

tion of coal, NO_x Generation and Control in Boiler and Furnace Plant Symposium, 8th September, Portsmouth, 1988.

9. *Warnatz J.* NO_x formation in high temperature processes/ University of Stuttgart, Germany 1990.

10. *De Soete G.G.* 'Overall reaction rates of NO and N₂ formation from fuel nitrogen', 15th Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute – 1975, pp. 1093-1102.

Получено 15.03.2006 г.

УДК 532.529: 662.62

РОХМАН Б. Б.

Институт угольных энерготехнологий НАН и Минтопэнерго Украины

О НЕКОТОРЫХ МЕТОДАХ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ В ЦИРКУЛИРУЮЩЕМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Пропонуються спосіб термодетального піролізу вугілля і конструкція топки, призначена для спалювання твердого палива в циркулюючому киплячому шарі. Розраховані геометричні та фізичні параметри зони піролізу, розташованої поблизу стінки області надшарового простору. Показано, що при подачі вугілля через частину площі поперечного перерізу кільцевої зони відбувається руйнування кластерів, що інтенсифікує процес горіння (газифікації) в ядрі потоку.

Предлагаются способ термодетального пиролиза угля и конструкция топки, предназначенная для сжигания твердого топлива в циркулирующем кипящем слое. Рассчитаны геометрические и физические параметры зоны пиролиза, расположенной в пристеночной области надслоевого пространства. Показано, что при подаче угля через часть площади поперечного сечения кольцевой зоны происходит разрушение кластеров, что интенсифицирует процесс горения (газификации) в ядре потока.

We offer a method of coal thermal contact pyrolysis and a design of furnace for burning firm fuel in a circulating fluidized bed. Geometrical and physical parameters of a pyrolysis zone located in the wall area of freebed are calculated. It is shown, that at submission of coal through a part of the area of cross-section of a ring zone, there occurs destruction of clusters that intensifies process of burning (gasification) in the core of a stream.

Ar, Re, Nu, Pr — критерии Архимеда, Рейнольдса, Нуссельта, Прандтля;

A_d, V_d — доли золы и летучих в твердом топливе (на сухую массу);

A, B, V, I — IX — варианты расчета;

A_{O_2} — скорость выгорания окислителя;

a — степень черноты;

B — расход твердой фазы;

C — концентрация;

c — теплоемкость;

D — диаметр;

E — энергия активации;

\vec{F} — вектор силы тяжести;

f — сечение;

G — расход газа;

g — ускорение свободного падения;

H — высота;

k — константа скорости реакции;

k_0 — предэкспоненциальный множитель;

m — масса;

P — давление газа;

R — универсальная газовая постоянная;

t — температура;

u, w — составляющие вектора скорости;

V_{daf} — доля летучих веществ в пересчете на сухую беззольную (горючую) массу;

x, z — радиальная и аксиальная координаты;

α — коэффициент теплообмена;

β — истинная объемная концентрация частиц;

γ, γ^0 — постоянные спада экспоненты;

δ — диаметр частицы;

θ — угол;

λ — коэффициент теплопроводности;
 ν — кинематическая вязкость;
 ρ — плотность;
 σ_0 — постоянная Стефана–Больцмана;
 τ — время;
 φ — функция;
 ω — доля летучих веществ (от их содержания в частице исходного топлива после ее прогрева до температуры $\tilde{t}_{\text{угл}}$);
 ΔP — перепад давлений.

Индексы нижние:

(a) — первая стадия выделения летучих;
air — воздух;
 C — углерод;
 C + O₂ — реакция C + O₂ = CO₂;
cond — кондуктивно-конвективный теплообмен;
e — выходное сечение НП;
g — газ;
m — среднее значение;
 O₂ — кислород;
p — частица;

r — реактор;
rad — лучистый теплообмен;
 abвг — площадка, ограниченная центральным углом θ ;
 кз — кольцевая зона;
 лет — летучие вещества;
 нп — надслоевое пространство;
 пир — пиролиз;
 рец — рециркуляция;
 угл — уголь;
 я — ядро;
 0 — начальные условия;
 (ф) — вторая стадия выделения летучих;
 Σ — сумма.

Индексы верхние:

* — количество летучих веществ, оставшихся после прогрева частицы до температуры $\tilde{t}_{\text{угл}}$;
 \sim — температура угля, достаточно близкая к температуре рециркулирующей твердой фазы;
 max — предельное значение;
 min — минимальное значение.

Введение и предпосылки

Прогрессивной технологией использования низкосортных высокосольных топлив, сочетающих преимущества пылеугольных топок и топок кипящего слоя (КС), является сжигание углей в циркулирующем кипящем слое (ЦКС). Основным элементом установки с ЦКС (рис. 1) является реактор, в нижней части которого находится КС, а в верхней — надслоевое пространство (НП). Отличительной особенностью аэродинамики НП является высокая концентрация дисперсной фазы, что значительно усиливает эффекты межчастичных столкновений, обусловленные осредненным и хаотическим движением частиц. В результате происходит генерация энергии пульсационного движения частиц, которая оказывает существенное влияние на их перемещение из ядра потока в периферийную область, вследствие чего у стенки канала образуется плотная (нисходящая) фаза (кольцевая зона (КЗ)), а в центральной части (зона ядра) — разреженная (восходящая).

В работах [1, 2] показано, что увеличение β_m , с одной стороны, повышает концентрацию β_y , с другой — уменьшает сечение зоны ядра (реакци-

онная зона), через которое проходит свыше 75 % общего потока газа, что приводит к увеличению скорости газа $u_{\text{гя}}$ и снижению времени пребывания газозвеси. Там же было отмечено, что КЗ практически не участвует в горении из-за малого расхода кислорода, и весь процесс горения коксосольных частиц происходит в основном в ядре потока во внешнекинетической области реагирования, поэтому скорость выгорания окислителя может быть найдена из выражения

$$A_{O_2} = \frac{6k_{C+O_2} G_{O_2\text{нп}} \beta_y C_C}{u_{\text{гя}} \delta_{\text{рец}}}. \text{ Если рост величины } \beta_y$$

(k_{C+O_2} , A_{O_2} , $G_{O_2\text{нп}}$, $\delta_{\text{рец}} \sim \text{idem}$) оказывается более существенным, чем скорости газа $u_{\text{гя}}$, то процесс горения протекает при более низких значениях C_C , что приводит к уменьшению потери тепла с механическим недожогом. Такой режим горения характерен для $\beta_{m0} \leq 0,15$ [2]. При высоких значениях β_{m0} ($0,15 < \beta_{m0} < 0,3$) превалирующим оказывается второй фактор, т.е. скорость газа $u_{\text{гя}}$, вследствие чего происходит увеличение концентрации углерода C_C в рециркулирующих частицах.

Основные трудности, возникающие при организации процесса сжигания в ЦКС, связаны с

формированием КС (рис. 1, поз. 6), предназначенного для выгорания 45...75 % исходного угля при скорости $u_{gm} = 3...12$ м/с, значительно большей скорости оживающего агента, характерной для классического КС ($u_{gm} = 1...3$ м/с). Решение этой задачи напрямую зависит от марки и класса сжигаемого топлива. При использовании, например, поступающих на ТЭС бурых или каменных углей (КУ) с размером частиц $\delta_{угл} < 50$ мм [3] формирование плотного слоя (до заданной порозности) может быть достигнуто следующими способами: 1 – выбором фракционного состава угля при заданной скорости оживающего агента; 2 – раздельной подачей горячего воздуха: первичный вводится под решетку КС, вторичный – над верхней границей КС; 3 – сжиганием кускового топлива по технологии “Мультисолид” (MSFB), которая включает в себя КС инертных частиц и циркулирующий слой мелких частиц [4].

При сжигании антрацитового штыба (АШ), состоящего преимущественно из мелких фракций [3], первый и третий способы мало эффективны. Использование второго метода частично решает поставленную задачу. Остановимся на нем более подробно. В отличие от термохимической переработки высокорекреакционных углей, где удается сжигать в НП до 55 % окислителя при сравнительно небольшой концентрации частиц $\beta_{m0} \leq 0,15$, при сжигании АШ с малыми значениями k_{C+O_2} для этого потребуется большая реакционная поверхность частиц $6\beta_{я}C_C/\delta_{рец}$ ($C_C \sim idem$), что, несомненно, приведет к увеличению концентрации β_{m0} . При таком способе организации процесса $A_{O_2}^{max}$ достигается в диапазоне $0,12 \leq \beta_{m0} \leq 0,15$ (см. ниже). Однако при высоких скоростях u_{gm} этой концентрации β_{m0} может оказаться недостаточно для формирования КС. В этом случае необходимо идти по пути дальнейшего повышения β_{m0} . При этом, с одной стороны, происходит увеличение сечения $f_{кз}$ [1, 2], а следовательно, и веса расположенных в КЗ частиц \bar{F} (рис. 1, поз. 7), который оказывает определенное давление на слой, тем самым противодействуя его расширению и создавая благоприятные условия для псевдоожижения. С другой – падает A_{O_2} за счет уменьшения времени пребывания газодисперсного потока в реакционной зоне.

Таким образом, аэродинамическая структура, присущая НП, оказывает существенное влияние как на формирование КС, так и на процесс горения АШ в КС и в реакционной зоне НП, что необходимо учитывать при конструировании подобных систем. С этой целью рассмотрим более подробно поведение двухфазного потока в НП.

Основные уравнения

В [2] построена двухзонная модель движения, теплообмена и горения высококонцентрированного монодисперсного потока в НП. Приведем систему уравнений, описывающую аэродинамику частиц и газа в НП:

$$B_{я} = B_{я0} \exp(-\gamma z) ;$$

$$B_{кз} = B_{я0} \exp(-\gamma z) \{ \exp[-\gamma(H_{нп} - z)] - 1 \} ;$$

$$B_j = 3600 u_{pj} \beta_j f_j \rho_p ; \quad (1)$$

$$\beta_{я} = \beta_{я0} \exp(-\gamma^0 z) ; \quad \beta_m = \beta_{m0} \exp(-\gamma z) ;$$

$$\frac{\beta_m - \beta_{кз}}{\beta_{я} - \beta_{кз}} = \frac{f_{я}}{f_{нп}} ; \quad f_{нп} = f_{я} + f_{кз} ; \quad (2)$$

$$G_{нп} = G_{кз} + G_{я} ; \quad G_j = 3600 \rho_g u_{gj} f_j ; \quad (3)$$

$$u_{gj} - u_{pj}(1 - \beta_j) = Re_j v_g / \delta_{рец} ;$$

$$Re_j = \frac{Ar_j(1 - \beta_j)^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{Ar_j(1 - \beta_j)^{4,75}}} ; \quad (4)$$

$$G_{нп}/(3600 \rho_g) = (1 - \beta_{я}) B_{я}/(3600 \beta_{я} \rho_p) +$$

$$+ \frac{(\beta_m - \beta_{кз}) f_{нп} Re_{я} v_g}{(\beta_{я} - \beta_{кз}) \delta_{рец}} + \left(1 - \frac{\beta_m - \beta_{кз}}{\beta_{я} - \beta_{кз}} \right) \frac{f_{нп} Re_{кз} v_g}{\delta_{рец}} -$$

$$-(1 - \beta_{кз}) |B_{кз}| / (\beta_{кз} \rho_p 3600) ; \quad (5)$$

$$\Delta P = g \rho_p \beta_{m0} [1 - \exp(-\gamma z)] / \gamma , \quad (6)$$

где $j = я, кз$. Для замыкания системы уравнений необходимо сформулировать граничные условия

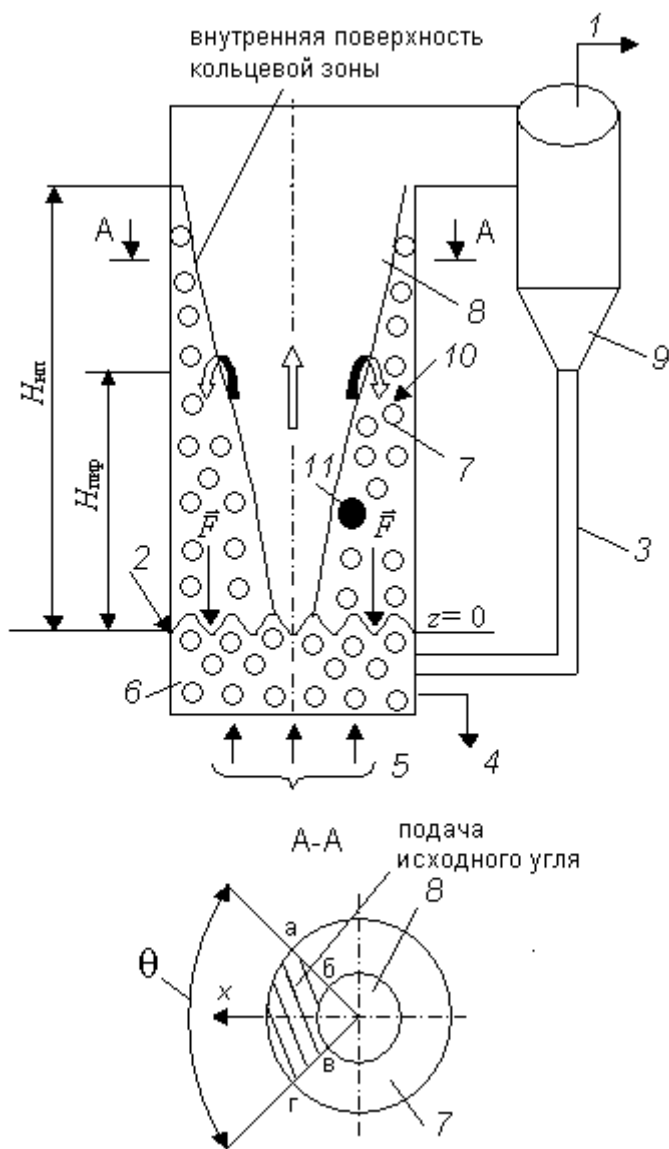


Рис. 1. Схема установки с циркулирующим кипящим слоем: 1 — отходящие газы в конвективную шахту; 2 — подача исходного топлива; 3 — опускной стояк; 4 — выход сливной золы; 5 — подача воздуха под решетку; 6 — кипящий слой; 7 — кольцевая зона; 8 — ядро потока; 9 — циклон; 10 — подача исходного топлива для пиролиза; 11 — частица исходного угля.

на верхней и нижней границах НП (рис. 1). На входе в НП ($z = 0$) задаются следующие параметры: $\rho_g, G_{нп}, \beta_{кз0}, P_0, \delta_{рец}, \rho_p$ и γ . Поскольку на выходе из НП газозвесь движется вертикально вверх, граничные условия при $z = H_{нп}$ могут быть представлены в виде: $f_{яе} = f_{нп}, \beta_{яе} = \beta_{ме}, B_{кзе} = 0, G_{кзе} = 0$. Кроме того, необходимо задать значение $\beta_{ме}$.

Недостающие граничные условия определяются в следующей последовательности: а) по заданным значениям γ и $\beta_{ме}$ по второй формуле (2) рассчитывается концентрация β_{m0} ; б) с использованием второй формулы (3) вычисляется скорость газа $u_{ге}$; в) из выражений (1) (третья формула) и (4) рассчитываются параметры $u_{ре}$ и $B_{ре}$, что дает возможность при помощи первой и второй формул (1) найти расходы частиц $B_{я0}$ и $B_{кз0}$; г) из уравнения (5) с учетом второй формулы (4) определяется $\beta_{я0}$; д) по известным значениям $\beta_{я0}$ и $\beta_{яе}$ согласно первой формуле (2) вычисляется γ^0 ; е) сечения зон $f_{я0}$ и $f_{кз0}$ рассчитываются при помощи (2) (третья и четвертая формулы), а скорости фаз $u_{гя0}, u_{гкз0}, u_{ря0}$ и $u_{ркз0}$ — с использованием (1) (третья формула) и (4), что позволяет при помощи (3) найти расходы газа $G_{я0}$ и $G_{кз0}$.

Результаты расчетов и их обсуждение

На основании системы уравнений (1)–(6) была разработана программа, с помощью которой рассчитана аэродинамика НП топок холодной и горячей установок $H_{нп} = 8$ м и $D_{нп} = 0,4$ м. Обсудим результаты расчетов девяти вариантов при следующих исходных данных: $\delta_{рец} = 0,35 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho_p = 1800$ кг/м³, $\gamma = 0,4$ м⁻¹ (для вариантов I – VI: $\rho_g = 1,3$ кг/м³, $u_{gm} = 3$ м/с, $t_g = 20$ °С; VII – IX: $\rho_g = 0,3$ кг/м³, $u_{gm} = 6$ м/с, $t_g = 900$ °С). Варианты I, VII: $\beta_{ме} = 6 \cdot 10^{-3}$; II: $\beta_{ме} = 8 \cdot 10^{-3}$; III, VIII: $\beta_{ме} = 10 \cdot 10^{-3}$; IV, IX: $\beta_{ме} = 11,2 \cdot 10^{-3}$; V: $\beta_{ме} = 11,8 \cdot 10^{-3}$; VI: $\beta_{ме} = 2,8 \cdot 10^{-3}$.

Площадь поперечного сечения НП разделяется на две части: ядро потока $f_{я}$ и кольцевая зона $f_{кз}$ (рис. 1, поз. 7, 8), причем отношение $f_{я0} / f_{нп}$ меняется в зависимости от концентрации β_{m0} (рис. 2, кривая 3). Сужение сечения $f_{я0}$, обусловленное возрастанием величины β_{m0} , слабо влияет на изменение расхода $G_{я0}$, зато способствует увеличению скорости газа $u_{гя0}$ (рис. 2, кривая 1) и концентрации $\beta_{я0}$ (см. [1, 2]).

Из рисунка 2 видно, что в узком интервале $0,275 \leq \beta_{m0} \leq 0,292$ происходит значительное уменьшение отношения $f_{я0} / f_{нп}$ от 0,11 до 0,036 (кривая 3), вследствие чего скорость газа $u_{гя0}$ резко возрастает (кривая 1). Этот резкий переход к плотной фазе ($f_{я0} / f_{нп} \rightarrow 0$) называется захлебыва-

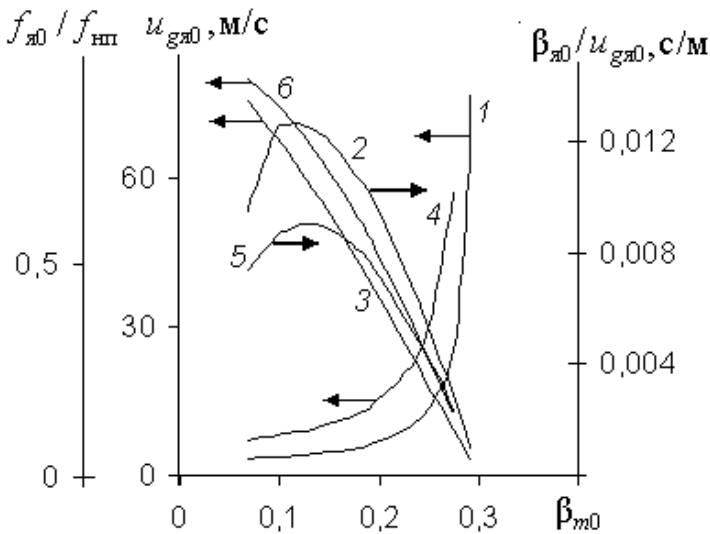


Рис. 2. Зависимости начальных параметров $f_{я0}/f_{нп}$, $\beta_{я0}/u_{гя0}$ и скорости газа $u_{гя0}$ от концентрации частиц β_{m0} при $u_{gm} = 3$ м/с, $\rho_g = 1,3$ кг/м³: 1 — $u_{гя0}$, 2 — $\beta_{я0}/u_{гя0}$, 3 — $f_{я0}/f_{нп}$; $u_{gm} = 6$ м/с, $\rho_g = 0,3$ кг/м³: 4 — $u_{гя0}$, 5 — $\beta_{я0}/u_{гя0}$, 6 — $f_{я0}/f_{нп}$.

нием (завалом), который сопровождается осаждением слоя и прекращением циркуляции частиц. Следует также заметить, что при больших скоростях псевдооживления ($u_{gm} = 6$ м/с) и высоких температурах газа ($t_g = 900$ °С) характер изменения зависимостей 4-6 близок к характеру изменения кривых 1-3 ($u_{gm} = 3$ м/с, $t_g = 20$ °С).

Из рисунка 2 следует, что максимальная скорость выгорания $A_{O_2}^{max} = \varphi(\beta_{я0}/u_{гя0})^{max}$ может быть достигнута при $0,12 \leq \beta_{m0} \leq 0,15$, что подтверждается работой действующих котлоагрегатов с ЦКС. Однако при сжигании АШ (высокофорсированные режимы псевдооживления) указанный режим горения может быть не совсем благоприятным с точки зрения формирования КС. В данном случае необходимы более высокие значения β_{m0} ($0,15 < \beta_{m0} < 0,25$), скорости газа $1,68 < u_{гя0}/u_{gm} < 4,4$ и малые сечения $f_{я0}$ ($0,3 < f_{я0}/f_{нп} < 0,72$). При таком режиме A_{O_2} уменьшается, однако это компенсируется увеличением количества кислорода, прореагировавшего в КС, т. е. происходит перераспределение степени выгорания угля между КС и НП. Кроме того, возрастает ΔP в топке, что требует установки мощных высоконапорных тягодутьевых вентиляторов, необходимых для псевдооживления. Этот факт был отмечен в рабо-

те [4], где говорится о том, что в топке с ЦКС котла теплоэлектроцентрали “Дуйсбург” $H_r = 32$ м и $D_r = 8$ м, сжигающего мелкоизмельченный КУ ($\delta_{угл} < 2$ мм), в процессе опытной эксплуатации возникали трудности с набором полной нагрузки в связи с повышенной концентрацией частиц $260...300$ кг/м³ ($\beta_{m0} \approx 0,17...0,2$, $\rho_p \approx 1500$ кг/м³) вместо расчетной 200 кг/м³ ($\beta_{m0} \approx 0,13$).

Еще одна серьезная проблема, связанная с организацией процесса сжигания АШ при значениях β_{m0} , близких к критическому, выше которого происходит завал, состоит в использовании быстродействующей контрольно-измерительной аппаратуры, работающей в тяжелых условиях (высокие температуры, запыленность потока), и автоматики, позволяющей реагировать на резкие изменения параметров газодисперсного потока (скорости, перепада давлений, концентрации и т. д.) в рассматриваемой области.

Все это способствует поиску новых конструктивных решений топочных устройств, одно из которых приведено на рис. 3.

Топка с ЦКС

На рис. 3 показана схема котлоагрегата с ЦКС Т-образной компоновки, предназначенная для сжигания АШ (как альтернатива существующим топкам) и состоящая из топки 15, нижняя часть которой выполнена в виде призмы, двух горячих циклонов 2, размещенных по обе стороны топки, и двух трактов возврата 3. Топка разделена вертикальным двухсветным экраном (ДЭ) 14, конструкция которого показана на рис. 4, а. ДЭ представляет собой цельносварную панель, состоящую из труб 1, соединенных между собой стальными проставками 2 при помощи сварки. Панель имеет два участка: вертикальный и наклонный. Последний образуется в результате изгиба нижних участков труб, входящих в цельносварную панель. При этом нечетные номера труб изгибаются вправо, а четные — влево. Трубы проходят сквозь боковые стенки топки 4 и врезаются в паровые коллекторы 5. Проставки, расположенные на наклонном участке, снабжены отверстиями 3 для прохода газа. Между боковыми поверхностями топки и проставками предусмотрены зазоры 11 (провальная решетка) — для перетока недогорев-

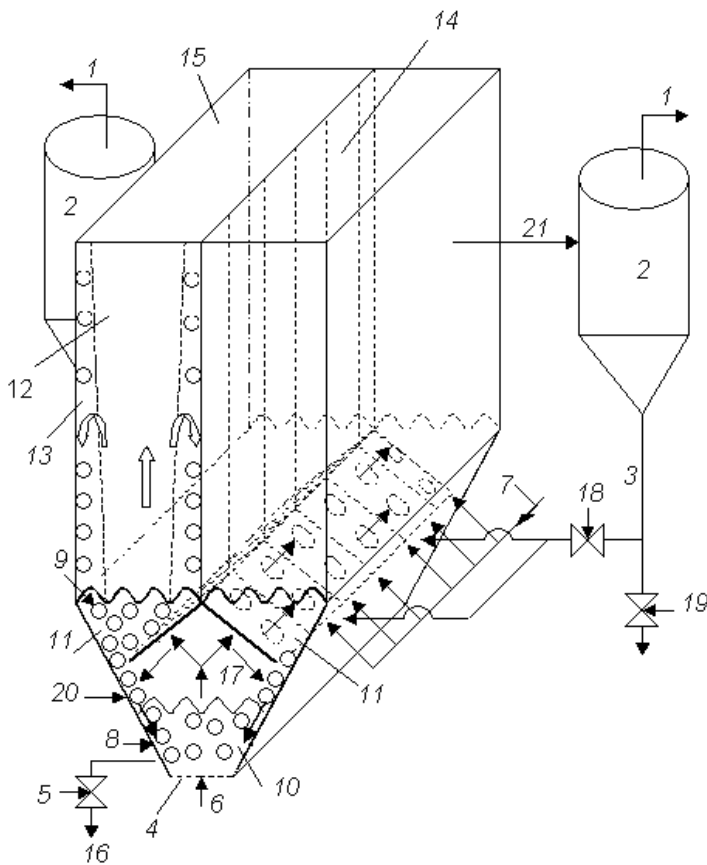


Рис. 3. Конструкция топки с циркулирующим кипящим слоем: 1 — уходящие газы в конвективную шахту; 2 — циклон; 3 — тракт возврата; 4 — перфорированная решетка; 5, 18, 19 — запорно-регулирующие клапана; 6, 20 — первичный воздух; 7 — вторичный воздух; 8, 9 — подача исходного топлива; 10, 11 — кипящий слой; 12 — ядро потока; 13 — кольцевая зона; 14 — двухсветный экран; 15 — топка; 16 — выход сливной золы; 17 — надслоевое пространство; 21 — выход запыленного потока из топки.

ших частиц. Для защиты наклонного участка от золотого износа применяется керамическая обшивка. В отличие от существующих конструкций топочных камер, где зона плотной фазы расположена вблизи пода топки, здесь предусмотрено наличие трех секций КС, расположенных как в нижней, так и в верхней части призмы (рис. 3, поз. 10, 11).

Принцип работы этой установки состоит в следующем. Исходный уголь перед подачей в топку разделяется на три части. Первая 8 подается в КС 10. Туда же через провальные решетки

поступают недогоревшие частицы из двух верхних секций КС 11. Для регулирования параметров рабочего процесса в КС 10 предусмотрен раздельный ввод первичного воздуха: через решетку 4 (поз. 6) и в НП 17 (поз. 20). В КС 10 происходит сгорание окислителя, после чего газозвесь направляется в НП 17, где частицы отделяются от газа за счет расширения сечения призмы и их взаимодействия с внутренней поверхностью наклонного участка ДЭ 14. Частицы возвращаются обратно в слой 10, а газовая смесь через отверстия, расположенные в наклонной части ДЭ, поступает в КС 11. Туда же подаются вторичный воздух 7 и остаток исходного угля 9 (две части). Из КС 11 двухфазный поток направляется в две реакционные зоны НП 12, а затем в горячие циклоны 2, где происходит отделение газа от пыли. Горячие газы поступают в конвективные шахты, а рециркулирующая масса по стоякам 3 возвращается в КС 11. В отличие от существующих конструкций топков, здесь основное горение угля происходит в КС 11 и реакционных зонах 12, а КС 10 предназначен в основном для дожигаания сливной золы КС 11. Такая конструкция топки позволяет вести процесс горения в верхних секциях при более высоких значениях C_c и меньших расходах рециркулирующей массы по сравнению с существующими котлами. Равномерно распределенная подача оживаемых агентов (газовая смесь и вторичный воздух) через боковые поверхности стен КС 11 препятствует образованию застойных зон и тем самым интенсифицирует процесс горения.

На рис. 4, б показана конструкция ДЭ без провальной решетки. В отличие от первого варианта (рис. 4, а) здесь имеются горизонтальные участки, на которых расположены отверстия для прохода газа. Все три секции КС работают в автономном режиме, что позволяет перераспределять тепловые нагрузки между ними и тем самым регулировать температурный уровень в конвективных шахтах. Основной недостаток этой конструкции — отсутствие связи (по дисперсной фазе) между нижней и верхними секциями КС (нет дожигателя сливной золы). Для его устранения предусматривается установка переточных устройств, показанных на рис. 4, в (внешнего 13 с регулирующим клапаном 12 или внутреннего 14).

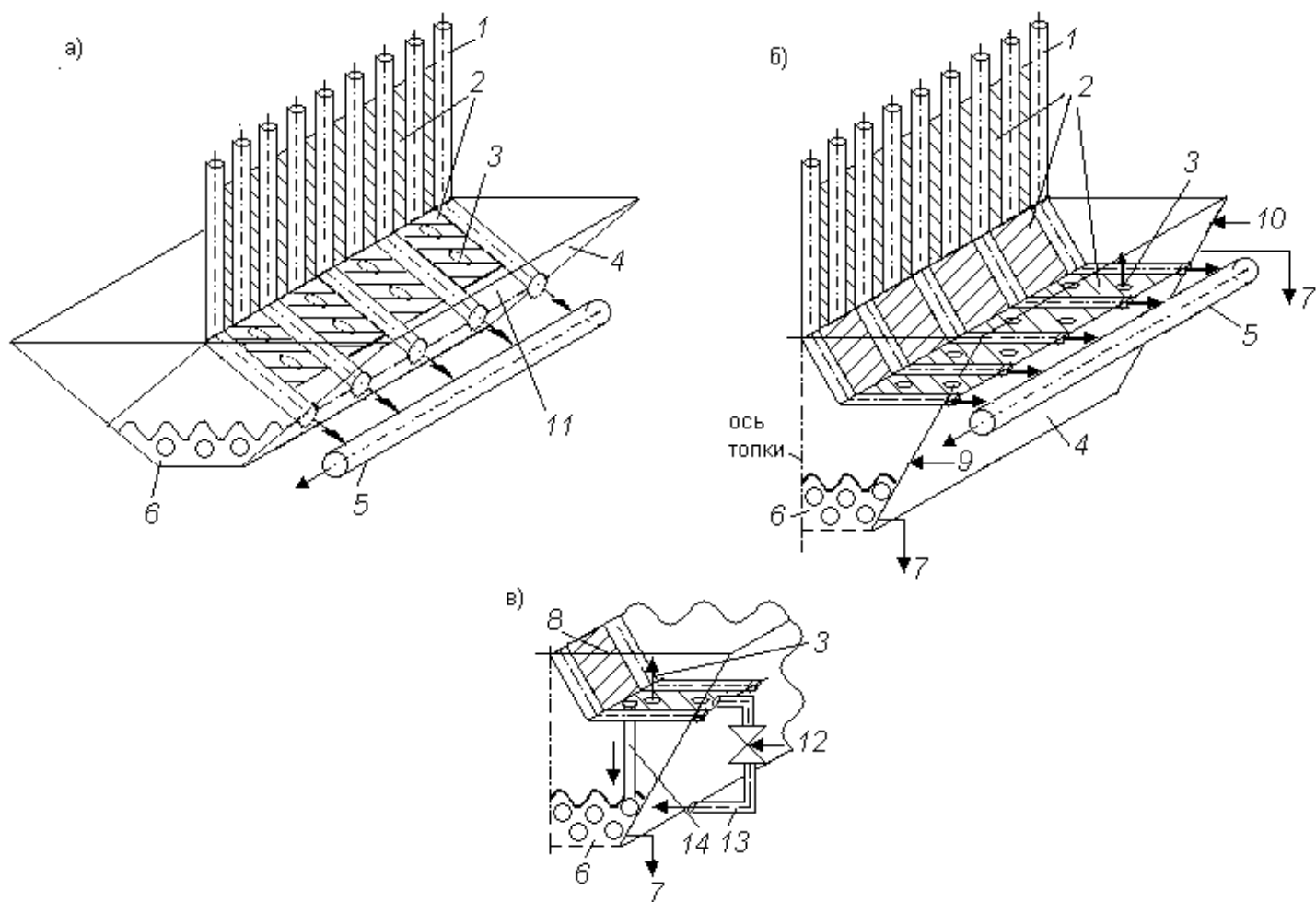


Рис. 4. Конструкции и схемы установки двухцветного экрана: а) — с провальной решеткой, б) — без провальной решетки, в) — с переточными устройствами; 1 — труба; 2 — проставка; 3 — отверстие для прохода газа; 4 — боковая стенка топки; 5 — паровой коллектор; 6 — кипящий слой; 7 — выход сливной золы; 8 — верхняя секция кипящего слоя; 9 — вторичный воздух; 10 — рециркулирующая масса; 11 — провальная решетка; 12 — регулирующий клапан; 13, 14 — переточные устройства.

Термоконтактный пиролиз угля

В работе [5] описана пилотная установка ЦКС-1,0 для газификации высокосольных углей под давлением. Она состоит из реактора-газификатора высотой 10 м и диаметром 0,4 м, горячего циклона, пиролизера и тракта возврата. Отличительной особенностью этой установки является то, что процесс пиролиза угля протекает не в самом реакторе, а в выносном пиролизере, расположенном на тракте возврата под циклоном, где происходит термоконтактный нагрев исходного топлива рециркулирующими частицами с последующим выходом летучих. Здесь имеет место опускное движение рециркулирующей массы и

частиц угля и восходящее течение пиролизных газов. После пиролизера остаток исходного угля и рециркулирующая масса по опускному стояку тракта возврата направляются в реактор, где осуществляется сгорание определенной части углерода, а затем газификация оставшейся части. К недостаткам этой установки следует отнести большую металлоемкость пиролизера ($D_{\text{пир}}/D_r = 1,66$), что ограничивает ее маневренность. Кроме того, при повышении расхода рециркулирующей массы (сверх расчетного) появляется опасность увлечения частицами пиролизных газов и затягивания их в нижнюю часть КС (зона горения), что может привести к шлакованию реактора.

Для устранения перечисленных недостатков предлагается использовать в качестве пиролизера участок КЗ (рис. 1, поз. 7), который характеризуется малым расходом газа и высокой концентрацией частиц, что создает благоприятные условия для термоконтантного пиролиза. При этом уголь равномерно (по всему поперечному сечению КЗ) подается в КЗ (рис. 1, поз. 10), где происходит его пиролиз за счет физического тепла нисходящего потока частиц. Образовавшиеся летучие вещества поступают в ядро потока через внутреннюю поверхность КЗ (рис. 1). При этом практически исключена возможность попадания продуктов пиролиза в зону горения.

Рассмотрим три случая процесса пиролиза угля в КЗ при $H_{\text{нп}} = 10$ м, $D_{\text{нп}} = 0,4$ м, $P_0 = 2,0$ МПа, $t_{\text{ркз}} = t_g = 900$ °С, $\delta_{\text{рец}} = 0,365 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho_p = 1600$ кг/м³, $\gamma = 0,3$ м⁻¹, $u_{\text{gm}} = 1,3$ м/с, $\beta_{\text{me}} = 7,468 \cdot 10^{-3}$, $G_{\text{air}} = 3570$ кг/ч и $\beta_{\text{кз0}} = 0,3$: 1) пиролиз единичной частицы КУ; 2) КУ поступает в зону пиролиза (ЗП) через всю площадь поперечного сечения КЗ ($B_{\text{угл}} = 1660$ кг/ч, $\delta_{\text{угл}} = 2 \cdot 10^{-3}$ м); 3) бурый уголь Б1Р (или фрезторф) подается в ЗП через часть площади поперечного сечения КЗ ($B_{\text{угл}} = 1660$ кг/ч, $\delta_{\text{угл}} = 2 \cdot 10^{-3}$ м).

Рассмотрим вначале процесс пиролиза единичной частицы (рис. 1, поз. 11) при $k_{0\text{пир}} = 178$ с⁻¹, $E_{\text{пир}} = 56,1 \cdot 10^3$ кДж/кмоль, $t_{\text{угл0}} = 30$ °С, $\tilde{t}_{\text{угл}} = 899$ °С, $V_{\text{daf}} = 0,4$, $A_d = 0,28$, $\omega = 0,9$ для трех вариантов: вариант А: $\delta_{\text{угл}} = 1 \cdot 10^{-3}$ м; Б: $\delta_{\text{угл}} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; В: $\delta_{\text{угл}} = 2 \cdot 10^{-3}$ м. Аэродинамические характеристики двухфазного потока в НП рассчитывались с использованием системы уравнений (1)–(6), а время прогрева частицы исходного топлива, выхода из нее пиролизных газов и их количество при движении частицы в КЗ находятся согласно выражениям [6, 7]:

$$\text{Nu}_{\text{кз}} = \text{Nu}_{\text{кз}}^{\text{max}} + (\text{Nu}_{\text{кз}}^{\text{min}} - \text{Nu}_{\text{кз}}^{\text{max}}) \exp\left(-\frac{\delta_{\text{угл}}}{4\delta_{\text{рец}}}\right), \quad (7)$$

где

$$\text{Nu}_{\text{кз}}^{\text{min}} = 10 + 0,23(\text{Ar}_{\text{кз}} \text{Pr}_g)^{0,33};$$

$$\text{Nu}_{\text{кз}}^{\text{max}} = 0,85\text{Ar}_{\text{кз}}^{0,19} + 0,006\text{Ar}_{\text{кз}}^{0,5}\text{Pr}_g^{0,33}; \quad (8)$$

$$\alpha_{\text{cond}} = \frac{\lambda_g \text{Nu}_{\text{кз}}}{\delta_{\text{рец}}}; \quad (9)$$

$$\alpha_{\text{rad}} = 7,3\sigma_0 a_{\text{угл}} a_{\text{кз}} (t_{\text{pm}} + 273)^3; t_{\text{pm}} = (t_{\text{угл0}} + \tilde{t}_{\text{угл}})/2; \quad (10)$$

$$\tau_{(a)} = \frac{-c_p \rho_p \delta_{\text{угл}}}{6(\alpha_{\text{cond}} + \alpha_{\text{rad}})} \ln \frac{t_{\text{ркз}} - \tilde{t}_{\text{угл}}}{t_{\text{ркз}} - t_{\text{угл0}}}; \quad (11)$$

$$m_{\text{угл}} = \frac{\pi \rho_p \delta_{\text{угл}}^3}{6}; V_d = V_{\text{daf}}(1 - A_d); G_{\text{лет}}^{\text{max}} = m_{\text{угл}} V_d;$$

$$k_{\text{пир}} = k_{0\text{пир}} \exp\left[-E_{\text{пир}} / ((t_{\text{угл}} + 273)R)\right], \quad (12)$$

где

$$t_{\text{угл}} = \begin{cases} t_{\text{pm}}, & \text{при } 0 < \tau \leq \tau_{(a)} \\ \tilde{t}_{\text{угл}}, & \text{при } \tau_{(a)} < \tau \leq \tau_{(\phi)} \end{cases}; \quad (13)$$

$$G_{\text{лет}(a)} = G_{\text{лет}}^{\text{max}} [1 - \exp(-k_{\text{пир}} \tau_{(a)})]; G_{\text{лет}}^* = G_{\text{лет}}^{\text{max}} - G_{\text{лет}(a)};$$

$$G_{\text{лет}(\phi)} = \omega G_{\text{лет}}^*; \quad (14)$$

$$\tau_{(\phi)} = -\frac{\ln[1 - (G_{\text{лет}(\phi)} / G_{\text{лет}}^*)]}{k_{\text{пир}}}; \tau_{\Sigma} = \tau_{(a)} + \tau_{(\phi)}, \quad (15)$$

где $\text{Nu}_{\text{кз}}^{\text{max}}$ — критерий Нуссельта для расчета α_{cond} от слоя частиц размером $\delta_{\text{рец}}$ к бесконечно протяженной поверхности, $\text{Nu}_{\text{кз}}^{\text{min}}$ — к телу, размер которого равен $\delta_{\text{рец}}$.

Система уравнений (7)–(15) включает в себя две стадии процесса пиролиза частицы угля. На первой (а) выделение летучих веществ из частицы в интервале $0 < \tau \leq \tau_{(a)}$ происходит за счет ее прогрева от $t_{\text{угл0}}$ до некоторой температуры $\tilde{t}_{\text{угл}}$, достаточно близкой к температуре $t_{\text{ркз}}$ ($\tilde{t}_{\text{угл}} < t_{\text{ркз}}$). На второй стадии (φ) ($\tau_{(a)} < \tau \leq \tau_{(\phi)}$) осуществляется интенсивное выделение пиролизных газов до заданного значения доли летучих веществ ω (от их содержания в частице угля после ее прогрева до $\tilde{t}_{\text{угл}}$).

На основании системы уравнений (7)–(15) были рассчитаны время выхода летучих и их количества на разных стадиях процесса пиролиза в зависимости от $\delta_{\text{угл}}$. Приведем некоторые результаты расчетов для трех вариантов: вариант А: $\tau_{(a)} = 0,89$ с, $\tau_{(\phi)} = 4,074$ с, $\tau_{\Sigma} = 4,964$ с, $G_{\text{лет}(a)} = 3,55 \cdot 10^{-9}$ кг, $G_{\text{лет}(\phi)} = 2,074 \cdot 10^{-7}$ кг, $G_{\text{лет}}^{\text{max}} = 2,11 \cdot 10^{-7}$ кг; Б: $\tau_{(a)} = 1,56$ с, $\tau_{(\phi)} = 4,074$ с, $\tau_{\Sigma} = 5,634$ с, $G_{\text{лет}(a)} = 2,09 \cdot 10^{-8}$ кг, $G_{\text{лет}(\phi)} = 6,91 \cdot 10^{-7}$ кг, $G_{\text{лет}}^{\text{max}} = 7,12 \cdot 10^{-7}$ кг; В: $\tau_{(a)} = 2,36$ с, $\tau_{(\phi)} = 4,074$ с,

$$\tau_{\Sigma} = 6,434 \text{ с}, G_{\text{лет}(a)} = 7,44 \cdot 10^{-8} \text{ кг}, G_{\text{лет}(\phi)} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ кг}, G_{\text{лет}}^{\text{max}} = 1,68 \cdot 10^{-6} \text{ кг}.$$

Обсудим один из возможных вариантов размещения ЗП в КЗ на участке $0 < z < 3,5$ м. На рис. 5 приведены расчетные значения скоростных и концентрационных полей газодисперсного потока в КЗ, а также показано изменение сечения КЗ вдоль оси z . Видно, что на участке $0 < z < 3,5$ м происходят небольшие изменения скорости $u_{pкз} = -(0,46...0,5)$ м/с и сечения $f_{кз} = 0,0469...0,038$ м² (кривые 1, 4). Высокая концентрация $\beta_{кз}$ (кривая 3) способствует образованию кластеров (пакетов частиц), поступательное движение которых напоминает поступательное движение твердого тела, вследствие чего скорости частиц, расположенных в пакете, мало отличаются друг от друга независимо от их размеров. Исходя из этого, $u_{\text{угл}} = u_{pкз}$, что позволяет рассчитать высоту $H_{\text{пир}}$ для трех вариантов: $H_{\text{пирА}} = 2,38$ м, $H_{\text{пирБ}} = 2,71$ м и $H_{\text{пирВ}} = 3,09$ м. Таким образом, найденные значения $H_{\text{пир}}$ не выходят за пределы заданного интервала $0 < z < 3,5$ м, следовательно, ЗП может быть расположена в нижней части КЗ.

Результаты расчетов пиролиза единичной частицы КУ в КЗ показали, что выделение летучих веществ (практически в полном объеме) происходит на второй стадии рабочего процесса (ϕ), которая занимает примерно две третьих высоты ЗП. Так, например, для частиц $\delta_{\text{угл}} = 2 \cdot 10^{-3}$ м $H_{\text{пир}(\phi)} = 1,96$ м.

Обращает на себя внимание тот факт, что направление течения газа в КЗ изменяется в зависимости от координаты z . На участках $z < 0,5$ м $u_{gкз} < 0$, а в интервале $z > 0,5$ м — $u_{gкз} > 0$ (рис. 5, кривая 2). Для того чтобы полностью исключить засасывание газов в КС, необходимо разместить ЗП на участке $0,5 \text{ м} < z < 3,5 \text{ м}$, либо на стадии конструирования выбрать такие диапазоны изменения u_{gm} и $\delta_{\text{рец}}$, чтобы исключить возможность попадания газа в КС [8].

Рассмотрим второй случай, когда КУ равномерно подается в зону пиролиза через все поперечное сечение КЗ. Для простоты будем считать, что все летучие вещества выделяются на второй стадии пиролиза (ϕ). Расчеты показывают, что площадь внутренней поверхности КЗ $\pi D_{\text{ям}} H_{\text{пир}(\phi)}$ ($D_{\text{ям}} = 0,326$ м, $H_{\text{пир}(\phi)} = 1,96$ м), рас-

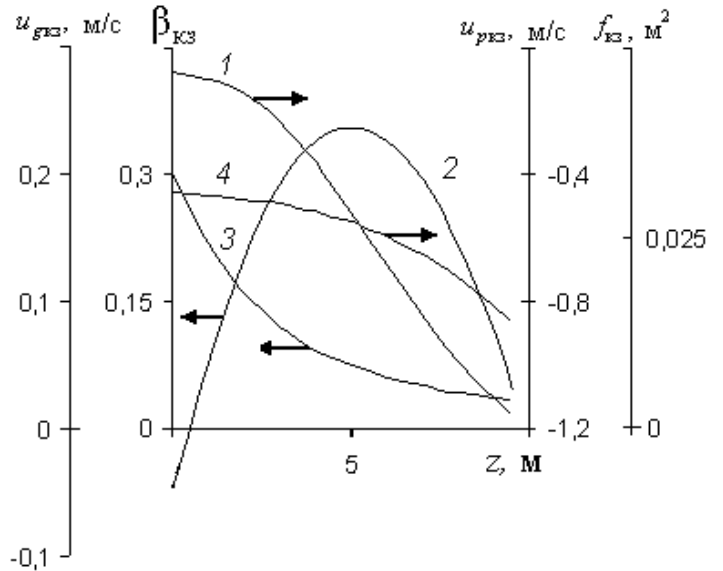


Рис. 5. Изменение гидродинамических и геометрических параметров в КЗ по высоте надслоевого пространства: 1 — $f_{кз}$; 2 — $u_{gкз}$; 3 — $\beta_{кз}$; 4 — $u_{pкз}$.

положенной в интервале $0 < z < 3,5$ м, сквозь которую пиролизные газы с радиальной скоростью $w_{gпир} = -1,1 \cdot 10^{-2}$ м/с проникают в ядро потока, в 47,3 раза больше сечения $f_{кзm}$ на участке $z < 0,5$ м, а средний расход газа через это сечение равен 25 кг/ч, в то время как расход летучих веществ, выделившихся в КЗ, составляет 480 кг/ч. Таким образом, при размещении ЗП начиная с нижней границы КЗ, в КС попадет не более 5,2 % летучих веществ, что не окажет значительного влияния на состав газа на выходе из реактора.

И наконец, рассмотрим третий случай, когда уголь поступает в ЗП через заштрихованную площадку абвг (рис. 1, разрез А-А). Будем полагать, что движение угля на участке $0 < z < H_{\text{пир}(\phi)}$ происходит в объеме $f_{\text{абвг}} H_{\text{пир}(\phi)}$, а выделившиеся при этом летучие вещества покидают этот объем только через внутреннюю поверхность КЗ, равную $\pi D_{\text{ям}} \theta H_{\text{пир}(\phi)} / 360$. Такие допущения были сделаны исходя из следующих соображений: а) движение частиц в КЗ происходит в виде кластеров, что исключает возможность перемешивания дисперсной фазы; б) толщина КЗ гораздо меньше ее высоты и периметра, поэтому аэродинамическое сопротивление в аксиальном и трансверсальном направлениях значительно выше, чем в радиальном. На основании принятых допущений были рассчитаны параметры процесса пиролиза

для двух марок углей: бурого Б1Р (челябинское месторождение: $V_{daf}=0,65$, $A_d=0,15$, $k_{0\text{пир}}=14,2\text{ с}^{-1}$, $E_{\text{пир}}=29,3 \cdot 10^3$ кДж/кмоль [3, 7]) и фрезторфа ($V_{daf}=0,70$, $A_d=12,5$, $k_{0\text{пир}}=83,3\text{ с}^{-1}$, $E_{\text{пир}}=29,3 \cdot 10^3$ кДж/кмоль [3, 7]). Приведем некоторые результаты расчета. Для бурого угля Б1Р: $G_{\text{лет}}=917,2$ кг/ч, $H_{\text{пир}(\varphi)}=1,569$ м; $\theta=189^\circ$, $w_{\text{гпир}}=-0,05$ м/с; $\theta=94,4^\circ$, $w_{\text{гпир}}=-0,1$ м/с. Для фрезторфа: $G_{\text{лет}}=1016,8$ кг/ч, $H_{\text{пир}(\varphi)}=0,268$ м; $\theta=122,5^\circ$, $w_{\text{гпир}}=-0,5$ м/с. При таком способе подачи угля в КЗ образовавшиеся пиролизные газы при движении из КЗ в реакционную зону НП увлекают за собой рециркулирующие частицы, вследствие чего происходит разрушение пристеночных кластеров и увеличение концентрации $\beta_{\text{я}}$. Этот эффект может быть полезен при газификации угля, а также при совместном сжигании твердых топлив, богатых летучими, и низкосортных углей типа АШ, когда требуется обеспечить большую реакционную поверхность частиц в ядре потока.

Выводы

1. Главное отличие предлагаемой конструкции топочной камеры от существующих состоит в том, что процесс горения АШ происходит при более высоких значениях C_C и более низкой концентрации $\beta_{\text{м0}}$, вследствие чего величина A_{O_2} повышается. При этом потери тепла с механическим недожогом не увеличиваются, так как в нижней части топочной камеры предусмотрена установка дожигателя коксозольного остатка.
2. Для проведения термоконтактного пиролиза угля целесообразно использовать участок КЗ.
3. Для интенсификации процесса горения (газификации) коксозольных частиц в ядре потока необходимо подавать уголь через часть площади поперечного сечения КЗ, в результате чего про-

изойдет разрушение пристеночных кластеров потоком пиролизных газов и увеличение реакционной поверхности частиц в приосевой зоне НП.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rokhman B.V.* A Two-Zone Model for Aerodynamics, Heat-and-Mass Transfer Processes, and Combustion in the Freeboard Space of the Furnace of a Circulating Fluidized-Bed Boiler // *Thermal Engineering*. – 2005. – 52, №. 9. – P. 698–705.
2. *Рохман Б.Б.* К моделированию процессов переноса в надслоевом пространстве топки парогенератора с циркулирующим кипящим слоем // *ИФЖ*. 2006. Т. 79, № 1. С. 20–28.
3. *Абрамов В. И., Бартоломей Г.Г., Белосельский Б.С. и др.* Тепловые и атомные электрические станции. Справочник. М.: Энергоиздат, 1982. – 625 с.
4. *Махорин К.Е., Хинкис П.А.* Сжигание топлива в псевдоожиженном слое. - К: Наукова думка, 1989. – 204 с.
5. *Майстренко А.Ю., Дудник А.Н., Яцкевич С.В.* Технологии газификации углей для парогазовых установок. Киев: Знание, 1993.
6. *Баскаков А.П., Лукачевский Б.П., Мухленов И.П. и др.* Расчеты аппаратов кипящего слоя. Справочник. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.
7. *Померанцев В.В., Арефьев К.И., Ахмедов Д.Б. и др.* Основы практической теории горения. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
8. *Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Рохман Б.Б.* Моделирование и численное исследование движения, теплообмена и горения в надслоевом пространстве топки котлоагрегата с циркулирующим кипящим слоем // *Экотехнологии и ресурсосбережение*. – 2004. – № 5. – С. 11–19.

Получено 10.05.2006 г.