Данные наблюдения, по мнению авторов [9], разрешают споры по механизму двустадийного разложения доломита, который обычно предполагает прямое формирование кальцита при полуразложении доломита.

В [10] проведено двумерное моделирование процесса кальцинации (разложения) известняка. Там рассматривали вертикальный трубчатый реактор, через который просыпали измельченный известняк. Проводили сравнение расчета с экспериментальными данными. В модели кальцинации учитывали три взаимно лимитирующих процесса:

- а) передачу теплоты частице;
- б) перенос CO<sub>2</sub> от внутренней части частиц за пределы частицы и пористого слоя вокруг нее;
- в) кинетику химической реакции.

Давление CO<sub>2</sub> в реакции (равновесное давление) оценивали согласно [11]:

$$p_{eq} = 4,137 \cdot 10^{12} \exp\left(-\frac{20474}{T}\right), \text{ Па};$$

$$k_{ch} = 1,22 \exp\left(-\frac{4026}{T}\right) \cdot 10^{-5} \left(p_{eq} - p_{CO_2} \frac{A_{por}}{A_{geom}}\right), \text{ моль/м}^2/\text{с},$$

где  $A_{por}/A_{geom}$  – эффективная площадь поверхности частицы (с учетом пористости) по отношению к площади внешней поверхности частицы (сферы).

В [10] проиллюстрировано влияние  $p_{\text{CO}_2}$  на скорость кальцинации исходя из вышеуказанной модели. Физическая скорость разложения известняка выражалась с учетом диффузионного ограничения скорости транспортирования  $\text{CO}_2$  [12]

$$k_{ph} = \frac{12DSh}{R_{\text{CO}_2} d_0 T} p_{ref}, \text{ кг/м}^2/\text{с}.$$

Здесь  $R_{\text{CO}_2}$  – газовая постоянная для  $\text{CO}_2$ , Дж/кг/К. Предполагается, что давление  $p_{\text{CO}_2}$  высоко и, так же как  $p_{ref}$ , близко к давлению окружающей среды. Следуя [12], число Шервуда принято постоянным ( $Sh = 2$ ) ввиду малости размера частиц. Коэффициент диффузии с учетом обычной и кнудсеновской частей строится [13]:  $D = [1/D_{bin} + 1/D_{knu}]^{-1}$ . В конечном итоге скорость кальцинации выражалась формулой

$$k_{res} = [1/r_{ph} + 1/\eta\tilde{r}_{ch}]^{-1}, \text{ кг/м}^2/\text{с},$$

где  $\eta$  – безразмерный коэффициент эффективности пор в химической реакции;  $\tilde{r}_{ch}$  – скорость химической реакции, приведенная к размерности кг/м<sup>2</sup>/с.

Все параметры модели брались из соответствующих печатных работ. В модели так или иначе (через полуэмпирические формулы) учтено большое количество структурных и теплофизических факторов: пористость, размер пор, извилистость каналов, эффективное увеличение площади поверхности частицы, распределение частиц по диаметрам, кнудсеновский перенос, число Шервуда, задан относительный размер пор и др. При этом модельные параметры задавались относительно произвольно и настраивались в процессе расчета реального процесса. Модель ориентировалась и настраивалась на расчет кальцинации мелких частиц (5–50 мкм).

Данные эксперимента, по которым тестировалась модель, имели большую погрешность, что уменьшало возможность анализа ее точности и достоверности. С другой стороны, зависимости от основных изменяемых параметров, представляющих интерес, являлись достаточно регулярными и предсказуемыми (по крайней мере, в рассмотренном диапазоне изменения этих параметров). В связи с этим встает вопрос о целесообразности введения в модель излишне большого количества физических параметров. К этому же выводу подталкивает и сравнение экспериментальных данных с близкой по сути (но вводящей дополнительные подмодели трансформации пористости частиц во время кальцинации) моделью [14]. Из приведенных в [10] графиков видно, что детализация модели, скорее, ухудшает совпадение с экспериментом, нежели улучшает его. Кроме того, следует учитывать, что минеральное сырье разных партий и производителей отличается по своему составу.

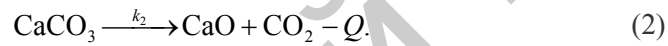
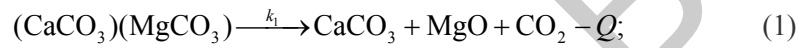
Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод о том, что создание громоздких ab initio моделей разложения кальцита, доломита и сходных систем, учитывающих большое количество физических параметров, не оправдано, особенно для практических инженерных расчетов. Целесообразным является использование относительно упрощенных макрокинети-

ческих моделей и универсальных методик восстановления эффективной макрокинетики для заданных образцов материалов. Такая методика может базироваться на стандартных термогравиметрических измерениях и соответствующих моделях и алгоритмах обработки данных.

Макрокинетическая модель может быть достаточно простой, но при этом она должна учитывать скорость как химических, так и физических процессов эвакуации газообразных продуктов из зоны химического реагирования.

В данной статье сформулированы четыре макрокинетики модели, которые могут быть использованы как базовые для восстановления макрокинетики в рамках указанного выше подхода. Тестирование таких моделей на основе ТГ-экспериментов должно позволить сделать вывод о физических особенностях макрокинетики процесса термического разложения доломита.

**Описание модели.** Стандартная укрупненная схема термического разложения доломита имеет вид [15]:



Брутто-реакцию можно записать



В случае кинетического предела протекания реакции кинетическая модель термического разложения может быть записана следующим образом:

$$\frac{dm_1}{dt} \equiv \dot{m}_1 = m_1 k_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right); \quad (4)$$

$$\frac{dm_2}{dt} \equiv \dot{m}_2 = m_2 k_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \quad (5)$$

где  $m_i$  – масса исходного компонента;  $k_i$ ,  $E_i$  – предэкспонент и энергия активации реакции;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Константы данных уравнений могут быть восстановлены исходя из термогравиметрических данных с использованием стандартных алгоритмов и методик. Выше отмечалось, что скорость разложения доломитов существенно зависит от дисперсности материала. Представляется правдоподобным, что именно дисперсность материала и связанные с ней особенности эвакуации газообразных продуктов реакции играют определяющую роль в общей макрокинетики разложения доломита.

Простейшая модель диффузионно-ограниченной макрокинетики предполагает, что время протекания процесса складывается из времени химического превращения и времени диффузии лимитирующих компонентов к поверхности или объему протекания химической реакции

$$\tau = \tau_{kin} + \tau_D. \quad (6)$$

Соответствующая константа скорости может быть записана как

$$k = \frac{1}{1/k_{kin} + l^2/D}, \quad (7)$$

где  $k_{kin}$  – константа скорости химической реакции;  $l$  – длина диффузии лимитирующих компонентов, оцениваемая размером частицы доломита;  $D$  – эффективный коэффициент диффузии лимитирующих компонентов, являющийся неизвестным параметром модели.

Эффективное кинетическое уравнение уменьшения массы твердой фазы принимает вид

$$\frac{dm}{dt} \equiv \dot{m} = -\frac{mk \exp(-E/RT)}{1 + (l^2/D)k \exp(-E/RT)}. \quad (8)$$

С физической точки зрения, непосредственно газовая диффузия не может накладывать ограничение на скорость разложения, поскольку само разложение проходит по реакции нулевого порядка по давлению и не требует подвода лимитирующих химических компонент. При этом задержка эвакуации  $\text{CO}_2$  из внутреннего объема частиц доломита может привести к смещению равновесия в сторону первичного реагента с повышением давления  $\text{CO}_2$  (принцип Ле-Шателье)

$$\dot{m} = m [k \exp(-E/RT) - \tilde{k} p_{\text{CO}_2} \exp(-\tilde{E}/RT)], \quad (9)$$

где  $p_{\text{CO}_2}$  – давление  $\text{CO}_2$  внутри частицы.

Очевидно, что давление неодинаково по объему частицы, однако для упрощения модели ограничимся одним эффективным его значением. С использованием представления о константе равновесия (детальный баланс) запишем

$$\dot{m} = mk \exp(-E/RT) [1 - p_{\text{CO}_2}/(p_{\text{CO}_2})_0], \quad (10)$$

где  $(p_{\text{CO}_2})_0$  – равновесное давление  $\text{CO}_2$ , выражаемое через константу равновесия  $(p_{\text{CO}_2})_0 = K_p$ .

Константа равновесия может быть определена из условия нулевой вариации энергии Гиббса системы с использованием данных об энтропии и энтальпии исходных реагентов и продуктов реакции в стандартных условиях (табл. 1)

$$\ln K_p = -\Delta H_0/(RT) + \Delta S_0/R. \quad (11)$$

Таблица 1

Стандартные теплота и энтропия образования реагентов реакций (1), (2)

Реагент	$\Delta H_{298}$ , кДж/моль	$\Delta S_{298}$ , Дж/(моль · К)
$\text{MgCO}_3$	-1113,00	65,70
$\text{CaCO}_3$	-1206,90	92,90
$\text{CaO}$	-635,50	40,08
$\text{MgO}$	-601,83	26,78
$\text{CO}_2$	-393,51	213,64

Для реакции (1):  $\Delta S^0 = 335,54$  Дж/(моль · К),  $\Delta H^0 = -295,5$  кДж/моль,

$$K_{p1} = 3,44 \cdot 10^{17} \exp(-295500/RT). \quad (12)$$

Для реакции (2):  $\Delta S^0 = 160,82$  Дж/(моль · К),  $\Delta H^0 = 177,84$  кДж/моль,

$$K_{p2} = 2,53 \cdot 10^8 \exp(-177840/RT) = (p_{\text{CO}_2})_0. \quad (13)$$

Можно предположить, что эвакуация  $\text{CO}_2$  из объема частицы может происходить по механизмам диффузии и фильтрации. В первом случае применяется модель (8). В качестве варианта модели в коэффициент диффузии могут быть введены простейшие поправки на температуру и общее давление

$$D = D_0 T^{3/2} / p. \quad (14)$$

При заметном превышении общего давления во внутривещном пространстве частицы физический механизм эвакуации сменяется с диффузионного на фильтрационный. Поэтому учитывать изменение общего давления во внутривещном пространстве в рамках диффузионной модели эвакуации  $\text{CO}_2$  некорректно

$$\dot{m} = - \frac{mk \exp(-E/RT)}{1 + (l^2/D_0/T^{3/2})k \exp(-E/RT)}. \quad (15)$$

В случае фильтрационной эвакуации  $\text{CO}_2$  полагаем, что выполняется закон Дарси. Тогда массовая скорость эвакуации  $\text{CO}_2$  может быть записана как

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = \chi \nabla p A \approx \chi \frac{p}{l} A, \quad (16)$$

где  $\chi$  – коэффициент фильтрации, зависящий от свойств материала твердой матрицы;  $A$  – характерная площадь поверхности пористой среды;  $l$  – характерная длина фильтрации.

Ввиду того что удельная поверхность обратно пропорциональна характерному размеру пористой среды  $S_{\text{уд}} \sim 1/l$ , справедливо равенство

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = a m \chi \frac{p}{l^2}, \quad (17)$$

где  $a$  – численный коэффициент.

Имея в виду, что  $\dot{m}_{\text{CO}_2} = -\dot{m}$ , из (10) и (17) следует

$$\dot{m} = -mk \exp(-E/RT) [1 - p_{\text{CO}_2}/(p_{\text{CO}_2})_0] = -am \chi p_{\text{CO}_2} / l^2. \quad (18)$$

Рассмотрим два случая характерных давлений  $\text{CO}_2$  при эвакуации.

Случай I:  $p_{\text{CO}_2} \ll (p_{\text{CO}_2})_0$ . Тогда из (18) следует

$$p_{\text{CO}_2} = k \exp(-E/RT) (l^2 / a \chi). \quad (19)$$

При этом реализуется следующая макрокинетическая модель разложения:

$$\dot{m} = -\frac{mk \exp(-E/RT)}{1 + [(l^2/a\chi)/(p_{\text{CO}_2})_0]k \exp(-E/RT)}. \quad (20)$$

Как видно, модель (20) структурно близка к выражению для скорости реакции в случае диффузионно-ограниченной кинетики (8) и (15). По сравнению с ними модель (20) отличается дополнительной зависимостью знаменателя от равновесного давления  $\text{CO}_2$ .

Случай II. Пусть  $p_{\text{CO}_2} \approx (p_{\text{CO}_2})_0$ , тогда выполняется  $1 - p_{\text{CO}_2}/(p_{\text{CO}_2})_0 = \delta p/(p_{\text{CO}_2})_0$  и из (17) следует

$$\frac{\delta p_{\text{CO}_2}}{(p_{\text{CO}_2})_0} = \frac{a\chi(p_{\text{CO}_2})_0/l^2}{k_1 \exp(-E_1/RT)}.$$

В этом случае справедлива другая макрокинетическая модель разложения

$$\dot{m} = -am\chi(p_{\text{CO}_2})_0/l^2. \quad (21)$$

Таким образом, сформулированы четыре макрокинетические модели разложения доломита (8), (15), (20) и (21) с диффузионной и фильтрационной эвакуациями  $\text{CO}_2$ . Адекватность данных моделей необходимо проверить экспериментально.

## ВЫВОДЫ

1. Проанализированы особенности ряда моделей термического разложения доломита и кальцита, представленных в литературе. Сделан вывод о целесообразности создания компактных инженерных макрокинетических моделей разложения доломита и универсальных методов восстановления параметров этих моделей для конкретных образцов доломита. Такие методы могут основываться на термогравиметрических данных и стандартизированных алгоритмах минимизации погрешности аппроксимации.

2. Сделано предположение, что эвакуация  $\text{CO}_2$  из зоны реагирования может происходить по механизму диффузии и/или фильтрации Дарси. При этом функциональная зависимость скорости термического разложения от размеров частиц и температуры различна. Сформулированы четыре макрокинетические модели, адекватность которых следует проверять на основе экспериментальных данных.

3. Дальнейшая работа в этом направлении должна включать получение данных термогравиметрии для образцов доломита и выбор модели, наилучшим образом описывающей экспериментальные данные во всем практически важном диапазоне температур, скоростей разложения, гранулометрического состава доломита. Эти данные позволят также сделать вывод о физических механизмах эвакуации газа из частиц доломита.

## ЛИТЕРАТУРА

1. M o h a m m e d, M. A. A., Salmiaton, A., Wan Azlina, W. A. K., Mohamad Aman, G. M. S., & Taufiq-Yap, Y. H. (2013) Preparation and Characterization of Malaysian Dolomites as a Tar Cracking Catalyst in Biomass Gasification Process. *Journal of Energy*, Vol. 2013, Article ID 791582. Doi: 10.1155/2013/791582.



2. H u, G., Xu, S., Li, S., Xiao, C., & Liu, S. (2006) Steam Gasification of Apricot Stones with Olivine and Dolomite as Downstream Catalysts. *Fuel Processing Technology*, 87 (5), 375–382. Doi: 10.1016/j.fuproc.2005.07.008.
3. Y u, Q. Z., Brage, C., Nordgreen, T., & Sjöström, K. (2009) Effects of Chinese Dolomites on tar cracking in Gasification of Birch. *Fuel*, 88, 1922–1926. Doi: 10.1016/j.fuel.2009.04.020.
4. P é r e z, P., Aznar, M.P., Caballero, M.A., Gil, J., Martín, J.A., & Corella, J. (1997). Hot Gas Cleaning and Upgrading with a Calcined Dolomite Located Downstream a Biomass Fluidized Bed Gasifier Operating with Steam-Oxygen Mixtures. *Energy and Fuels*, 11 (6), 1194–1197. Doi: 10.1021/ef970046m.
5. M y r e n, C., Hornell, C., Bjornbom, E., & Sjoström, K. (2002) Catalytic Tar Decomposition of Biomass Pyrolysis Gas with a Combination of Dolomite and Silica. *Biomass and Bioenergy*, 23 (3), 217–237. Doi: 10.1016/S0961-9534(02)00049-1.
6. H a n, J., & Kim, H. (2008) The Reduction and Control Technology of Tar During Biomass Gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (2), 397–416. Doi: 10.1016/j.rser.2006.07.015.
7. R o d r i g u e z-N a v a r r o, C., Ruiz-Agudo, E., Luque, A., Rodriguez-Navarro, A. B., & Ortega-Huertas, M. (2009) Thermal Decomposition of Calcite: Mechanisms of Formation and Textural Evolution of CaO Nanocrystals. *American Mineralogist*, 94, 578–593. Doi: 10.2138/am.2009.3021.
8. W i l b u r n, F. W., & Sharp, J. H. (1993) The Bed-Depth Effect in the Thermal Decomposition of Carbonates. *Journal of Thermal Analysis*, 40, 133–140. Doi: 10.1007/BF02546563.
9. R o d r i g u e z-N a v a r r o, C., Kudlacz, K., & Ruiz-Agudo, E. (2012) The Mechanism of Thermal Decomposition of Dolomite: New Insights From 2D-XRD and TEM Analyses. *American Mineralogist*, 97 (1), 38–51. Doi: 10.2138/am.2011.3813.
10. M i k u l i č i ć, H., von Berg, E., Vujanović, M., Priesching, P., Perković, L., Tatschl, R., & Duić, N. (2012) Numerical Modeling of Calcination Reaction Mechanism for Cement Production. *Chemical Engineering Science*, 69 (1), 607–615. Doi: 10.1016/j.ces.2011.11.024.
11. S i l c o x, G. D., Kramlich, J. C., & Pershing, D. W. (1989) A Mathematical Model for the flash Calcination of Dispersed CaCO<sub>3</sub> and Ca(OH)<sub>2</sub> Particles. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 28 (2), 155–160.
12. S c h n e i d e r, M. (2003) *Experimentelle und Mathematische Modellierung der Festbettvergasung am Beispiel der Gleichstromvergasung von Holzhackschnit-Zeln*. Ph.D. Thesis. TU. Dresden (German).
13. K e r n, C., & Jess, A. (2006) Verkokung und Koksabbrand in Heterogenen Katalysatoren [Coking and Coke Burn Off in Heterogeneous Catalysts]. *Chemie-Ingenieur-Technik*, 78 (8), 1033–1048. Doi: 10.1002/cite.200600051 (German).
14. M o h r, M. (2001) *Numerische Simulation der Simultanen Reaktion von Kalkstein und Kohle Bei der Zementherstellung*. Ph.D. Thesis. Bochum, University of Ruhr. (German).
15. M c i n t o s h, R. M., Sharp, J. H., & Wilburn, F. W. (1990) The Thermal Decomposition of Dolomite. *Thermochimica Acta*, 165 (2), 281–296. Doi: 10.1016/0040-6031(90)80228-Q.

Представлена кафедрой ПТ и Т

Поступила 25.05.2015

УДК 621.187.132 (088.8)

## ИНВАРИАНТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПИТАНИЯ БАРАБАННОГО ПАРОВОГО КОТЛА

Докт. техн. наук, проф. КУЛАКОВ Г. Т.<sup>1)</sup>, асп. КУХОРЕНКО А. Н.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет,

<sup>2)</sup>Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

E-mail: ank-17@ya.ru

На качество переходных процессов изменения уровня воды в барабане котла при основных воздействиях существенное влияние оказывает выбор структуры системы регулирования, закона регулирования и оптимальных параметров динамической