

# Топливо и энергетика

УДК 532.529:517.4

**Рохман Б.Б.<sup>1</sup>, Матвейчук А.С.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> *Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев*<sup>2</sup> *Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев*

## Моделирование и численное исследование процессов термохимической переработки биомассы и углей в топочных устройствах.

### 1. Неподвижный слой

Разработана инженерная методика расчета аэродинамики, тепломассообмена и химического реагирования биомассы и углей в неподвижном слое при организации противоточной схемы слоевого процесса. Проведены детальные численные исследования особенностей процессов горения и газификации твердых топлив в окислительной и восстановительной зонах при работе котла на различных нагрузках.

**Ключевые слова:** горение, газ, газификация, топка, неподвижный слой, надслоевое пространство, биомасса, уголь, пиролиз.

Розроблено інженерну методику розрахунку аеродинаміки, тепломасообміну та хімічного реагування біомаси та вугілля у нерухомому шарі при організації протиточної схеми шарового процесу. Проведено детальні числові дослідження особливостей процесів горіння та газифікації твердих палив у окислювальній та відновлювальній зонах при роботі котла на різних навантаженнях.

**Ключові слова:** горіння, газ, газифікація, топка, нерухомий шар, надшаровий простір, біомаса, вугілля, піроліз.

Слоевой метод термохимической переработки твердого топлива занимает видное место в технологии сжигания наряду с факельными методами. Топки с неподвижным слоем (НС) широко применяются в энергетике, металлургии и химическом производстве. Высокая стабильность процесса горения в широком диапазоне форсировок, возможность сжигания топлива с влажностью 45–50 %, отсутствие сложной энергоемкой системы пылеприготовления, простота управления — все эти обстоятельства делают слоевые топочные устройства предпочтительными в установках сравнительно небольшой производительности. По интенсивности горения рассматриваемый процесс обладает значительными резервами по сравнению с факельными.

В топках с НС обычно сжигают топливо, содержащее сравнительно крупные частицы. Высокая адиабатность слоевых процессов способствует развитию в горящем слое температур свыше 2000 К, вследствие чего горение протекает в диффузионной области реагирования. Это отчетливо подтверждается сильной зависимостью скорости выгорания от интенсивности подвода дутья.

Существуют различные схемы (прямоточные, противоточные и др.) организации слоевого процесса. В настоящей работе рассматривается противоточная схема термохимической переработки твердого топлива («нижнее зажигание»), при которой топливо 2 (рис.1) подается сверху на решетку 12, пронизывается дутьевым

воздухом 5, подаваемым снизу. Такая схема обладает устойчивым воспламенением за счет поступления на раскаленный горящий слой свежих порций топлива. Последние подогреваются, сушатся и воспламеняются за счет теплоты, передаваемой мощным потоком раскаленных уходящих газов 6 и излучением НС и факела, расположенного в надслоевом пространстве (НП) 10. При такой организации рабочего процесса в топке 90 % исходного топлива сжигается в НС и 10 % в НП.

Если высота плотного слоя достаточно велика, то ее условно можно разделить на два участка, в каждом из которых выгорание протекает химически различно. Первый участок (кислородная зона) 8 (см. рис.1) характеризуется интенсивным выгоранием окислителя из-за гетерогенной реакции  $C + O_2 = CO_2$ . На втором участке (восстановительная зона) 9, где концентрация кислорода в продуктах сгорания незначительна, происходит процесс газификации кокса по реакции  $C + CO_2 = 2 CO$  за счет тепловой энергии дымовых газов, покидающих окислительную зону. На выходе из НС синтетический газ смешивается с продуктами пиролиза, и сформировавшаяся газовая смесь вместе с мелкими коксозольными частицами сжигается в НП 10.

Настоящая работа посвящена математическому описанию и численному исследованию термохимической переработки твердого топлива в НС при организации противоточной схемы слоевого процесса.

Предлагаемая методика расчета базируется на следующих основных предпосылках: 1) про-

цесс стационарный; 2) твердая фаза и газ движутся навстречу друг другу в режиме идеального вытеснения; 3) стехиометрическая схема реакций включает в себя две гетерогенных реакции  $C + O_2 = CO_2$  и  $C + CO_2 = 2CO$ ; 4) выход и выгорание газовых компонентов летучих веществ ( $CO, H_2, C_nH_m$  и др.), а также испарение влаги исходного топлива происходят над верхней границей НС; 5) газовая смесь в слое состоит из кислорода, азота, диоксида и оксида углерода; 6) дисперсная фаза представляет собой монодисперсные коксозольные частицы сферической формы; 7) зола сосредоточена внутри частицы и не оказывает влияния на гетерогенное горение; последнее протекает на поверхности коксовых частиц, вследствие чего их размер уменьшается до диаметра золы обложки; 8) НС состоит из  $n$  горизонтальных слоев, каждый из которых ведет себя независимо от других.

### Основные уравнения

**Зона горения.** Количество вещества, образовавшегося в результате гетерогенной реакции  $C + O_2 = CO_2$ , будет равно потоку диффундирующего окислителя из газового объема к поверхности коксовой частицы. Принимая во внимание данное допущение, с учетом выбранной стехиометрической схемы реакций можно получить следующее балансовое соотношение [1]:

$$\alpha_D^{rop} (C_{O_2}^{rop} - C_{O_2}^w) = k_{C+O_2} C_{O_2}^w, \quad (1)$$

где константа скорости реакции рассчитывается по закону Аррениуса [1]:

$$k_{C+O_2} = k_{0C+O_2} \exp \left[ -E_{C+O_2} / (R_g (t_p^{rop} + 273)) \right]. \quad (2)$$

Из выражения (1) определяем мольную концентрацию кислорода:

$$C_{O_2}^w = \frac{\alpha_D^{rop} C_{O_2}^{rop}}{k_{C+O_2} + \alpha_D^{rop}},$$

что позволяет рассчитать поток газового компонента  $O_2$  к поверхности коксовой частицы:

$$q_{O_2} = \frac{k_{C+O_2} \alpha_D^{rop} C_{O_2}^{rop} \pi \delta^{rop2}}{k_{C+O_2} + \alpha_D^{rop}}. \quad (3)$$

Уравнение неразрывности для кислорода с учетом выражения (3) может быть представлено в таком виде (ось  $z$  направлена вниз (см. рис.1)):

$$\frac{d(u_g^{rop} C_{O_2}^{rop})}{dz} = \frac{6k_{C+O_2} \alpha_D^{rop} C_{O_2}^{rop} \beta^{rop}}{(k_{C+O_2} + \alpha_D^{rop}) \delta^{rop}}, \quad (4)$$

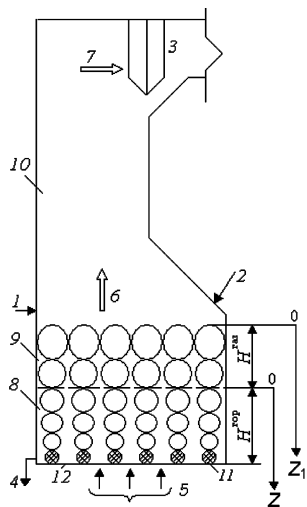


Рис.1. Схема котлоагрегата с неподвижным слоем: 1 — подача вторичного воздуха; 2 — подача исходного топлива; 3 — ширмовый пароперегреватель; 4 — выход сливной золы; 5 — подача первичного воздуха; 6, 7 — уходящие газы; 8 — кислородная зона; 9 — восстановительная зона; 10 — надслоевое пространство; 11 — золы подушка; 12 — решетка.

где  $6\beta^{\text{гор}}/\delta^{\text{гор}}$  — поверхность твердой фазы в единице объема.

Принимая во внимание, что процесс горения коксозольных частиц происходит в диффузионной области реагирования ( $k_{\text{C+O}_2} \gg \alpha_{\text{D}}^{\text{гор}}$ ), уравнение (4) можно упростить к виду

$$d\left(u_{\text{g}}^{\text{гор}} \left| C_{\text{O}_2}^{\text{гор}} \right. / dz = 6\alpha_{\text{D}}^{\text{гор}} C_{\text{O}_2}^{\text{гор}} \beta^{\text{гор}} / \delta^{\text{гор}}. \quad (5)$$

Преобразуем (5) с использованием выражений, приведенных в [1]:

$$\left| u_{\text{g}}^{\text{гор}} \left| C_{\text{O}_2}^{\text{гор}} = B_{\text{O}_2}^{\text{гор}} / (\mu_{\text{O}_2} f_{\text{r}}), \quad (6)$$

$$\alpha_{\text{D}}^{\text{гор}} = 0,08 \left| u_{\text{g}}^{\text{гор}} \right| D_{\text{O}_2 \rightarrow \text{см}} / \eta_{\text{g}},$$

и формулы  $\beta^{\text{гор}} = \beta_0 (\delta^{\text{гор}})^3 / \delta_0^3$ . В итоге

$$\begin{aligned} dB_{\text{O}_2}^{\text{гор}} / dz &= A_1 B_{\text{O}_2}^{\text{гор}} \delta^{\text{гор}^2}; \\ A_1 &= 0,48 D_{\text{O}_2 \rightarrow \text{см}} \beta_0 / (\eta_{\text{g}} \delta_0^3). \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнение неразрывности для коксозольных частиц в диффузионной области реагирования с учетом (6) запишется так:

$$\begin{aligned} d\delta^{\text{гор}} / dz &= -A_2 B_{\text{O}_2}^{\text{гор}}; \\ A_2 &= 0,16 \mu_{\text{c}} D_{\text{O}_2 \rightarrow \text{см}} / (\eta_{\text{g}} u_{\text{p}} \rho_{\text{p}} \mu_{\text{O}_2} f_{\text{r}}); \\ u_{\text{p}} &= B_{\text{p}0} / (\beta_0 f_{\text{r}} \rho_{\text{p}}). \end{aligned} \quad (8)$$

Разделим (7) на выражение (8) и проинтегрируем полученное уравнение. В результате

$$B_{\text{O}_2}^{\text{гор}} = B_{\text{O}_2\text{e}}^{\text{гор}} + A_1 (\delta_0^3 - \delta^{\text{гор}^3}) / 3A_2. \quad (9)$$

При помощи (9) преобразуем уравнения (7) и (8) к виду

$$\frac{dB_{\text{O}_2}^{\text{гор}}}{dz} = A_1 B_{\text{O}_2}^{\text{гор}} \left[ \delta_0^3 - \frac{3A_2}{A_1} (B_{\text{O}_2}^{\text{гор}} - B_{\text{O}_2\text{e}}^{\text{гор}}) \right]^{2/3}, \quad (10)$$

$$\frac{d\delta^{\text{гор}}}{dz} = \frac{A_1 \delta^{\text{гор}^3}}{3} - (A_2 B_{\text{O}_2\text{e}}^{\text{гор}} + \frac{A_1 \delta_0^3}{3}).$$

Уравнения тепловых балансов для коксозольных частиц и газа имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{d(\beta^{\text{гор}} t_{\text{p}}^{\text{гор}})}{dz} &= \frac{0,48 \beta^{\text{гор}}}{\eta_{\text{g}} u_{\text{p}} c_{\text{p}}^{\text{гор}} \delta^{\text{гор}} \rho_{\text{p}}} \left[ \frac{D_{\text{O}_2 \rightarrow \text{см}} Q_{\text{C+O}_2} B_{\text{O}_2}^{\text{гор}}}{\mu_{\text{O}_2} f_{\text{r}}} - \right. \\ &\quad \left. - \left| u_{\text{g}}^{\text{гор}} \right| \lambda_{\text{g}} (t_{\text{p}}^{\text{гор}} - t_{\text{g}}^{\text{гор}}) \right] - Q_{\text{rad}}^{\text{гор}} - Q_{\text{cond}}^{\text{гор}}; \\ \frac{d(B_{\text{g}}^{\text{гор}} t_{\text{g}}^{\text{гор}})}{dz} &= - \frac{0,48 \left| u_{\text{g}}^{\text{гор}} \right| \lambda_{\text{g}} (t_{\text{p}}^{\text{гор}} - t_{\text{g}}^{\text{гор}}) \beta^{\text{гор}} f_{\text{r}}}{\eta_{\text{g}} c_{\text{g}}^{\text{гор}} \delta^{\text{гор}}}, \end{aligned} \quad (11)$$

где лучистое тепло, переданное к стенке дисперсной фазы, находится из выражения

$$Q_{\text{rad}}^{\text{гор}} = a_{\text{np}} \sigma_0 [(t_{\text{p}}^{\text{гор}} + 273)^4 - (t_{\text{w}} + 273)^4] \Pi_{\text{w}} / u_{\text{p}} c_{\text{p}}^{\text{гор}} \rho_{\text{p}} f_{\text{r}}, \quad (12)$$

а кондуктивно-конвективный теплообмен между твердой фазой и стенкой вычисляется по формуле

$$Q_{\text{cond}}^{\text{гор}} = \alpha_{\text{cond}}^{\text{гор}} (t_{\text{p}}^{\text{гор}} - t_{\text{w}}) \frac{\Pi_{\text{w}}}{u_{\text{p}} c_{\text{p}}^{\text{гор}} \rho_{\text{p}} f_{\text{r}}}. \quad (13)$$

Здесь коэффициент теплообмена определяется по рекомендациям работы [2].

**Зона газификации.** Уравнения неразрывности для газовой фазы и коксозольных частиц могут быть получены подобно (4). Приведем эти уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{dB_{\text{CO}_2}^{\text{газ}}}{dz_1} &= \frac{6k_{\text{C+CO}_2} \alpha_{\text{D}}^{\text{газ}} B_{\text{CO}_2}^{\text{газ}} \beta^{\text{газ}}}{(k_{\text{C+CO}_2} + \alpha_{\text{D}}^{\text{газ}}) \delta^{\text{газ}} \left| u_{\text{g}}^{\text{газ}} \right|}, \\ \alpha_{\text{D}}^{\text{газ}} &= 0,08 \left| u_{\text{g}}^{\text{газ}} \right| D_{\text{CO}_2 \rightarrow \text{см}} / \eta_{\text{g}}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{d\delta^{\text{газ}}}{dz_1} = - \frac{2\mu_{\text{c}} k_{\text{C+CO}_2} \alpha_{\text{D}}^{\text{газ}} B_{\text{CO}_2}^{\text{газ}}}{(k_{\text{C+CO}_2} + \alpha_{\text{D}}^{\text{газ}}) u_{\text{p}} \rho_{\text{p}} \left| u_{\text{g}}^{\text{газ}} \right| \mu_{\text{CO}_2} f_{\text{r}}}.$$

Уравнения тепловых балансов дисперсной фазы и несущей среды записываются в виде

$$\begin{aligned} \frac{d(\beta^{\text{газ}} t_{\text{p}}^{\text{газ}})}{dz_1} &= - \frac{6k_{\text{C+CO}_2} \alpha_{\text{D}}^{\text{газ}} B_{\text{CO}_2}^{\text{газ}} \beta^{\text{газ}} Q_{\text{C+CO}_2}}{(k_{\text{C+CO}_2} + \alpha_{\text{D}}^{\text{газ}}) \delta^{\text{газ}} \left| u_{\text{g}}^{\text{газ}} \right| \mu_{\text{CO}_2} f_{\text{r}} u_{\text{p}} c_{\text{p}}^{\text{газ}} \rho_{\text{p}}} - \\ &\quad - \frac{0,48 \left| u_{\text{g}}^{\text{газ}} \right| \lambda_{\text{g}} (t_{\text{p}}^{\text{газ}} - t_{\text{g}}^{\text{газ}}) \beta^{\text{газ}}}{\eta_{\text{g}} u_{\text{p}} c_{\text{p}}^{\text{газ}} \delta^{\text{газ}} \rho_{\text{p}}} - Q_{\text{rad}}^{\text{газ}} - Q_{\text{cond}}^{\text{газ}}; \\ \frac{d(B_{\text{g}}^{\text{газ}} t_{\text{g}}^{\text{газ}})}{dz_1} &= - \frac{0,48 \left| u_{\text{g}}^{\text{газ}} \right| \lambda_{\text{g}} (t_{\text{p}}^{\text{газ}} - t_{\text{g}}^{\text{газ}}) \beta^{\text{газ}} f_{\text{r}}}{\eta_{\text{g}} c_{\text{g}}^{\text{газ}} \delta^{\text{газ}}}, \end{aligned} \quad (15)$$

где тепловые потоки  $Q_{\text{cond}}^{\text{газ}}$  и  $Q_{\text{rad}}^{\text{газ}}$  вычисляются подобно (12), (13).

В первом приближении аэродинамические характеристики НС могут быть определены согласно рекомендациям работы [3]:

$$\begin{aligned} \text{Ar} &= \frac{g \langle \delta \rangle^3 (\rho_{\text{p}} - \langle \rho_{\text{g}} \rangle)}{\eta_{\text{g}}^2 \langle \rho_{\text{g}} \rangle}; \text{Re} = \frac{\text{Ar} (1 - \beta_0)^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{\text{Ar} (1 - \beta_0)^{4,75}}}; \\ \langle u_{\text{g}} \rangle &= \frac{\text{Re} \eta_{\text{g}}}{\langle \delta \rangle}, \beta_0 = 0,6. \end{aligned} \quad (16)$$

Далее необходимо проверить условие существования НС в каждом горизонтальном сечении слоя:

$$F_{\text{gr}}(z) \geq F_{\text{a}}(z), \quad (17)$$

где сила аэродинамического сопротивления  $F_{\text{a}}$  находится по формулам [4]:

**Результаты расчетов процесса горения и газификации биомассы и бурого угля в неподвижном слое**

Наименование	Вариант I	Вариант II	Вариант III	Вариант IV
Расход газовых компонентов на выходе из кислородной зоны, кг/ч:				
кислорода	27,6	27,6	27,6	27,6
диоксида углерода	2492	2492	2492	2492
азота	6160	6160	6160	6160
Количество сгоревшего углерода в кислородной зоне, кг/ч				
	680	680	680	680
Расход газовых компонентов на выходе из восстановительной зоны, кг/ч:				
диоксида углерода	2118	996,8	249	2118
оксида углерода	476	1903	2855	476
Суммарный расход газа на выходе из слоя, кг/ч				
	8782	9088	9291	8782
Количество прореагировавшего углерода в восстановительной зоне, кг/ч				
	102	408	612	102
Сечение слоя, м <sup>2</sup>				
	48,5	49,5	50	5
Высота кислородной зоны, м				
	0,0285	0,0295	0,0345	0,115
Высота восстановительной зоны, м				
	0,0015	0,011	0,025	0,0165

$$F_a = 3 \xi (u_{g^*} - u_p)^2 \rho_g (1 - \beta)^{-1,65} \beta / (4 \delta);$$

$$Re = |u_{g^*} - u_p| \delta (1 - \beta) / \eta_g;$$

$$\xi = \frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,687}) \quad (\beta < 0,2); \quad (18)$$

$$F_a = \left[ \frac{150 \eta_g \rho_g \beta^2}{\delta^2 (1 - \beta)^2} + \frac{1,75 \rho_g \beta |u_{g^*} - u_p|}{\delta (1 - \beta)} \right] (u_{g^*} - u_p) \quad (\beta \geq 0,2),$$

а сила тяжести  $F_{gr}$  определяется согласно выражению

$$F_{gr} = g \beta \rho_p. \quad (19)$$

На основании системы уравнений (10)–(19) разработаны две программы для расчета тепломассообмена процессов и химического реагирования твердого топлива в кислородной и восстановительной зонах НС.

**Некоторые численные результаты**

Обсудим результаты расчетов четырех вариантов топки котлоагрегата с НС, в которой сжигается и газифицируется биомасса (лузга) и днепроовский бурый уголь при следующих исходных данных. *Вариант I:*  $\varphi = 15\%$ ;  $t_{air} = 30\text{ }^\circ\text{C}$ . *Вариант II:*  $\varphi = 60\%$ ;  $t_{air} = 75\text{ }^\circ\text{C}$ . *Вариант III:*  $\varphi = 90\%$ ;  $t_{air} = 530\text{ }^\circ\text{C}$ . *Вариант IV:* бурый уголь;  $\rho_p = 510\text{ кг/м}^3$ ;  $t_{air} = 90\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $V_{air} = 8000\text{ кг/ч}$ ;  $E_{C+CO_2} = 215 \cdot 10^3\text{ кДж/кмоль}$ ;  $\varphi = 15\%$ ;  $\delta = 11\text{ мм}$ ;  $t_{p0} = 30\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $C_{C0} = 0,65$ ;  $C_{ash0} = 0,35$ . В вариантах I–III сжигается лузга при  $\rho_p = 600\text{ кг/м}^3$ ,  $V_{air} = 8000\text{ кг/ч}$ ,  $E_{C+CO_2} = 184,8 \cdot 10^3\text{ кДж/кмоль}$ ,  $\delta = 2,3\text{ мм}$ ,  $t_{p0} = 30\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $C_{C0} = 0,9$ ,  $C_{ash0} = 0,1$ . Расчетный материал приведен в таблице и на рис.1–10, где представлены профили наиболее важных параметров рабочего процесса в НС. Рассмотрим внача-

ле особенности рабочего процесса в окислительной зоне ( $0 < z < H^{гор}$ ).

Из рис.2 видно, что функция  $V_{O_2}^{гор}(z)$  (кривая 1) резко убывает в направлении уменьшения координаты  $z$  (ось  $z$  направлена вниз (см. рис.1)) за счет протекания гетерогенной реакции  $C + O_2 = CO_2$  на поверхности коксозольных частиц. В результате тепловыделение из-за химической реакции превалирует над конвек-

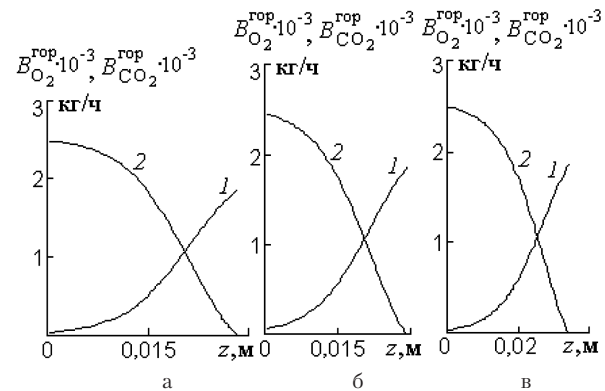


Рис.2. Распределение расходов кислорода и диоксида углерода по высоте окислительной зоны для вариантов I (а), II (б), III (в): 1 –  $V_{O_2}^{гор}$ ; 2 –  $V_{CO_2}^{гор}$ .

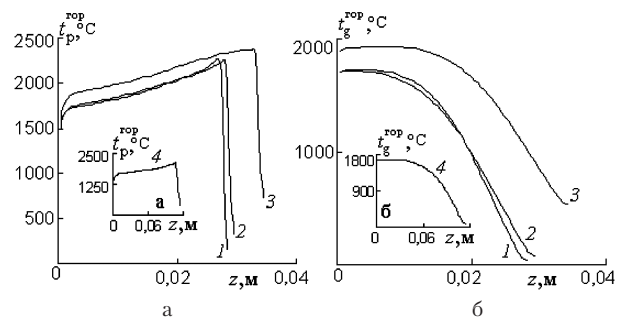


Рис.3. Распределение температур коксозольных частиц (а) и газа (б) по высоте окислительной зоны: 1 – вариант I; 2 – вариант II; 3 – вариант III; 4 – вариант IV.

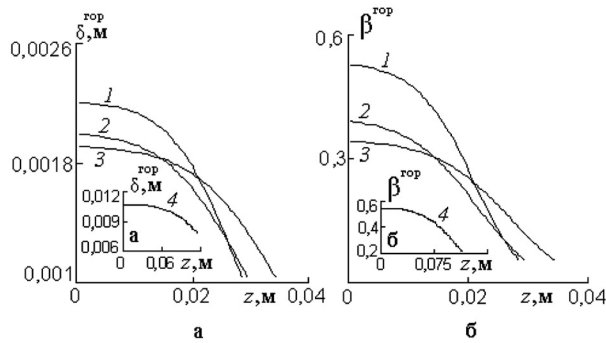


Рис.4. Распределение диаметра (а) и объемной концентрации (б) коксозольных частиц по высоте окислительной зоны: 1 – вариант I; 2 – вариант II; 3 – вариант III; 4 – вариант IV.

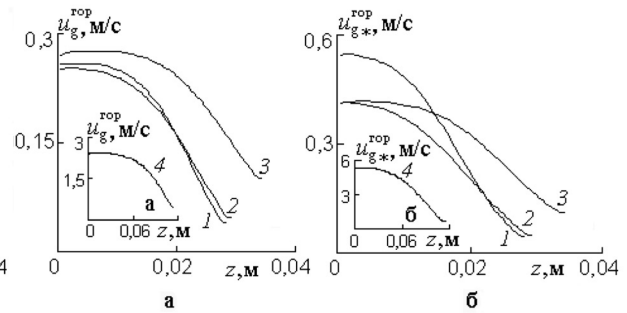


Рис.5. Распределение скорости газа на полное сечение реактора (а) и скорости несущей среды между частицами (б) по высоте окислительной зоны: 1 – вариант I; 2 – вариант II; 3 – вариант III; 4 – вариант IV.

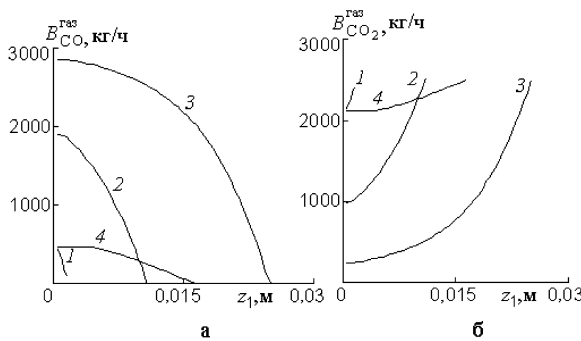


Рис.6. Распределение расходов оксида (а) и диоксида (б) углерода по высоте восстановительной зоны: 1 – вариант I; 2 – вариант II; 3 – вариант III; 4 – вариант IV.

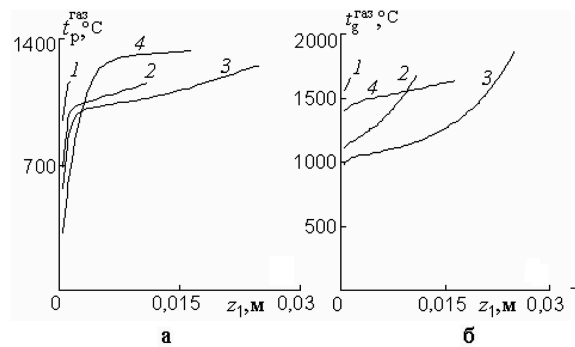


Рис.7. Распределение температур коксозольных частиц (а) и газа (б) по высоте восстановительной зоны: 1 – вариант I; 2 – вариант II; 3 – вариант III; 4 – вариант IV.

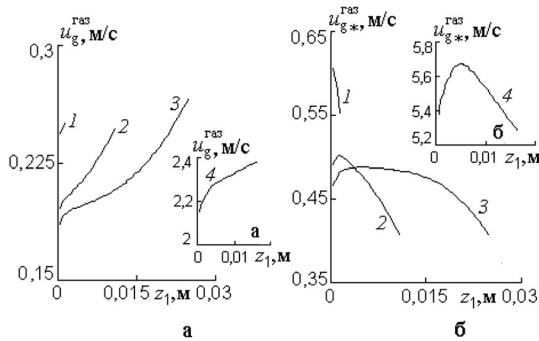


Рис.8. Распределение скорости газа на полное сечение реактора (а) и скорости несущей среды между частицами (б) по высоте восстановительной зоны: 1 – вариант I; 2 – вариант II; 3 – вариант III; 4 – вариант IV.

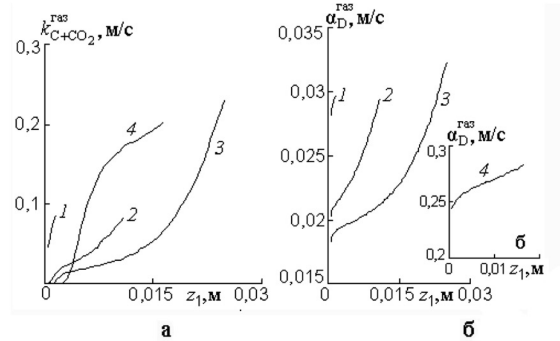


Рис.9. Распределение константы скорости реакции (а) и коэффициента массообмена (б) по высоте восстановительной зоны: 1 – вариант I; 2 – вариант II; 3 – вариант III; 4 – вариант IV.

тивным теплообменом между газом и дисперсной фазой (см. первое уравнение (11)), поэтому зависимость  $t_p^{гор}(z)$  возрастает вдоль оси  $z$  практически по всей высоте кислородной области, за исключением придонной зоны, где расположена зольная подушка (рис.3, а). Формирование последней связано с тем, что коксозольные частицы успевают выгореть по пути движения в направлении решетки до размера зольно-

го каркаса (рис.4, а), вследствие чего их объемная концентрация, согласно выражению  $\beta_{гор} = \beta_0 (\delta_{гор})^3 / \delta_0^3$ , существенно уменьшается (рис.4, б). Резкое падение температуры дисперсной фазы в придонной зоне происходит за счет конвективного теплообмена между газом и твердой фазой. Благодаря этому температура газовой фазы возрастает по мере уменьшения координаты  $z$  (рис.3, б; см. второе уравнение (11)), что в свою



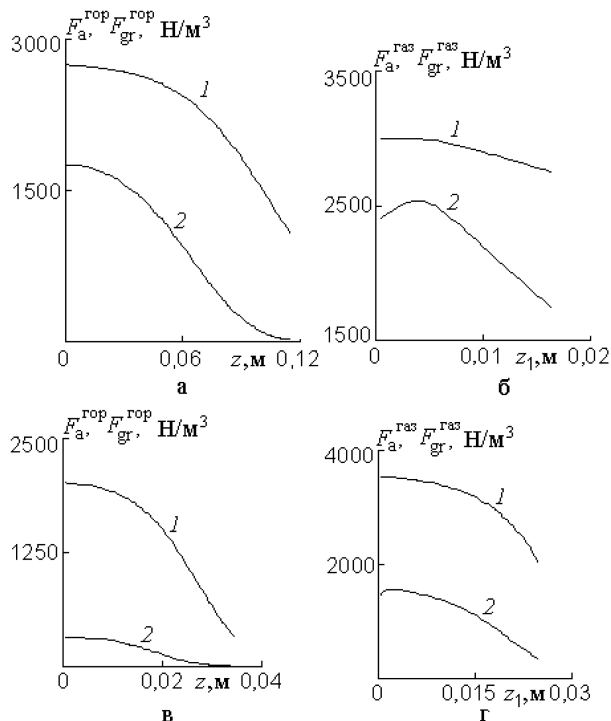


Рис.10. Распределение силы тяжести (1) и силы аэродинамического сопротивления частицы (2) по высоте окислительной (а, в) и восстановительной (б, г) зон: а, б – вариант IV; в, г – вариант III.

очередь способствует росту функции  $u_g^{\text{гор}}(z)$  в указанном направлении (рис.5, а). В отличие от зависимости  $u_g^{\text{гор}}(z)$ , на формирование кривой  $u_{g^*}^{\text{гор}}(z)$  существенное влияние оказывает объемная концентрация частиц (см. рис.4, б), поэтому функция  $u_{g^*}^{\text{гор}}(z)$  возрастает значительно быстрее, чем кривая  $u_g^{\text{гор}}(z)$  (рис.5, б).

В восстановительной зоне ( $0 < z_1 < H_{\text{газ}}$ ), где концентрация кислорода в дымовых газах пренебрежимо мала, происходит процесс газификации кокса по гетерогенной реакции  $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$ , в результате чего зависимость  $V_{\text{CO}_2}^{\text{газ}}(z_1)$  убывает в направлении верхней границы НС (см. первое уравнение (14); рис.6, б), а функция  $V_{\text{CO}}^{\text{газ}}(z_1)$  возрастает, причем с повышением высоты  $H_{\text{газ}}$  расход  $\text{CO}$  и количество прореагировавшего углерода увеличиваются (см. таблицу, рис.6, а; ср. кривые 1 и 3). Так как процесс газификации связан с поглощением тепловой энергии дискретной фазой, то для его осуществления необходим непрерывный подвод теплоты к коксозольным частицам. В рассматриваемой зоне это происходит за счет конвективного межфазного теплообмена, который превалирует над поглощением тепловой энергии

твердой фазы из-за реакции  $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$  (см. (15)), поэтому температура частиц резко повышается вдоль оси  $z_1$ , а температура газовой фазы снижается в обратном направлении (рис.7).

Высокие температуры коксозольных частиц в восстановительной зоне и малые скорости несущей среды, характерные для сжигания биомассы (рис.8, кривые 1–3), приводят к тому, что процесс газификации кокса происходит в основном в диффузионной области реагирования ( $k_{\text{C}+\text{CO}_2} \gg \alpha_{\text{D}}^{\text{газ}}$ ; см. второе выражение (14)), о чем свидетельствуют кривые 1–3 (рис.9). Несколько иная картина наблюдается при газификации смещен в кинетическую область реагирования (рис.9, ср. кривые 4) из-за высоких скоростей газа (рис.8, кривые 4), обусловленных крупными частицами исходного топлива  $\delta = 11$  мм, подаваемого в слой. Укрупнение размера дискретной фазы способствует снижению сечения топки и повышению высот кислородной  $H^{\text{гор}}$  и восстановительной  $H^{\text{газ}}$  зон (см. таблицу, ср. варианты I и IV).

На рис.10 показаны профили силы тяжести и силы аэродинамического сопротивления частицы в различных сечениях НС. Видно, что по всей высоте  $H_{\text{r}} = H^{\text{гор}} + H^{\text{газ}}$  отношение  $F_{gr}/F_a$  существенно больше единицы. Это говорит о том, что значения поперечного сечения  $f_r$ , приведенные в таблице, могут быть значительно уменьшены, особенно это касается варианта III.

### Выводы

Построена одномерная математическая модель параметров рабочего процесса в реакторе с неподвижным слоем, основанная на уравнениях теплового и материального балансов, выгорания и газификации углерода, аэродинамики концентрированной дисперсной системы, лучистого, конвективного и кондуктивного теплообмена частиц с газом и со стенкой реактора. Модель удобна для реализации на компьютере и позволяет выбрать оптимальный режим работы котлоагрегата при горении и газификации того или иного топлива. Во второй части настоящей работы приведены математическая модель и результаты численных исследований аэродинамики, теплообмена и химического реагирования при совместном сжигании биомассы и углей с различным выходом летучих в режиме пневмотранспорта и комбинированном сжигании, когда бурый уголь выгорает в неподвижном слое, а солома – в надслоевом пространстве.

## Условные обозначения

Ar, Re	– критерии Архимеда, Рейнольдса
a	– степень черноты
B	– расход, кг/с (формулы) и кг/ч (рисунки)
C	– концентрации газовых компонентов (кмоль/м <sup>3</sup> ) и твердой фазы
c	– теплоемкость, кДж/(кг·К)
D	– коэффициент диффузии, м <sup>2</sup> /с
E	– энергия активации, кДж/кмоль
F	– сила, Н/м <sup>3</sup>
f	– сечение, м <sup>2</sup>
H	– высота, м
g	– ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>
k	– константа скорости реакции, м/с
k <sub>0</sub>	– предэкспоненциальный множитель, м/с
Q	– тепловой эффект реакции (кДж/кмоль) или тепловой поток на стенку (°С/м)
q	– поток газового компонента, кмоль/с
R	– универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К)
t	– температура, °С
u	– скорость частицы, м/с
z, z <sub>1</sub>	– аксиальные координаты, м
α	– коэффициент массообмена (м/с) или коэффициент теплообмена, (кДж/(с·м <sup>2</sup> ·К))
β	– истинная объемная концентрация частиц
δ	– диаметр частицы, м
η	– кинематическая вязкость, м <sup>2</sup> /с
μ	– молекулярная масса, кг/кмоль
ξ	– коэффициент сопротивления
ρ	– плотность, кг/м <sup>3</sup>

σ <sub>0</sub>	– постоянная Стефана–Больцмана, кДж/(с·м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
φ	– доля углекислого газа, прореагировавшего в восстановительной зоне
Π	– периметр, м

## Индексы

**Нижние:** \* – скорость газа между частицами; a – сила аэродинамического сопротивления частицы; ash – зола; C – углерод; CO<sub>2</sub> – диоксид углерода; C + O<sub>2</sub> – химическая реакция горения углерода; C + CO<sub>2</sub> – химическая реакция газификации; cond – конвективно-кондуктивный теплообмен; CO<sub>2→см</sub> – диффузия диоксида углерода в газовую смесь; D – диффузия; e – выход; g – газ; gr – сила тяжести; O<sub>2</sub> – кислород; p – частица; rad – лучистый теплообмен; r – реактор; O<sub>2→см</sub> – диффузия кислорода в газовую смесь; w – поверхность; pr – приведенный; 0 – начальные условия; < > – осредненные параметры.

**Верхние:** w – поверхность; газ – зона газификации; гор – кислородная зона.

## Список литературы

1. Померанцев В.В., Арефьев К.И., Ахмедов Д.Б. и др. Основы практической теории горения. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
2. Теплицкий Ю.С., Виноградова М.В. Теплообмен в трубах с зернистым слоем // Инж.-физ. журн. – 2011. – Т. 84, № 4. – С. 682–689.
3. Баскаков А.П., Лукачевский Б.П., Мухленов И.П. и др. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справ. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.
4. Ding J., Gidaspow D. A Bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow // J. AIChE. – 1990. – Vol. 36, № 4. – P. 523–538.

Поступила в редакцию 28.02.12

## Rokhman B.B.<sup>1</sup>, Matviichuk A.S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Coal Energy Technology Institute of NASU, Kiev

<sup>2</sup> Institute of Renewable Energy of NASU, Kiev

# Modeling and Numerical Study of the Thermochemical Processing of Biomass and Coal in the Furnace Devices.

## 1. The Fixed Bed

The engineering method for calculation of aerodynamics, heat and mass transfer and chemical reaction of biomass and coal in a fixed bed under the counter-current scheme of layer process organisation is developed. The detailed numerical studies of the features of combustion and gasification processes of solid fuels in oxidizing and reducing areas at different boiler operating loads are carried out.

**Key words:** combustion, gas, gasification, furnace, fixed bed, freeboard, biomass, coal, pyrolysis.

Received February 28, 2012