

9. Гелетука Г.Г., Железна Т.А. Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні. Частина I. // Промислова теплотехніка. – 2010. – Т. 3. – №3. – С. 73–79.

10. Тараріко Ю.О. Формування сталих агроєкосистем: Теорія і практика/ Тараріко Ю.О. –К.: Аграрна наука, 2005. – 508 с.

11. Рослинництво України. Статистичний збірник 2010. – Київ: Державний комітет статистики, 2011. – 99 с.

12. Сільське господарство України. Статистичний збірник 2010. – Київ: Державний комітет статистики, 2011. – 234 с.

13. Ключ С.В., Забарний Г.Н. Оценка и прогноз потенциала твердого биотоплива Украины // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2011. – № 2(24). – С. 8–13.

14. Лешук Л.В., Носенко Т.Т. Біохімія та технологія

оліє-жирової сировини. Навчальний посібник – Київ: Центр учбової літератури, 2011. – 295 с.

15. Ришард Титко, Володимир Калініченко. Відновлювані джерела енергії. – Варшава – Краків – Полтава.: OWG, Варшава, 2010. – 533 с.

16. Кудря С.О., Щокін А.Р. Деякі аспекти визначення коефіцієнтів переводу теплотворної здатності паливно-енергетичних ресурсів з натуральних одиниць в умовні // Відновлювана енергетика. – 2006. – №6. – С. 15–22.

17. Забарний Г.Н., Ключ С.В., Довженко Д.С. Использование растительных отходов для производства энергии // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – №8. – С. 1–7.

18. Коллеров Л.К. Газификационные характеристики растительных отходов. – М-Л.: Машгиз, 1950. – 66 с.

УДК .532.529. 517.4

А.С.Матвейчук (Ин-т возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

О технологии совместного сжигания бурого угля и соломы в топочных камерах с неподвижным слоем

Построена математическая модель аэродинамики и физико-химических процессов, с помощью которой численно исследовано совместное сжигание бурого угля и соломы в реакторах с неподвижным слоем при организации противоточной схемы слоевого процесса.

Побудовано математичну модель аеродинаміки та фізико-хімічних процесів, за допомогою якої чисельно досліджено сумісне спалювання бурого вугілля і соломи в реакторах із нерухомим шаром при організації протитічійної схеми шарового процесу.

Среди основных задач, стоящих перед экономикой Украины, важным является обеспечение рационального использования природных ресурсов и минимизация негативного воздействия на окружающую среду с учетом социально-экономических, финансовых и технических ограничений, требований национального законодательства, а также международных природоохранных обязательств Украины. Укрепление энергетической независимости государства и, прежде всего, сокращение потребления импортного природного газа путем внедрения энергосберегающих технологий и замещения его собственными энергетическими ресурсами должно стать основным направлением экономического развития Украины. Государственной политике в этой сфере не хватает системности и научной обоснованности.

Для частичного замещения природного газа в

качестве источника энергии рассматривается возможность развития производства тепловой и электрической энергии на базе ВИЭ, в том числе, на основе технологии прямого сжигания биомассы (в основном, в виде древесины и отходов сельского хозяйства), использование геотермальной энергии, солнечных коллекторов, а также тепловых насосов.

Украина имеет значительный потенциал развития биоэнергетики. По разным оценкам, потенциальная установленная мощность в сегменте биоэнергетики может составлять 10-15 ГВт тепла и 1-1,5 ГВт электроэнергии [1] и может удовлетворить около 13% общей потребности в энергии [2].

Совместное сжигание биомассы и угля имеет преимущества перед их отдельным сжиганием, при этом улучшается экология, снижается средняя стоимость сжигаемого на ТЭС топлива и вырабатываемой энергии.

В настоящей работе представлена математическая модель и результаты численных исследований аэродинамики, теплообмена и химического реагирования в топочной камере, в которой 80% бурого угля (БУ) подвергается термохимической переработке в неподвижном слое (НС), а 20% соломы сгорает в надслоевом пространстве (НП) в режиме пневмотранспорта.

Существуют различные схемы (прямоточные, противоточные и т.д.) организации слоевого процесса. Здесь рассматривается противоточная схема термической переработки БУ ("нижнее зажигание"), при которой топливо 2 (рис. 1) подается сверху на решетку 12 и пронизывается дутьевым воздухом 5, подаваемым снизу. Такая схема обладает устойчивым воспламенением за счет поступления на раскаленный горячий 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 10.

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 (рис. 1) характеризуется интенсивным выгоранием окислителя из-за гетерогенной реакции: $C + O_2 = CO_2$. На втором (восстановительная зона) 9, где концентрация кислорода в продуктах сгорания незначительна, происходит процесс газификации кокса БУ по реакции: $C + CO_2 = 2CO$ за счет тепловой энергии дымовых газов, покидающих окислительную зону. На выходе из НС синтетический газ смешивается с продуктами пиролиза БУ и соломы и сформировавшаяся газовая смесь вместе с коксозольными частицами соломы сжигается в НП 10.

Предлагаемая методика расчета базируется на следующих основных предпосылках.

Неподвижный слой:

- 1) процесс 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 $C + CO_2 = 2CO$;

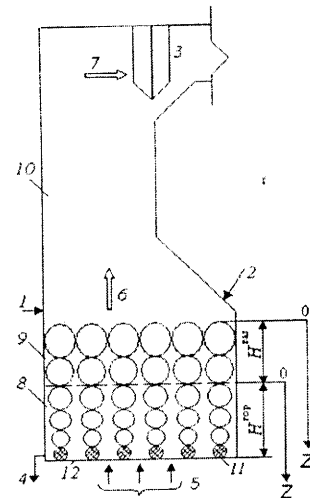


Рис. 1. Схема котлоагрегата с неподвижным слоем:
 1 – подача вторичного воздуха; 2 – подача исходного топлива; 3 – ширмовый пароперегреватель; 4 – выход сливной зоны; 5 – подача первичного воздуха; 6, 7 – уходящие газы; 8 – кислородная зона; 9 – восстановительная зона; 10 – надслоевое пространство; 11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

4) газовая смесь в слое состоит из кислорода, азота, двуокиси и окиси углерода;

5) дисперсная фаза представляет собой монодисперсные коксозольные частицы БУ сферической формы;

6) зола сосредоточена внутри частицы и не оказывает влияния на гетерогенное горение. Последнее протекает на поверхности коксовых частиц БУ, в результате их размер уменьшается до диаметра золотой оболочки.

Зона пневмотранспорта:

1) стехиометрическая схема реакций включает в себя три гетерогенных реакции: $C + O_2 = CO_2$; $2C + O_2 = 2CO$; $C + CO_2 = 2CO$ и две гомогенных: $2CO + O_2 = 2CO_2$ и $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$;

2) выход летучих веществ (CO , CH_4 , CO_2 и т.д.), а также испарение влаги исходного топлива, происходят мгновенно на входе в НП;

3) газовая смесь в НП состоит из кислорода, азота, двуокиси и окиси углерода, метана, водяного пара и двуокиси серы;

4) дисперсная фаза в НП включает в себя M_C фракций коксовых и M_{ash} фракций золотых частиц соломы сферической формы;

5) гетерогенное горение протекает на поверхности коксовых частиц соломы, вследствие чего их размер уменьшается.

В настоящей работе представлена математическая модель и результаты численных исследований аэродинамики, теплообмена и химического реагирования в топочной камере, в которой 80% бурого угля (БУ) подвергается термохимической переработке в неподвижном слое (НС), а 20% соломы сгорает в надслоевом пространстве (НП) в режиме пневмотранспорта.

Существуют различные схемы (прямоточные, противоточные и т.д.) организации слоевого процесса. Здесь рассматривается противоточная схема термической переработки БУ ("нижнее зажигание"), при которой топливо 2 (рис. 1) подается сверху на решетку 12 и пронизывается дутьевым воздухом 5, подаваемым снизу. Такая схема обладает устойчивым воспламенением за счет поступления на раскаленный горячий 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 10.

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 (рис. 1) характеризуется интенсивным выгоранием окислителя из-за гетерогенной реакции: $C + O_2 = CO_2$. На втором (восстановительная зона) 9, где концентрация кислорода в продуктах сгорания незначительна, происходит процесс газификации кокса БУ по реакции: $C + CO_2 = 2CO$ за счет тепловой энергии дымовых газов, покидающих окислительную зону. На выходе из НС синтетический газ смешивается с продуктами пиролиза БУ и соломы и сформировавшаяся газовая смесь вместе с коксозольными частицами соломы сжигается в НП 10.

Предлагаемая методика расчета базируется на следующих основных предпосылках.

Неподвижный слой:

- 1) процесс 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 $C + CO_2 = 2CO$;

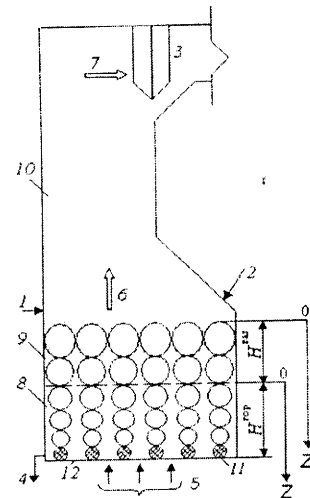


Рис. 1. Схема котлоагрегата с неподвижным слоем:
 1 – подача вторичного воздуха; 2 – подача исходного топлива; 3 – ширмовый пароперегреватель; 4 – выход сливной зоны; 5 – подача первичного воздуха; 6, 7 – уходящие газы; 8 – кислородная зона; 9 – восстановительная зона; 10 – надслоевое пространство; 11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

4) газовая смесь в слое состоит из кислорода, азота, двуокиси и окиси углерода;

5) дисперсная фаза представляет собой монодисперсные коксозольные частицы БУ сферической формы;

6) зола сосредоточена внутри частицы и не оказывает влияния на гетерогенное горение. Последнее протекает на поверхности коксовых частиц БУ, в результате их размер уменьшается до диаметра золовой оболочки.

Зона пневмотранспорта:

1) стехиометрическая схема реакций включает в себя три гетерогенных реакции: $C + O_2 = CO_2$; $2C + O_2 = 2CO$; $C + CO_2 = 2CO$ и две гомогенных: $2CO + O_2 = 2CO_2$ и $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$;

2) выход летучих веществ (CO , CH_4 , CO_2 и т.д.), а также испарение влаги исходного топлива, происходят мгновенно на входе в НП;

3) газовая смесь в НП состоит из кислорода, азота, двуокиси и окиси углерода, метана, водяного пара и двуокиси серы;

4) дисперсная фаза в НП включает в себя M_C фракций коксовых и M_{ash} фракций золовых частиц соломы сферической формы;

5) гетерогенное горение протекает на поверхности коксовых частиц соломы, вследствие чего их размер уменьшается.

Основные уравнения.

Неподвижный слой. Зона горения. Уравнение неразрывности для кислорода (ось z направлена вниз (рис. 1)):

$$\frac{dB_{O_2}^{гор}}{dz} = A_1 B_{O_2}^{гор} \left[\delta_0^3 - \frac{3A_2}{A_1} (B_{O_2}^{гор} - B_{O_2,e}^{гор}) \right]^{2/3}, \quad (1)$$

где B – расход частиц, кг/с; z – аксиальная координата, м; δ – диаметр частицы, м; индексы: гор – кислородная зона; е – выход.

Уравнение неразрывности для коксозольных частиц БУ:

$$\frac{d\delta^{гор}}{dz} = \frac{A_1 \delta^{гор3}}{3} - (A_2 B_{O_2,e}^{гор} + \frac{A_1 \delta_0^3}{3}). \quad (2)$$

Уравнение теплового баланса для коксозольных частиц БУ:

$$\frac{d(\beta^{гор} t_p^{гор})}{dz} = \frac{0,48 \beta^{гор}}{\eta_g u_p c_p^{гор} \delta^{гор} \rho_p} \times \left[\frac{D_{O_2 \rightarrow см} Q_{C \cdot O_2} B_{O_2}^{гор}}{\mu_{O_2} f_r} - |u_g^{гор}| \lambda_g (t_p^{гор} - t_g^{гор}) \right] - (Q_{rad}^{гор} - Q_{cond}^{гор}), \quad (3)$$

где β – истинная объемная концентрация частиц; η – кинематическая вязкость, м²; u – скорость частицы, м/с; c – теплоемкость, кДж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; μ – молекулярная масса, кг/кмоль; f – сечение, м²; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); Q – тепловой эффект реакции, кДж/кмоль или тепловой поток, кДж/(с·м³); D – коэффициент диффузии, м²/с. Индексы нижние: g – газ; p – частица; rad – лучистый теплообмен; cond – конвективно-кондуктивный теплообмен.

Уравнение теплового баланса для газовой фазы:

$$\frac{d(B_g^{гор} t_g^{гор})}{dz} = - \frac{0,48 |u_g^{гор}| \lambda_g (t_p^{гор} - t_g^{гор}) \beta^{гор} f_r}{\eta_g c_p^{гор} \delta^{гор}}. \quad (4)$$

Зона газификации. Уравнения неразрывности для газовой фазы и коксозольных частиц БУ:

$$\frac{dB_{CO_2}^{газ}}{dz_1} = \frac{6k_{C+CO_2} \alpha_D^{газ} B_{CO_2}^{газ} \beta^{газ}}{(k_{C+CO_2} + \alpha_D^{газ}) \delta^{газ} |u_g^{газ}|};$$

$$\alpha_D^{газ} = 0,08 |u_g^{газ}| D_{CO_2 \rightarrow см} / \eta_g; \quad (5)$$

$$\frac{d\delta^{газ}}{dz_1} = - \frac{2\mu_C k_{C+CO_2} \alpha_D^{газ} B_{CO_2}^{газ}}{(k_{C+CO_2} + \alpha_D^{газ}) u_p \rho_p |u_g^{газ}| \mu_{CO_2} f_r},$$

где k – константа скорости реакции, м/с; α – коэффициент массообмена, м/с, или коэффициент теплообмена, кДж/(с·м²·К). Индексы верхние: газ – зона газификации.

Уравнения тепловых балансов дисперсной фазы и несущей среды:

$$\frac{d(\beta^{газ} t_p^{газ})}{dz_1} = - \frac{6k_{C+CO_2} \alpha_D^{газ} B_{CO_2}^{газ} \beta^{газ} Q_{C+CO_2}}{(k_{C+CO_2} + \alpha_D^{газ}) \delta^{газ} |u_g^{газ}| \mu_{CO_2} f_r u_p c_p^{газ} \rho_p} - \frac{0,48 |u_g^{газ}| \lambda_g (t_p^{газ} - t_g^{газ}) \beta^{газ}}{\eta_g u_p c_p^{газ} \delta^{газ} \rho_p} - Q_{rad}^{газ} - Q_{cond}^{газ};$$

$$\frac{d(B_g^{газ} t_g^{газ})}{dz_1} = - \frac{0,48 |u_g^{газ}| \lambda_g (t_p^{газ} - t_g^{газ}) \beta^{газ} f_r}{\eta_g c_p^{газ} \delta^{газ}}.$$

Аэродинамические характеристики НС могут быть определены согласно рекомендациям работы [3]:

$$Ar = \frac{g \langle \delta \rangle^3 (\rho_p - \langle \rho_g \rangle)}{\eta_g^2 \langle \rho_g \rangle};$$

$$Re = \frac{Ar (1 - \beta_0)^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{Ar (1 - \beta_0)^{4,75}}}; \quad (7)$$

$$\langle u_g \rangle = \frac{Re \eta_g}{\langle \delta \rangle}; \quad \beta_0 = 0,6,$$

где Ar – критерий Архимеда; Re – критерий Рейнольдса. Индексы нижние: 0 – начальные условия.

Надслоевое пространство. Уравнения неразрывности для компонентов газа и частиц кокса соломы фракции j :

$$\frac{d(u_g C_{O_2})}{dz} = -6 \sum_{j=1}^{M_C} \alpha_{D,j} (C_{O_2} - C_{O_2,j}^w) \frac{\beta_j K_j}{\delta_{C,j}} - k_{CO+O_2} C_{O_2} C_{CO} - 2k_{CH_4+O_2} C_{O_2} C_{CH_4}, \quad (8)$$

где $g \rightarrow \text{экр}$; $j \rightarrow \text{экр}$; $s \rightarrow \text{экр}$; $j \rightarrow g$; $s \rightarrow g$ – лучистый теплообмен между газом и стенкой; между частицами кокса фракции j и стенкой; между частицами кокса фракции s и стенкой; между частицами кокса фракции j и газом; между частицами золы фракции s и газом соответственно; $i = j, s$; $j = 1 - M_C$; $s = 1 - M_{ash}$.

$$\frac{d(u_g C_{CO_2})}{dz} = 6 \sum_{j=1}^{M_C} \alpha_{D,\theta,j} (C_{CO_2,j}^w - C_{CO_2}) \frac{\beta_j K_j}{\delta_{C,j}} +$$

$$+ 2k_{CO+O_2} C_{O_2} C_{CO} + k_{CH_4+O_2} C_{O_2} C_{CH_4} \quad (9)$$

$$\frac{d(u_g C_{CO})}{dz} = 6 \sum_{j=1}^{M_C} \alpha_{D,\theta,j} (C_{CO,j}^w - C_{CO}) \frac{\beta_j K_j}{\delta_{C,j}} -$$

$$- 2k_{CO+O_2} C_{O_2} C_{CO} \quad (10)$$

$$\frac{d(u_g C_{CH_4})}{dz} = -k_{CH_4+O_2} C_{O_2} C_{CH_4} \quad (11)$$

$$\frac{d(u_g C_{H_2O})}{dz} = 2k_{CH_4+O_2} C_{O_2} C_{CH_4} \quad (12)$$

$$\frac{d(\beta_j u_{p,j})}{dz} = -[\alpha_{D,\theta,j} (C_{CO,j}^w - C_{CO}) +$$

$$+ \alpha_{D,\theta,j} (C_{CO_2,j}^w - C_{CO_2})] \frac{6\mu_c \beta_j K_j}{\delta_{C,j} \rho_{C,j}} \quad (13)$$

где g – газ; $g \rightarrow \text{экp}$; $j \rightarrow \text{экp}$; $s \rightarrow \text{экp}$; $j \rightarrow g$; $s \rightarrow g$ – лучистый теплообмен между газом и стенкой; между частицами кокса фракции j и стенкой; между частицами золы фракции s и стенкой; между частицами кокса фракции j и газом; между частицами золы фракции s и газом соответственно; $i = j, s; j = 1 - M_C; s = 1 - M_{\text{ash}}$; γ, χ, θ – параметры; φ – степень конверсии углекислого газа; E – энергия активации, кДж/кмоль; K – фактор формы; F – сила, Н/м³; C – концентрация газовых компонентов, кмоль/м³; индексы верхние: w – поверхность (частицы или экранная поверхность топки).

Уравнение переноса импульса частиц соломы фракции i :

$$\frac{d(\beta_i u_{p,i}^2)}{dz} = \frac{F_{a,i}}{\rho_{p,i}} - g \beta_i \quad (14)$$

Уравнение сохранения количества движения газовой фазы:

$$\frac{d(\rho_g u_g^2)}{dz} = -\frac{dP}{dz} - g \rho_g - \sum_{i=1}^{M_C + M_{\text{ash}}} F_{a,i} \quad (15)$$

Уравнение сохранения энергии несущей среды:

$$\frac{d(\rho_g u_g c_g t_g)}{dz} = 6 \sum_{i=1}^{M_C + M_{\text{ash}}} \alpha_{\text{conv},i} (t_{p,i} - t_g) \frac{\beta_i K_i}{\delta_{C,i}} -$$

$$- Q_{g \rightarrow \text{экp}} + \sum_{i=1}^{M_C + M_{\text{ash}}} Q_{i \rightarrow g} + k_{CO+O_2} C_{O_2} C_{CO} Q_{CO+O_2} +$$

$$+ k_{CH_4+O_2} C_{O_2} C_{CH_4} Q_{CH_4+O_2} \quad (16)$$

Уравнение теплового баланса частиц кокса соломы фракции j :

$$\frac{d(\beta_j u_{p,j} c_{p,j} t_{p,j})}{dz} =$$

$$= [(k_{C+O_2,j} Q_{C+O_2,j} + k_{C+0,5O_2,j} Q_{C+0,5O_2,j}) C_{O_2,j}^w -$$

$$- k_{C+CO_2,j} C_{CO_2,j}^w Q_{C+CO_2,j} - \alpha_{\text{conv},j} (t_{p,j} - t_g)] \times$$

$$\times 6 \beta_j K_j / (\delta_{C,j} \rho_{C,j}) - Q_{j \rightarrow \text{экp}} / \rho_{C,j} - Q_{j \rightarrow g} / \rho_{C,j} \quad (17)$$

Уравнение теплового баланса золовых частиц соломы фракции s

$$\frac{d(\beta_s u_{p,s} c_{p,s} t_{p,s})}{dz} = -\alpha_{\text{conv},s} (t_{p,s} - t_g) \times$$

$$\times \frac{6 \beta_s K_s}{\delta_s \rho_{\text{ash},s}} \frac{Q_{s \rightarrow \text{экp}}}{\rho_{\text{ash},s}} \frac{Q_{s \rightarrow g}}{\rho_{\text{ash},s}} \quad (18)$$

индексы нижние: a – сила аэродинамического сопротивления частицы; ash – зола; conv – конвективный теплообмен.

На основании систем уравнений (1)–(18) разработаны программы для расчета аэродинамики, теплообмена и горения биомассы и угля в топочных камерах с неподвижным слоем.

Некоторые численные результаты.

Обсудим результаты расчетов совместного сжигания соломы и бурого угля марки "Днепровский" в топочных камерах с неподвижным слоем при следующих исходных данных. Неподвижный слой: марка угля – БУ "Днепровский"; $\rho_p = 510$ кг/м³; $t_{\text{air}} = 90^\circ\text{C}$; $B_{\text{air}} = 8000$ кг/ч; $E_{C+CO_2} = 215 \cdot 10^3$ кДж/кмоль; $\varphi = 15\%$; $\delta = 11$ мм; $t_{p0} = 30^\circ\text{C}$; $C_{CO} = 0,65$; $C_{\text{ash}0} = 0,35$. Надслоевое пространство: марка топлива – солома; $\delta_{CO} = 2,2$ мм; $\delta_{\text{ash}} = 1,7$ мм; $\rho_C = 80$ кг/м³; $\rho_{\text{ash}} = 80$ кг/м³; $t_{p0} = 30^\circ\text{C}$; $t_w = 500^\circ\text{C}$; $t_{g0} = 600^\circ\text{C}$; $B_{CO} = 374$ кг/ч; $B_{\text{ash}0} = 193$ кг/ч; $B_{O_2,0} = 6241$ кг/ч; $B_{CO_2,0} = 2600$ кг/ч; $B_{CO,0} = 1621$ кг/ч; $B_{CH_4,0} = 813$ кг/ч; $B_{N_2,0} = 26955$ кг/ч; $B_{H_2O,0} = 2933$ кг/ч; $K_{\text{con}} = 2$. Расчетный материал по термохимической переработке БУ в НС приведен в таблице 1, а на рис. 2, 3 представлены профили наиболее важных параметров рабочего процесса в НП.

На рис. 2 изображено распределение температур газозвеси по высоте НП. Интервал $0 < z < 0,5$ м включает в себя горизонтальный и разгонный участки. Поведение функции $t_g(z)$ (кривая 2) формируется за счет тепловыделения, обусловленного протеканием гомогенной реакции: $2CO + O_2 = 2CO_2$ и под влиянием теп-

лоты, полученной в результате выгорания метана: $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$ (рис. 3 а, б). В итоге происходит резкое убывание зависимости 4 и возрастание кривой 3 (рис. 3 в). В рассматриваемом диапазоне кислород в основном расходуется на гомогенные реакции, так как степень конверсии углерода составляет всего лишь 5%, поэтому рост кривой 1 (рис. 2) обеспечивается за счет межфазного теплообмена. В интервале $0,5 \text{ м} < z < 1 \text{ м}$ на характер распределения кривой 1 оказывает влияние не только теплообмен, но и тепловыделение из-за гетерогенных реакций ($\phi = 17\%$). На участке $1 \text{ м} < z < 14 \text{ м}$, где выгорает 77% углерода соломы, несмотря на значительное понижение температуры $t_{C,con}$, отношение константы скорости реакции к коэффициенту массообмена больше единицы ($3,4 \leq k_{C+O_2} / \alpha_{D,\gamma} \leq 21,3$). Это говорит о том, что процесс горения соломы протекает преимущественно в диффузионной области реагирования и зависит в основном от величины потока диффундирующего окислителя через приведенную пленку к поверхности углеродной частицы.

Таблица 1. Результаты расчетов процесса горения и газификации бурого угля в неподвижном слое

Наименование	Размерность	Численные результаты
Расход газовых компонентов на выходе из кислородной зоны:	кг/ч	
кислорода		27,6
углекислого газа		2492
азота		6160
Количество сгоревшего углерода в кислородной зоне	кг/ч	680
Расход газовых компонентов на выходе из восстановительной зоны:	кг/ч	
углекислого газа		2118
окси углерода		476
Суммарный расход газа на выходе из слоя	кг/ч	8782
Количество прореагировавшего углерода в восстановительной зоне	кг/ч	102
Сечение слоя	м ²	5
Высота кислородной зоны	м	0,115
Высота восстановительной зоны	м	0,0165

Выводы. Построена стационарная модель движения, тепломассообмена и химического реагирования коксозольных частиц биомассы и угля, основанная на уравнениях неразрывности, движения и энергии фаз с учетом лучистого, конвективного и кондуктивного теплообмена между газом, дисперсной фазой и настенными экранами топки, гомогенных и гетерогенных реакций, сил тяжести и межфазного взаимодействия. С использованием разработанной методики расчета проведены широкие численные исследования особенностей рабочего процесса в реакторе с НС при сжигании БУ и соломы. Показано, что процесс химического реагирования соломы протекает в диффузионной области и зависит от скорости подвода окислителя к внешней поверхности коксовой частицы.

Модель удобна для реализации на компьютере и позволяет выбрать оптимальный режим работы котлоагрегата при горении и газификации того или иного топлива.

1. Проект оновленої Енергетичної стратегії України на період до 2030 року. (Мінернерговугілля.); www.enerv.gov.ua

2. Гелетуа Г.Г., Железна Т.А. Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні // Промислова теплоенергетика: Інститут технічної теплофізики год. – 2010. – Т. 32. – № 4 – С. 94–100.

3. Померанцев В.В., Арефьев К.И., Ахмедов Д.Б. и др. Основы практической теории горения. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.

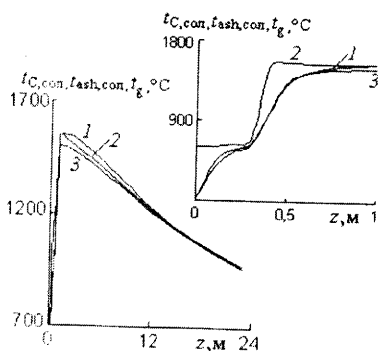


Рис. 2. Распределение температур газа, коксовых и зольных частиц соломы по высоте НП:

1 – $t_{C,con}$; 2 – t_g ; 3 – $t_{ash,con}$.

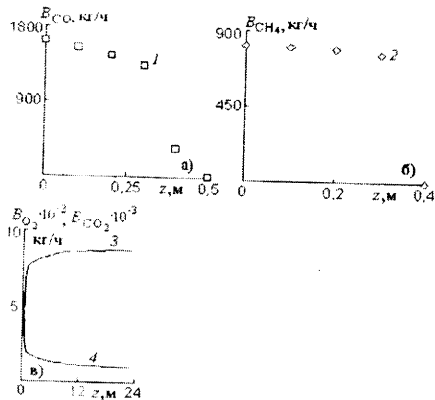


Рис. 3. Распределение расходов окиси углерода (а), метана (б), кислорода и углекислого газа (в) по высоте НП:

1 – V_{CO} ; 2 – V_{CH_4} ; 3 – V_{CO_2} ; 4 – V_{O_2} .