

Б.В.Гавриленко, доц., к.т.н., С.В.Неежмаков, доц., к.т.н.
Донецкий Национальный Технический Университет, г. Донецк, Украина

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТОПКИ КИПЯЩЕГО СЛОЯ ШАХТНОГО ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ ДЛЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Разработана математическая модель топki кипящего слоя шахтного автономного воздухоподогревателя. Найденные зависимости позволили получить переходные характеристики топki при переменных параметрах топлива и режимах работы. Проведенные исследования дают возможность перейти к синтезу системы автоматического управления топкой кипящего слоя.

Розроблено математичну модель топki киплячого шару шахтного автономного повітропідігрівника. Знайдені залежності дозволили одержати перехідні характеристики топki при змінних параметрах палива й режимах роботи. Проведені дослідження дають змогу перейти до синтезу системи автоматичного управління топкою киплячого шару.

The mathematical model of a furnace of a fluidized bed of a mine independent air heater is designed. The retrieved relations have allowed to receive surge characteristics of a furnace at variable parameters of fuel and operational modes. The conducted researches allow to proceed to synthesis of an automatic control system of a spongy fluidized bed.

Постановка проблемы и ее связь с научными и практическими задачами. В настоящее время весьма актуальна проблема экономии энергетических ресурсов, и одним из вариантов ее решения является использование нетрадиционных технологий, например таких, как сжигание высокозольного твердого топлива в низкотемпературном кипящем слое (НТКС). В частности, топка НТКС может быть использована как источник теплоносителя для автономного газозвоздушного воздухоподогревателя, предназначенного для обогрева ствола в зимний период [1]. Однако одним из сдерживающих факторов внедрения подобных установок является несовершенство системы автоматизированного управления данным технологическим объектом, которая представляет собой ряд обособленных контуров управления, выполненных на основе устаревших регуляторов типа Р-25. Одним из необходимых условий для синтеза качественно новой системы автоматизации является установление математических зависимостей топki кипящего слоя.

Состояние вопроса и анализ основных исследований. К настоящему времени имеется значительное количество работ, посвященных данной

тематике. Обзор и анализ исследований, выполненных до 1989 года [2], а также более поздних работ [3,4,5] позволили выявить следующие недостатки существующих математических моделей:

- предполагается известной величина массового расхода топлива, тогда как в настоящее время технически реализуемо только объемное дозирование;
- параметры топлива: зольность, влажность, распределение частиц топлива по размерам предполагают заранее известными и для получения динамических характеристик системы необходимо производить каждый раз новый цикл вычислительных операций;
- не учитывается наличие термического разрушения и механического истирания частиц топлива в кипящем слое;
- сложность корректировки параметров модели при получении новых экспериментальных данных или ее использования для различных марок топлива ограничивает область применения полученных зависимостей.

В случае рассмотрения топки как объекта автоматизации в первую очередь вызывают интерес динамические свойства системы, которые далее используются для управления. При традиционном подходе к рассмотрению данного вопроса скорость отклика объекта на динамические возмущения оценивается с помощью уравнения теплового баланса [2]:

$$\frac{dT_{cl}}{dt} S_{cl} \rho_{cl} c_{cl} H = j_T Q_T S_{cl} (1 - q_3 - q_4) - S_{cl} \rho_g c_g U_o (T_{cl} - T_o) - I_3 - I_L, \quad (1)$$

где c_g, c_{cl} – теплоемкость газа и материала слоя;

ρ_g, ρ_{cl} – плотность газа и насыпная плотность материала слоя;

S_{cl} – площадь зеркала горения;

H_{cl} – высота слоя ;

T_{cl}, T_o – температура слоя и газа;

Q_T – теплота сгорания топлива;

j_T – расход топлива на 1 м² площади зеркала горения, (кг/м²*с);

U_o – скорость газа через слой;

q_3, q_4 – доля химического и механического недожога;

I_3, I_L – потери теплоты с отводимой золой и излучением.

Однако такой подход имеет целый ряд недостатков:

- величины c_g и c_{cl} при изменениях T_{cl} в пределах существования слоя не являются константами, а следовательно имеет смысл вместо теплоемкостей пользоваться удельными энтальпиями;
- расход теплоты при прогреве твердого топлива не учитывается;
- при определении теплоты, выносимой из слоя смесью газов, не учитывается химический состав поступающей в слой и исходящей из слоя смеси;
- массовое дозирование топлива возможно только в лабораторных условиях, а в реальных условиях применимо лишь объемное дозирование;

- при изменении расхода топлива не учитывается, что мгновенное значение теплоты, получаемое от сгорания, существенно зависит от его гранулометрического состава.

Цель исследований и задачи. Таким образом, целью работы является синтез на основе существующих аналитических зависимостей математической модели топки НТКС с решением следующих задач:

- учет особенностей технологического оборудования и условий окружающей среды;
- возможность изменения основных характеристик топлива непосредственно в процессе моделирования как в ручную, так и по заранее заданному алгоритму.

Изложение основного материала. С учетом рассмотренных выше недостатков разработана структура математической модели топочного пространства на основе метода декомпозиции, представленная на рис 1. Объемный расход твердого топлива V_u с учетом текущих значений зольности A , влажности W и долей углей двух разных марок d_1 и d_2 приводится к массовым значениям расхода поступающих в кипящий слой влаги G_{H_2O} , породы G_p и горючей составляющей топлива G_{tt} .

Предполагается, что все поступающие в слой частицы имеют полидисперсный состав с крупностью, подчиняющейся нормальному закону распределения, переменной составляющей которого является математическое ожидание эквивалентного диаметра частиц D_{mo} [6]. Материал распределяется по n -му числу элементарных ячеек D с допущением, что в пределах одной ячейки частицы имеют одинаковые геометрические размеры и константы химических реакций для стадий разогрева, выхода летучих и выгорания коксового остатка, соответственно. Структура каждой элементарной ячейки одинакова, что легко позволяет производить при необходимости увеличение числа ячеек для повышения точности расчетов. Частицы коксового остатка по мере выгорания и уменьшения геометрических размеров переходят в ячейки с меньшим диаметром. Выходными характеристиками в модели являются текущая температура кипящего слоя T_{ks} и объем газозоудаления смеси на выходе из слоя V_{ks} .

При моделировании топочных процессов принимаются следующие допущения:

- масса инертного материала M_{ks} , находящегося в слое, является постоянной величиной, с учетом непрерывно работающей системы золоудаления;
- исходящая из слоя смесь газов имеет температуру, равную T_{ks} [7];
- коэффициент избытка воздуха поддерживается системой автоматического управления в пределах, достаточных для полного выгорания летучих и коксового остатка;

- все изменения параметров частиц происходят скачкообразно при переходах между ячейками;
- выгорание коксового остатка происходит во внутридиффузионной области [5];
- при работе котлоагрегата НТКС возможен переход с одной марки топлива на другую с изменением основных параметров (зольности, влажности и т.д.).

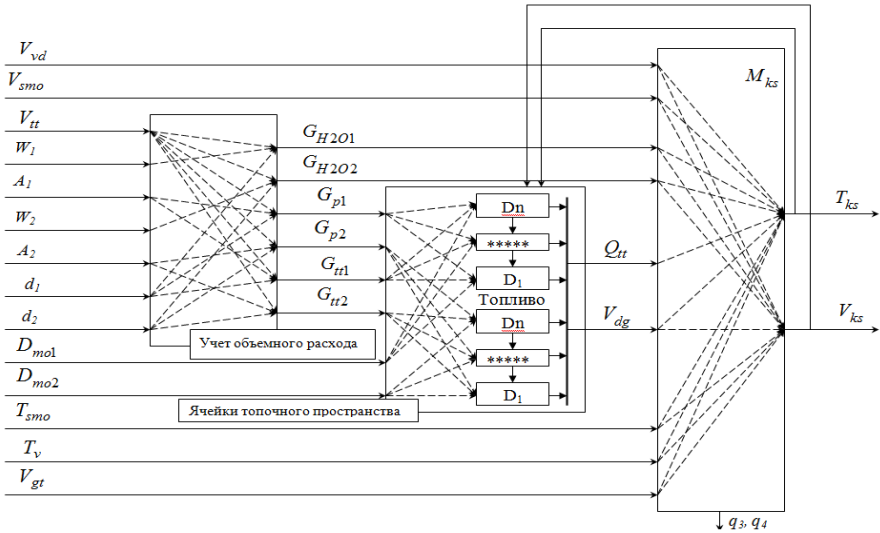


Рис. 1. Структура модели топочного пространства

Исходя из изложенного, уравнение теплового баланса имеет вид:

$$\frac{dI_z}{dt} M_{ks} = Q_{gt} + Q_v + (Q_{T1} + Q_{T2})(1 - q_3 - q_4) - Q_{Tn1} - Q_{Tn2} - Q_{Tm1} - Q_{Tm2} - Q_{H2O} - Q_{d1} - Q_{d2} - Q_{dgt} - Q_{vo} \quad (2)$$

где I_z – удельная энтальпия инертного материала слоя, ккал/кг.

В свою очередь, зависимость $T_{ks} = f(I_z)$ при моделировании задается массивом данных

Рассмотрим последовательно все составляющие правой части выражения (2).

Количество теплоты в единицу времени – Q_{gt} , получаемое от сгорания жидкого топлива при розжиге:

$$Q_{gt} = V_{gt} \cdot \rho_{gt} \cdot Q_{gt}^n, \quad (3)$$

где V_{gt} – объемный расход жидкого топлива, м³/с;

ρ_{gt} – плотность жидкого топлива кг/м³;

Q_{gt}^n - низшая теплота сгорания жидкого топлива, ккал/кг.

Количество теплоты в единицу времени - Q_v , вносимое в топку дутьевым воздухом:

$$Q_v = I_v(T_v) \cdot Q_{dv} \cdot \frac{273}{273 + T_v}, \quad (4)$$

где T_v - температура дутьевого воздуха, гр. С;

Q_{dv} - производительность дутьевого вентилятора, м³/с;

I_v - удельная энтальпия воздуха, $I_v = f(T_v)$ - массив данных.

Количество теплоты в единицу времени Q_{T1} и Q_{T2} , вносимое в топку при сгорании сухой горючей массы топлив 1 и 2, соответственно, и, аналогично, Q_{Tn1} и Q_{Tn2} - количество теплоты, забираемое при нагреве этих масс до температуры слоя.

Подробнее рассмотрим определение величин Q_{T1} и Q_{Tn1} . Для величин Q_{T2} , и Q_{Tn2} алгоритм определения будет аналогичным. С целью упрощения выражений индексы топлив 1 и 2 опущены для всех переменных, кроме d_{i1} и d_{i2} - объемных долей соответствующих топлив в производительности забрасывателя. Первоначально определяется массовый расход сухой горючей составляющей топлива, кг/с:

$$G_{it} = \rho_u \cdot V_{it} \cdot d_{i1} \cdot \left(1 - \frac{0,01 \cdot A_p \cdot \rho_u}{\rho_p - 0,01 \cdot A_p \cdot \rho_p + 0,01 \cdot A_p \cdot \rho_u} \right), \quad (5)$$

где ρ_u - плотность сухой горючей массы;

ρ_p - плотность породы;

V_{it} - объемная производительность забрасывателя м³/с;

ρ_n - насыпная плотность (0,7).

При моделировании предполагается, что сухая горючая масса распределяется по ряду ячеек, каждая из которых соответствует определенному диапазону диаметров частиц $D_{max}, \dots, D_j, \dots, D_{min}$. Нумерация ячеек производится начиная с минимального диаметра. Текущий массовый расход для j-той ячейки определяется согласно нормальному закону распределения, как:

$$G_{ij} = G_{it} \frac{\int_{D_{j+1}}^{D_j} F(D, D_{mo}) dD}{\int_{D_{min}}^{D_{max}} F(D, D_{mo}) dD}, \quad (6)$$

где $F(D, D_{mo})$ - функция распределения частиц по диаметрам:

$$F(D, D_{mo}) = \frac{1}{\sigma_D \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(D - D_{mo})^2}{2 \cdot \sigma_D^2}}, \quad (7)$$

Во время нахождения в j -ой ячейке частицы последовательно проходят следующие стадии: прогрев до температуры слоя, выход и горение летучих, выгорание коксового остатка до эквивалентного расчетного диаметра частиц D_{rj-1} , после чего происходит переход коксового остатка в ячейку $j-1$ [2].

Отбор теплоты на прогрев горючей массы из j -той ячейки и получение теплоты от горения летучих и коксового остатка определяются из выражений:

$$Q_{Tnj} = \frac{\int_{t-\tau_{rj}}^t G_{Tj}(t) dt}{\tau_{rj}} \cdot I_{in}, \quad (8)$$

$$Q_{Tj} = \left(\int_{t-\tau_{lj}}^t \frac{k_{vl} \cdot G_{Tj}(t-\tau_{rj})}{\tau_{lj}} dt + \left[\begin{aligned} & \left[G_{Tj}(t-\tau_{rj}-\tau_{lj}-\tau_{gj}) \cdot \right. \\ & \left. \cdot (1-d_r(j)) \cdot (1-d_i(j)) \right] + \\ & + \left[\sum_{j_{\max}}^{b=j+1} \left(G_{Tb}(t-\tau_{rb}-\tau_{lb}-\tau_{gj}) \cdot \right) \cdot \right. \\ & \left. \cdot d_r(b) \right] \cdot \left[\cdot d_r(j) \right] + \\ & + \left(\left[G_{Tb}(t-\tau_{rb}-\tau_{lb}-\sum_b^{c=j+1} \tau_{gb}) \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. \cdot (1-d_r(b)) \cdot \prod_b^{c=j+1} ((1-d_i(c)) \cdot kum(c)) \right] \right) \cdot \left[\frac{(1-k_{vl}) \cdot (d_i(j)) \cdot kum(j)}{\tau_{gj}} \right] dt \\ & + \left(\left[G_{Tb}(t-\tau_{rb}-\tau_{lb}-\sum_b^{c=j+2} \tau_{gb}) \cdot \right. \right. \\ & \left. \left. \cdot (1-d_r(b)) \cdot d_i(c) \cdot \prod_b^{c=j+2} (d_i(c)) \cdot kum(c) \right] \right) \end{aligned} \right] \cdot Q_{ng}$$

где $\tau_{rj}, \tau_{lj}, \tau_{gj}$ - время пребывания частиц в каждой из стадий, значения задаются в виде массива данных по результатам

экспериментальных исследований [2,8] и могут быть в дальнейшем скорректированы без изменения структуры модели;

Q_{ng} - низшая теплота сгорания в пересчете на сухую горючую массу;

k_{vl} - коэффициент выхода летучих;

d_n и d_{is} - доли частиц, подвергнувшихся терморазложению и механическому излому (истиранию) [4];

d_r - доля поступивших в ячейку измельченных частиц.

$kum(i, j)$ - коэффициент убывания массы материала при переходе i -того коксового остатка в j -тую ячейку.

При проведении моделирования с шагом времени Δt для любого материального G_k потока на выходе из ячейки в текущий момент времени добавим с целью дальнейших преобразований множитель:

$$G_k(t) = G_k(t) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t} \quad (10)$$

Учитывая динамически изменяющиеся величины $\tau_{rj}, \tau_{lj}, \tau_{gj}$ и условие неразрывности всех используемых материальных потоков при переходах от одной ячейки к другой, справедливо для последующей ячейки G_v :

$$G_v(t) = G_k(t) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t} - G_k(t) \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta t} \quad (11)$$

Шаг моделирования и количество ячеек обеспечивают выполнение условия $\Delta t \gg \Delta \tau$, что позволяет произвести преобразование выр. (11):

$$G_v(t) \approx G_k(t) - G_k(t) \cdot \frac{d\tau}{dt} \quad (12)$$

В выражении (12) опущены коэффициенты убывания массы и выхода летучих для переходов между ячейками на соответствующих стадиях. Корректность принятого решения подтверждается тем, что при исследованиях математической модели топочного пространства материальный небаланс при величинах модельного времени до 7200 с не превысил 0,3%.

Далее определяется $Q_T = \sum Q_{Tj}$ и так далее для Q_{T2}, Q_{Tn1} и Q_{Tn2} .

Q_{Tn1} и Q_{Tn2} - количество тепла в единицу времени, отбираемое из топки на прогрев породы, определяются аналогично Q_{Tn1} и Q_{Tn2} .

Q_{H2O} - количество тепла в единицу времени, отбираемое из топки на испарение и прогрев до температуры слоя содержащейся в топливе влаги. При этом предполагается, что данный процесс происходит мгновенно после попадания топлива в слой.

$Q_{d1}, Q_{d2}, Q_{dgt}, Q_{vo}$ - количество тепла в единицу времени, отбираемое из топки продуктами горения твердых и жидкого топлив, а также не

прореагировавшим остатком дутьевого воздуха. С учетом того, что массы выгорающих в единицу времени топлив известны, определение значений $Q_{d1}, Q_{d2}, Q_{dgr}, Q_{vo}$ не составляет сложности.

Таким образом, имеется возможность определения из выражения [2] текущей энтальпии слоя, а следовательно, и его температуры, т.е. основного технологического параметра. Предложенная математическая модель реализована в прикладном пакете MATLAB.

Результаты исследований. Экспериментальная проверка адекватности модели топки НТКС проведена в промышленных условиях. Эксперименты по исследованию динамических свойств объекта управления выполнены в условиях котельной установки шахты 4-21 ГП «Шахтоуправление «Южнодонецкое» №1» (г. Донецк)

Экспериментальные характеристики изменения температуры НТКС при ступенчатых воздействиях по производительности забрасывателя и дутьевого вентилятора соответственно представлены на рис. 2 и 3.

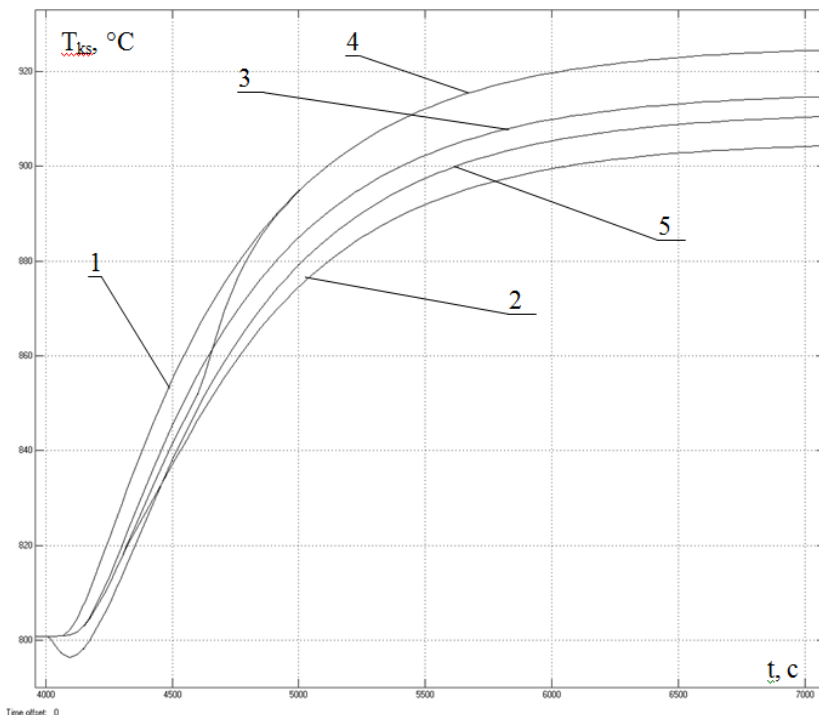


Рис. 2. Изменения температуры НТКС при ступенчатом воздействии по производительности забрасывателя $\Delta V_{it} = +0,04 \text{ м}^3/\text{ч}$ при эксперименте (хар-ки 1 – 4) и моделировании (хар-ка 5)

Исследования выполнялись при следующих номинальных значениях параметров технологического объекта:

- температура воздуха T_v , °C -8;
- начальная температура НТКС T_{ks} , °C 800;
- начальный объемный расход твердого топлива V_{tr} , м³/ч 0,29;
- изменение объемного расхода твердого топлива ΔV_{tr} , м³/ч +0,04;
- начальный объемный расход дутьевого воздуха V_{vd} , м³/с 1,0;
- изменение объемного расхода дутьевого воздуха ΔV_{vd} , м³/с -0,2;
- низшая теплота сгорания твердого топлива Q_n , ккал/кг 4060;
- влажность твердого топлива W , % 4;
- зольность твердого топлива A , % 40.

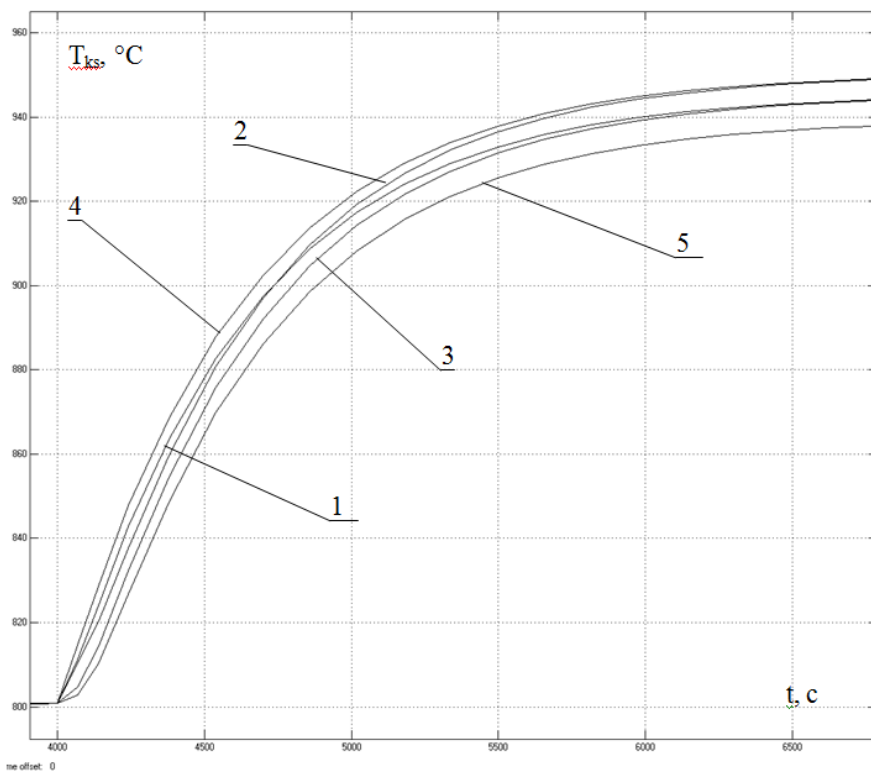


Рис. 3. Изменения температуры НТКС при ступенчатом воздействии по производительности дутьевого вентилятора $\Delta V_{vd} = -0,2$ м³/с; при эксперименте (хар-ки 1 – 4) и моделировании (хар-ка 5).

Сдвиг по времени в 4000 с обусловлен обработкой в математической модели котлоагрегата процесса розжига. Дисперсии воспроизводимости и неадекватности составили $\sigma_{y1}^2=89,68^\circ\text{C}$, $\sigma_{y2}^2=23,79^\circ\text{C}$, $\sigma_{n1}^2=37,00^\circ\text{C}$, $\sigma_{n2}^2=73,21^\circ\text{C}$, а сравнение с табличным значением критерия Фишера:

$$F_1 = \frac{\sigma_{n1}^2}{\sigma_{y1}^2} = 4,01 < 4,49, \quad F_2 = \frac{\sigma_{n2}^2}{\sigma_{y2}^2} = 3,08 < 4,49.$$

Таким образом, разработанная модель топки низкотемпературного кипящего слоя при уровне доверительной вероятности 0,95 адекватна реальным процессам в котлоагрегате.

Выводы. Разработанная математическая модель позволяет использовать разработанную математическую модель топки НТКС для идентификации динамических характеристик объекта управления, в том числе и по параметрам, не поддающимся измерению при используемой в настоящее время системе отбора информации, а также осуществить синтез системы автоматического управления топочными процессами.

1. Ж.В. Вискин и др. Сжигание угля в кипящем слое и утилизация его отходов. – Донецк: «Новый мир», 1997 г. – 284 с.
2. Махорин К.Е., Хинкис П.А. Сжигание топлива в псевдооживленном слое. –К.: Наукова думка, 1989. – 204 с.
3. Корчевой Ю.П., Пацков В.П., Редькин В.Б., Майстренко А.Ю. Расчет выгорания частиц твердого топлива в кипящем слое с учетом внутривязного реагирования// Теплообмен ММФ-92. Теплообмен в дисперсных системах: Т.5.-Минск. АНК"ИТМО им. А.В. Пылова", АНБ.-1992.-С. 168-170.
4. Бубенчиков А.М., Старченко А.В., Стрелус В.В. Математическое моделирование аэродинамики и теплопереноса в устройствах с циркулирующим кипящим слоем // Теплоэнергетика. – 1995. - № 9. – с. 37-41.
5. Рохман Б.Б., Шрайбер А.А., Чернявский Н.В. Инженерная методика расчета горения твердых топлив в реакторе с циркулирующим кипящим слоем применительно к пилотной установке по технологии фирмы "Лурги" // Пром. теплотехника. – 2004. – т. 26. - № 4. – с. 40-47.
6. Бородуля В.А., Гупало Ю.П. Математические модели химических реакторов с кипящим слоем. - Мн.: Наука и техника, 1976, 208 с.
7. Забродский С. С. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном (кипящем) слое. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. - 488 с.
8. Бородуля В.А., Пальченко Г.И., Васильев Г.Г., Дрябин В.А., Галерштейн Д.М. Теплообмен и кинетика горения твердого топлива в кипящем слое // Проблемы тепло- и массообмена в современной технологии сжигания и газификации твердого топлива. Материалы международной школы-семинара. Минск, 1988, ч. 2. – с. 3-23.

Поступила 8.09.2010р.