

УДК 532.529: 517.4

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ КОКСОЗОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ СОЛОМЫ В НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ

Б.Б. Рохман¹, доктор технических наук, С.В. Ключ², кандидат технических наук

¹Институт угольных энерготехнологий НАН Украины
04070 г. Киев, ул. Андреевская, 19

²Институт возобновляемой энергетики НАН Украины
02094 г. Киев, ул. Гната Хоткевича, 20А

Построена модель процесса горения и газификации коксозольной частицы твердого топлива в неподвижном слое с учетом радиационного и кондуктивно-конвективного теплообмена и гетерогенных химических реакций. На базе разработанной модели проведены широкие численные исследования влияния диаметра частицы биомассы, содержания окислителя в газовой фазе и соотношения интервалов поверхностного и объемного реагирования на процесс термохимической переработки коксозольной частицы соломы в неподвижном слое. Библ 5, рис. 5.

Ключевые слова: неподвижный слой, солома, горение, реакция, теплообмен, концентрация, углерод, кислород.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF VARIOUS PARAMETERS ON THE THERMOCHEMICAL PROCESSING OF THE COKE-ASH STRAW PARTICLE IN THE FIXED BED

B. Rokhman¹, doctor of technical sciences, leading researcher, S. Kliush², candidate of technical sciences, senior researcher

¹Coal Energy Technology Institute NAS of Ukraine,
04070, 19 Andreevskaya Street, Kyiv

²Renewable Energy Institute NAS of Ukraine
02094, 20A Gnata Khotkevicha Street, Kyiv

A model for the combustion and gasification of a coke-ash solid fuel particle in a fixed bed, taking into account radiative and conductive-convective heat transfer and heterogeneous chemical reaction is constructed. On the basis of the developed model, extensive numerical studies of the influence of the diameter of the biomass particle, the content of the oxidant in the gas phase, and the ratio of the surface and bulk reaction intervals to the thermochemical processing of the coke-ash straw particle in a fixed bed were carried out. References 5, fig. 5.

Keywords: fixed bed, straw, combustion, reaction, heat exchange, concentration, carbon, oxygen.



Б.Б. Рохман
B. Rokhman

Сведения об авторе: ведущий научный сотрудник Института угольных энерготехнологий НАН Украины, доктор технических наук. Биографические данные Рохмана Б.Б. размещены в известных мировых изданиях «Who's Who in Science and Engineering» и «2000 Outstanding Intellectuals of the 21st Century».

Образование: Новочеркасский политехнический институт.

Научная сфера: математическое моделирование аэродинамики, тепломассообмена и химического реагирования полидисперсного ансамбля твердого топлива в камерных и слоевых топках, в реакторах с циркулирующим кипящим слоем и в кипящем слое.

Information about the author: the leading researcher of the Institute of Coal Energy Technologies of the NAS of Ukraine, doctor of technical sciences. Biographical information of Rokhman B.B. is published in well-known world directories «Who's Who in Science and Engineering» and «2000 Outstanding Intellectuals of the 21st Century».

Education: Novocherkassk Polytechnic Institute.

Research area: mathematical modeling of aerodynamics, heat and mass transfer and chemical reaction of a polydisperse ensemble of solid fuel in chamber and layer furnaces, in reactors with a circulating fluidized bed and in the fluidized bed.

© Б.Б. Рохман, С.В. Ключ, 2018

Публикации: более 90 научных работ, из них 27 работ содержатся в наукометрической базе Scopus и 4 в наукометрической базе Web of Science.

ORCID: 0000-0002-1270-6102

Контакты: +38 (044) 425-53-77

e-mail: brolene@yahoo.com

Publications: more than 90 scientific papers, 27 of them are contained in the science-based Scopus database and 4 in the science-based Web of Science database.

ORCID: 0000-0002-1270-6102

Contacts: +38 (044) 425-53-77

e-mail: brolene@yahoo.com



С.В. Ключ

S. Klius

Сведения об авторе: кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела возобновляемых органических энергоносителей ИВЭ НАН Украины

Образование: Сумский государственный университет, 2010.

Научная сфера: биоэнергетика, биоуголь, газификация.

Публикации: 17, в т.ч. 4 патента.

ORCID: 0000-0002-5804-4925

Контакты: +38 (044) 206-28-09

e-mail: biomassa@ukr.net

Information about the author: candidate of technical sciences, research fellow, Department of Renewable Organic Energy Carriers IRE NAS of Ukraine.

Education: Sumy State University, 2010.

Research area: bioenergy, biocoal, gasification.

Publications: 17, including 4 patents.

ORCID: 0000-0002-5804-4925

Contacts: +38 (044) 206-28-09

e-mail: biomassa@ukr.net

Перечень использованных обозначений и сокращений:

$A, N, O,$	– массовые доли золы, азота, кислорода, серы,	u	– скорость, м/с
$S, H, W,$	водорода, влаги и летучих веществ в твердом		
V	топливе		
Ar	– критерий Архимеда	α	– коэффициент массообмена, м/с
C	– концентрация газовых компонентов, (кмоль/м ³) или массовая доля углерода в твердом топливе	δ	– диаметр частицы, м
c	– теплоемкость, кДж/(кг·К)	γ	– длина частицы, м
E	– энергия активации, кДж/кмоль	ε	– порозность слоя
h	– коэффициент теплообмена между слоем и частицей, кДж/(с·м ² ·К)	η	– кинематическая вязкость, м ² /с
k	– константа скорости реакции, м/с	ρ	– плотность, кг/м ³
m	– масса, кг	τ	– время, с
Q	– тепловой эффект реакции, кДж/кмоль	φ	– ширина частицы, м
r	– радиус частицы, м	ψ	– толщина частицы, м
t	– температура, °C		
<i>индексы нижние:</i>			
ash	– зола;	lim	– граничное значение;
bad	– слой;	let	– летучие; O ₂ , CO ₂ кислород и двуокись углерода;
C	– углерод;	p	– частица;
cond	– конвективно-кондуктивный теплообмен;	rad	– лучистый теплообмен;
D	– диффузия;	sol	– солома;
fix	– фиксированный;	0	– начальные условия;
g	– газ;	I–IX	– варианты расчета.
<i>индексы верхние:</i>			
w	– поверхность;	г	– рабочая масса топлива.
vol	– объем;		

Введение. Настоящая работа посвящена математическому моделированию и теоретическому исследованию влияния различных факторов (концентраций кислорода и углекислого газа в газовой смеси, соотношения диапазонов поверхностного и объемного реагирования, геометрических параметров частицы) на процесс термохимической переработки коксозольной частицы соломы в неподвижном слое.

Постановка задачи. Предлагаемая модель базируется на следующих основных предпосылках:

- 1) стехиометрическая схема реакций включает в себя три гетерогенные реакции $C+O_2=CO_2$, $2C+O_2=2CO$ и $C+CO_2=2CO$, которые протекают как на поверхности частицы, так и в ее объеме;
- 2) частица соломы ($C^r=41\%$, $S^r=0,1\%$, $H^r=4,6\%$, $O^r=31,4\%$, $W^r=14,8\%$, $N^r=0,4\%$, $A^r=7,7\%$, $V_{\text{лет}}^r=65,4\%$) имеет шарообразную форму, диаметр которой определяется как

$$\delta_{\text{sol0}} = \sqrt[3]{\frac{6\gamma\varphi\Psi}{\pi}}; \quad (1)$$

- 3) выход летучих веществ и испарение исходной влаги из частицы соломы происходит вне слоя (в надслоевом пространстве или пиролизере), что приводит к уменьшению ее диаметра δ_{sol0} согласно выражению

$$\delta_0 = \delta_{\text{sol0}} \sqrt[3]{\frac{(\rho_C + (\rho_{\text{ash}} - \rho_C)C_{C0})(1 - (V_{\text{лет}}^r + W^r)/100)}{(\rho_C + (\rho_{\text{ash}} - \rho_C)C_{C0})(1 - C_{C0})}}, \quad (2)$$

в результате чего частица соломы на входе в слой состоит из углерода и золы, массовые концентрации которых вычисляются по формулам

$$C_{C0} = \frac{C_{\text{fix}}^r}{100 - S^r - H^r - O^r - N^r - C_{\text{лет}}^r - W^r},$$

$$A_0 = \frac{A^r}{100 - S^r - H^r - O^r - N^r - C_{\text{лет}}^r - W^r}; \quad (3)$$

- 4) частица соломы в неподвижном слое окружена инертными частицами диаметром δ_0 ;
- 5) для поверхностного реагирования используется модель сжимающегося горячего ядра, а для объемного – модель прочного золowego

каркаса, когда реакция протекает во всем объеме частицы;

- 6) используется следующая схема горения и газификации частицы: на первом этапе при достаточно высокой концентрации углерода ($C_{C,\text{lim}} < C_C < C_{C0}$) реагирование происходит на поверхности частицы с уменьшением ее диаметра; на втором ($C_C \leq C_{C,\text{lim}}$) – реагирование протекает в объеме при неизменном размере частицы;
- 7) в течение всего времени пребывания в неподвижном слое частица соломы сохраняет шарообразную форму;
- 8) газовая смесь состоит из кислорода, азота и двуокиси углерода. Окисью углерода, которая получается по реакциям $2C+O_2=2CO$ и $C+CO_2=2CO$ пренебрегаем;
- 9) газ движется в режиме идеального вытеснения;
- 10) энергии активации для гетерогенных реакций принимались как для древесного угля.

Основные уравнения. Подобно [1–3] запишем выражения для массы коксозольной частицы в начальный и текущий моменты времени

$$m_p = \frac{m_{p0}(1 - C_{C0})}{(1 - C_C)}, \quad m_{p0} = \frac{4\pi r_0^3 \rho_{p0}}{3},$$

$$C_{C0} = \frac{m_{C0}}{m_{p0}}, \quad (4)$$

и ее объема ($\tau = 0$)

$$\frac{1}{\rho_{p0}} = \frac{m_{C0}/m_{p0}}{\rho_C} + \frac{m_{\text{ash}}/m_{p0}}{\rho_{\text{ash}}}. \quad (5)$$

Преобразуя (5) с использованием соотношения $m_{\text{ash}}/m_{p0} = 1 - C_{C0}$, получим формулу для плотности частицы исходного топлива

$$\rho_{p0} = \frac{\rho_{\text{ash}}\rho_C}{\rho_C + C_{C0}(\rho_{\text{ash}} - \rho_C)}. \quad (6)$$

Производная от первого выражения (4) с учетом (6) записывается как

$$\frac{dm_p}{d\tau} = \frac{4\pi r_0^3 \rho_{\text{ash}}\rho_C(1 - C_{C0})}{3[\rho_C + C_{C0}(\rho_{\text{ash}} - \rho_C)](1 - C_C)^2} \frac{dC_C}{d\tau}. \quad (7)$$

С другой стороны, уравнение баланса массы коксозольной частицы можно представить в виде

$$\frac{dm_p}{d\tau} = -4\pi r^2 \mu_c [(k_{C+O_2} + 2k_{C+0.5O_2})C_{O_2}^w + k_{C+CO_2}C_{CO_2}^w], \quad (8)$$

где концентрации газовых компонентов на поверхности коксозольной частицы находятся по формулам

$$C_{O_2}^w = \frac{\alpha_{D,O_2} C_{O_2}}{\alpha_{D,O_2} + k_{C+O_2} + k_{C+0.5O_2}},$$

$$C_{CO_2}^w = \frac{\alpha_{D,CO_2} C_{CO_2} + k_{C+O_2} C_{O_2}^w}{\alpha_{D,CO_2} + k_{C+CO_2}}. \quad (9)$$

В уравнении (8) фигурирует неизвестная функция $r(C_C)$. Для вывода выражения $r(C_C)$ запишем отношение объемов частицы твердого топлива в начальный и текущий моменты времени в следующем виде

$$\frac{r^3}{r_0^3} = \frac{m_C}{m_{C_0}} \left(\frac{\rho_{ash} + m_{ash} \rho_C / m_C}{\rho_{ash} + m_{ash} \rho_{C_0} / m_{C_0}} \right). \quad (10)$$

Преобразуем (10) с учетом $\frac{m_{ash}}{m_C} = \frac{1}{C_C} - 1$,

$$\frac{m_{ash}}{m_{C_0}} = \frac{1}{C_{C_0}} - 1 \text{ и } \frac{m_C}{m_{C_0}} = \frac{1/C_{C_0} - 1}{1/C_C - 1}. \text{ В результа-}$$

те

$$r = r_0^3 \sqrt[3]{\frac{(\rho_C + (\rho_{ash} - \rho_C)C_C)(1 - C_{C_0})}{(\rho_C + (\rho_{ash} - \rho_C)C_{C_0})(1 - C_C)}}$$

$$(C_{C,lim} < C_C < C_{C_0}),$$

$$r_{lim} = r_0^3 \sqrt[3]{\frac{(\rho_C + (\rho_{ash} - \rho_C)C_{C,lim})(1 - C_{C_0})}{(\rho_C + (\rho_{ash} - \rho_C)C_{C_0})(1 - C_{C,lim})}}$$

$$(0 < C_C \leq C_{C,lim}). \quad (11)$$

Приравняв правые части выражений (7) и (8), с учетом (11) после несложных преобразований получим уравнение для скорости поверхностного реагирования частицы в интервале $C_{C,lim} < C_C < C_{C_0}$

$$\left(\frac{dC_C}{d\tau} \right)^w = -FS(1 - C_C)^{4/3}(1 + bC_C)^{2/3},$$

$$b = \frac{\rho_{ash}}{\rho_C} - 1, \quad F = \frac{3\mu_C(1 + bC_{C_0})^{1/3}}{r_0\rho_{ash}(1 - C_{C_0})^{1/3}},$$

$$S = (k_{C+O_2} + 2k_{C+0.5O_2})C_{O_2}^w + k_{C+CO_2}C_{CO_2}^w. \quad (12)$$

Рассуждая подобно [2], можно построить выражение для скорости объемного реагирования частицы в диапазоне $0 < C_C \leq C_{C,lim}$

$$\left(\frac{dC_C}{d\tau} \right)^{vol} = -\frac{3\mu_C(1 - C_C)C_C}{r_{lim}\rho_C} \times$$

$$\times [(k_{C+O_2} + 2k_{C+0.5O_2})C_{O_2}^w + k_{C+CO_2}C_{CO_2}^w]. \quad (13)$$

Температура частицы вычисляется по уравнению

$$\frac{d(c_p t_p \delta^3)}{d\tau} = -\frac{6\delta^2(h_{cond} + h_{rad})(t_p - t_g)}{\rho_p} +$$

$$+ \frac{6\delta^2[(k_{C+O_2}Q_{C+O_2} + k_{C+0.5O_2}Q_{C+0.5O_2})C_{O_2}^s]C_{vol}}{\rho_p} -$$

$$- \frac{6\delta^2[k_{C+CO_2}C_{CO_2}^sQ_{C+CO_2}]C_{vol}}{\rho_p}, \quad (14)$$

где величина C_{vol} находится по формуле

$$C_{vol} = \frac{C_C\rho_{ash}(1 - C_{C,lim})}{(\rho_C + (\rho_{ash} - \rho_C)C_{C,lim})} \times$$

$$\times \frac{1}{(1 - C_C)} \quad (C_C \leq C_{C,lim}), \quad (15)$$

$$C_{vol} = 1 \quad (C_C > C_{C,lim}),$$

а коэффициенты теплообмена h_{cond} и h_{rad} – согласно [4].

Скорость газа в неподвижном слое вычисляется по рекомендациям [4]

$$u_g = \frac{\eta_g Ar_p \varepsilon^{4.75}}{\delta(18 + 0.61\sqrt{Ar_p \varepsilon^{4.75}})}. \quad (16)$$

Некоторые результаты расчетов. Обсудим результаты расчетов девяти вариантов термохимической переработки коксозольной частицы соломы в неподвижном слое при следующих исходных данных.

Вариант I: $\gamma=0,015$ м, $\varphi=0,005$ м, $\psi=0,0004$ м;
 вариант II: $\gamma=0,02$ м, $\varphi=0,006$ м, $\psi=0,0002$ м;
 вариант III: $\gamma=0,025$ м, $\varphi=0,007$ м, $\psi=0,0003$ м;
 вариант IV: $\gamma=0,03$ м, $\varphi=0,008$ м, $\psi=0,0005$ м;
 вариант V: $\gamma=0,035$ м, $\varphi=0,01$ м, $\psi=0,0006$ м.

В вариантах I–V $C_{C,lim}=5\%$. Вариант VI: $\gamma=0,035$ м, $\varphi=0,01$ м, $\psi=0,0006$ м, $C_{C,lim}=12,22\%$;
 вариант VII: $\gamma=0,035$ м, $\varphi=0,01$ м, $\psi=0,0006$ м, $C_{C,lim}=24,44\%$. В вариантах I–VII

$C_{O_2}=0,00144313$ кмоль/м³ (объемная концентрация кислорода в газовой смеси составляет 16%),
 $C_{CO_2}=0,000327984$ кмоль/м³. Вариант VIII:

$\gamma=0,035$ м, $\varphi=0,01$ м, $\psi=0,0006$ м, $C_{C,lim}=24,44\%$,
 $C_{O_2}=0,0018941$ кмоль/м³ (объемная концентрация кислорода в газовой смеси составляет 21%),
 $C_{CO_2}=0$; вариант IX: $\gamma=0,035$ м, $\varphi=0,01$ м, $\psi=0,0006$ м, $C_{C,lim}=24,44\%$, $C_{O_2}=0,000450977$ кмоль/м³ (объемная концентрация кислорода в газовой смеси составляет 5%),
 $C_{CO_2}=0,00104955$ кмоль/м³.

Во всех вариантах: $E_{C+O_2}=81 \cdot 10^3$ кДж/кмоль [5],

$E_{C+0,5O_2}=89 \cdot 10^3$ кДж/кмоль,

$E_{C+CO_2}=178 \cdot 10^3$ кДж/кмоль, $C_{C0}=61,11\%$,

$t_{bad}=t_g=950^\circ\text{C}$, $\varepsilon=0,4$, $t_{p0}=30^\circ\text{C}$. Результаты расчетов проиллюстрированы на рис. 1–5, где представлены профили наиболее важных параметров процесса термохимической переработки коксозольной частицы соломы в неподвижном слое. На рис. 1 и 2 показано влияние диаметра δ на скорость выгорания коксозольной частицы соломы. В интервале $0 < \tau^w < 1$ с наблюдается быстрый

рост температуры частицы t_p из-за интенсивного лучистого и кондуктивно-конвективного теплообмена между слоем и частицей и тепловыделения за счет гетерогенных реакций $C+O_2=CO_2$ и $2C+O_2=2CO$, причем скорость изменения температуры у мелкой частицы $dt_p/d\tau^w$ значительно выше, чем у крупной (рис. 2а, ср. кривые 2 и 5; см. (14)). В диапазоне $1\text{с} < \tau^w < 27\text{с}$ происходит интенсивное выгорание частицы соломы, что приводит к уменьшению ее диаметра и массовой концентрации углерода в ней, при этом мелкая частица выгорает значительно быстрее, чем крупная (рис. 1а, в, ср. кривые 2 и 5). Здесь тепловыделение гетерогенных химических реакций несколько превалирует над теплообменом, поэтому функция $t_p(\tau^w)$ монотонно возрастает, причем $(dt_p/d\tau^w)_{II} > (dt_p/d\tau^w)_V$ (рис. 2б, ср. кривые 2 и 5). В зоне объемного реагирования, где значение тепловыделения гетерогенных химических реакций мало отличается от величины теплообмена между слоем и частицей, функция $t_p(\tau^{vol})$ слабо изменяется в интервале $0 < \tau^{vol} < 51\text{с}$. Подобно диапазону поверхностного реагирования, здесь скорость конверсии углерода мелкой частицы выше, чем крупной (рис. 1б, ср. кривые 2 и 5).

Проанализируем влияние соотношения интервалов поверхностного и объемного реагирования на процесс термохимической переработки коксозольной частицы соломы в неподвижном слое. Из рис. 3 видно, что с повышением доли объемного реагирования время выгорания частицы возрастает. Это связано, прежде всего, с реакционной поверхностью частицы. В зоне поверхностного реагирования выгорание происходит по всей внешней поверхности частицы. В области объемного реагирования часть поверхности занята золой, другая – углеродом, где протекают гетерогенные химические реакции. При этом, чем больше реагирующая поверхность, тем выше скорость конверсии углерода $(dC_C/d\tau^{vol})_{VII} > (dC_C/d\tau^{vol})_V$ (рис. 3 з, ср. кривые 1 и 3).

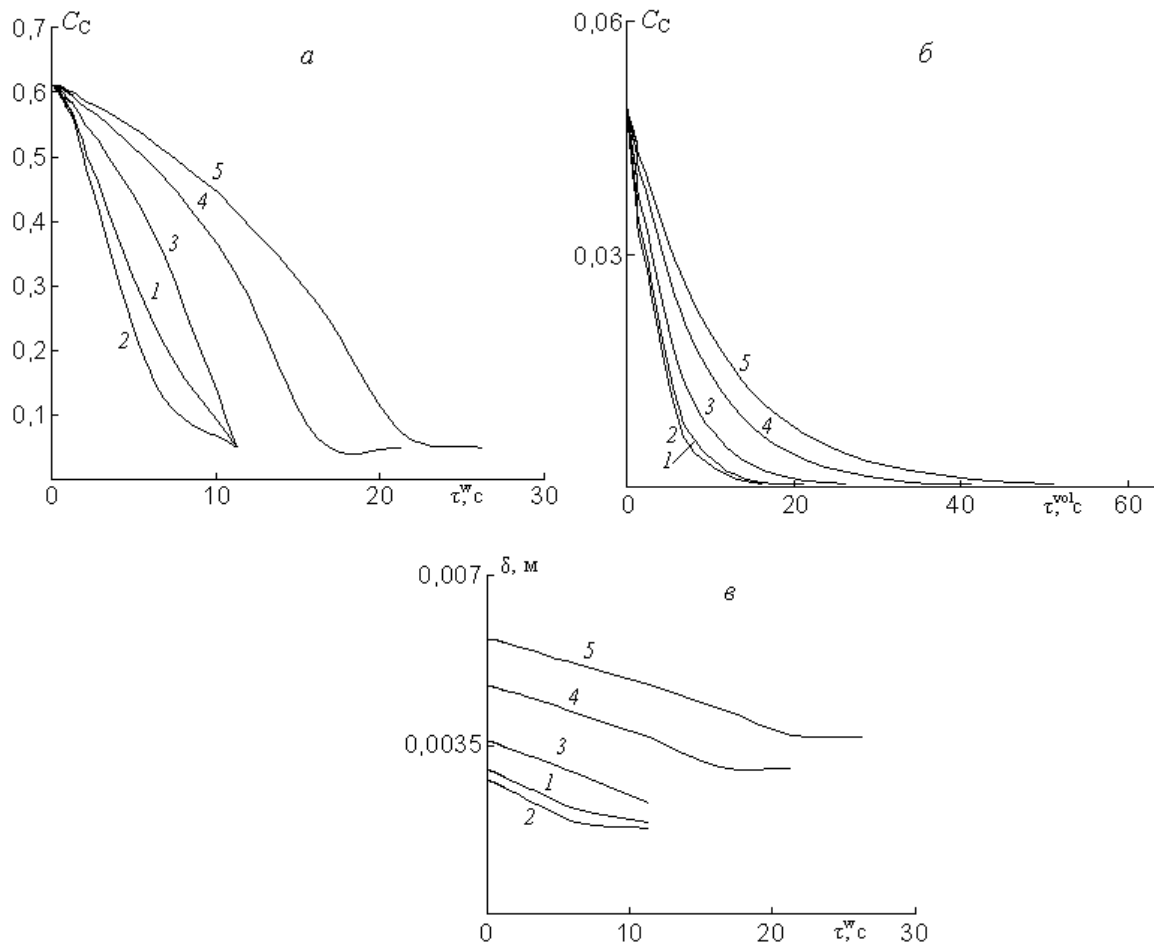


Рис. 1. Зависимость диаметра (δ) и концентрации углерода в частице соломы (*a* – поверхностное реагирование, *б* – объемное реагирование) от времени: 1 – вариант I, 2 – вариант II, 3 – вариант III, 4 – вариант IV, 5 – вариант V.

Fig. 1. Time dependence between the diameter (δ) and the carbon concentration in the straw particle (*a* – surface reaction, *б* – bulk reaction): 1 – variant I, 2 – variant II, 3 – variant III, 4 – variant IV, 5 – variant V.

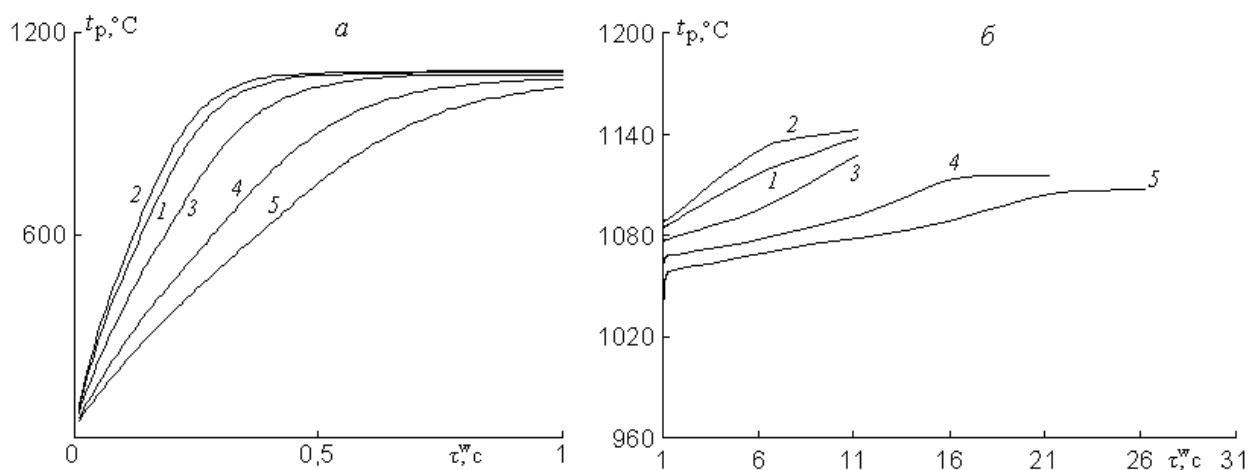


Рис. 2. Зависимость температуры частицы соломы от времени при поверхностном реагировании:

1 – вариант I, 2 – вариант II, 3 – вариант III, 4 – вариант IV, 5 – вариант V.

Fig. 2. Time dependence between a straw particle and a temperature in the surface reaction: 1 – variant I, 2 – variant II, 3 – variant III, 4 – variant IV, 5 – variant V.

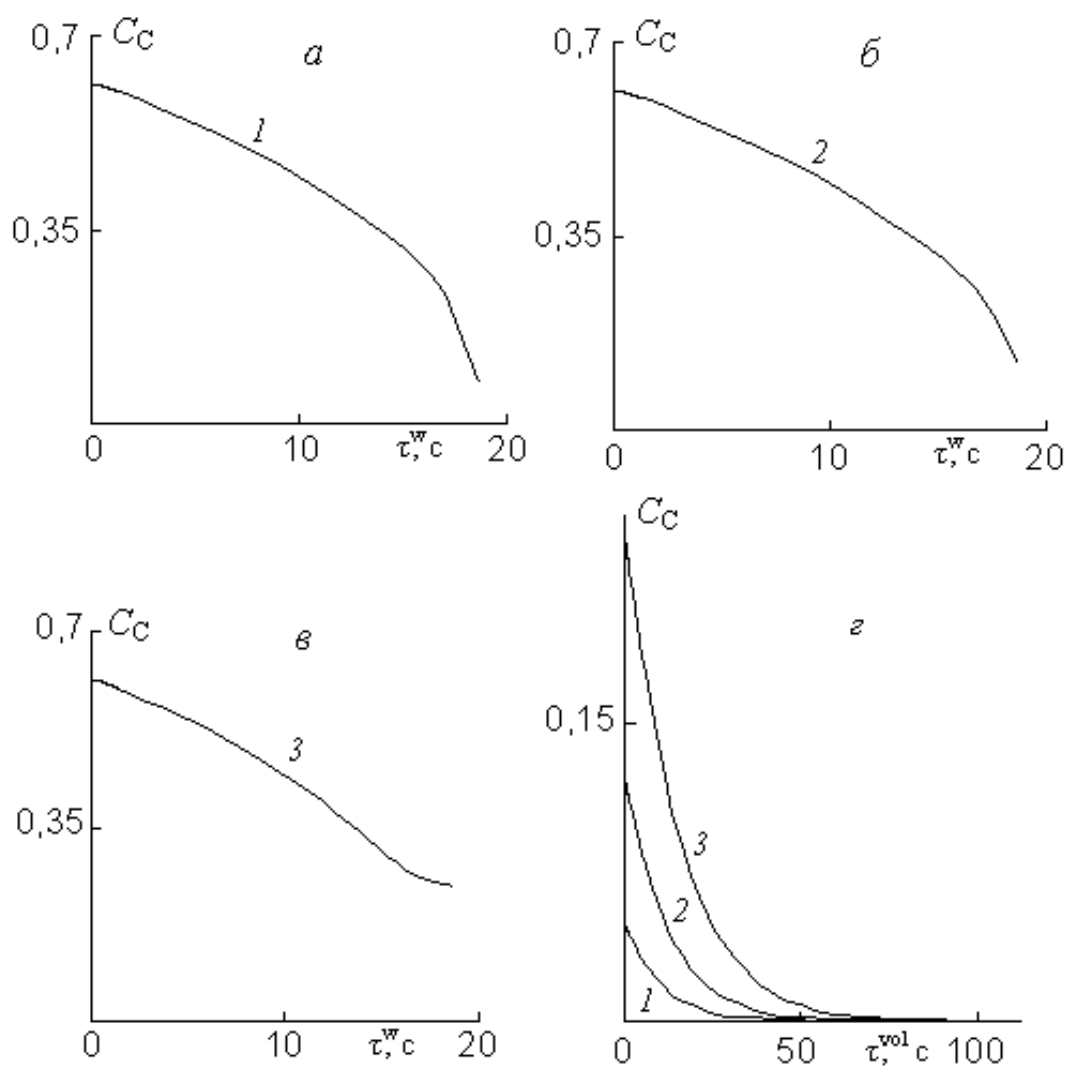


Рис. 3. Зависимость концентрации углерода в частице соломы при поверхностном (а–в) и объемном (г) реагировании от времени: 1 – вариант V, 2 – вариант VI, 3 – вариант VII.

Fig. 3. Time dependence between the carbon concentration in the straw particle at surface (a – в) and bulk (г) reaction: 1 – variant V, 2 – variant VI, 3 – variant VII.

На рисунках 4 и 5 показано влияние концентраций кислорода и углекислого газа в газовой смеси на процессы горения и газификации коксозольной частицы соломы. С уменьшением содержания окислителя реагирование углерода протекает, в основном, по гетерогенной эндотермической реакции $C + CO_2 = 2CO$, у которой энер-

гия активации существенно выше, чем у реакций $C + O_2 = CO_2$ и $2C + O_2 = 2CO$. Это приводит к уменьшению скорости конверсии углерода $(dC_c/d\tau^w)_{VIII} > (dC_c/d\tau^w)_{IX}$ и $(dC_c/d\tau^{vol})_{VIII} > (dC_c/d\tau^{vol})_{IX}$ (рис. 4а, б, ср. кривые 2 и 3) и снижению температуры частицы t_p (рис. 5а, б, ср. кривые 2 и 3).

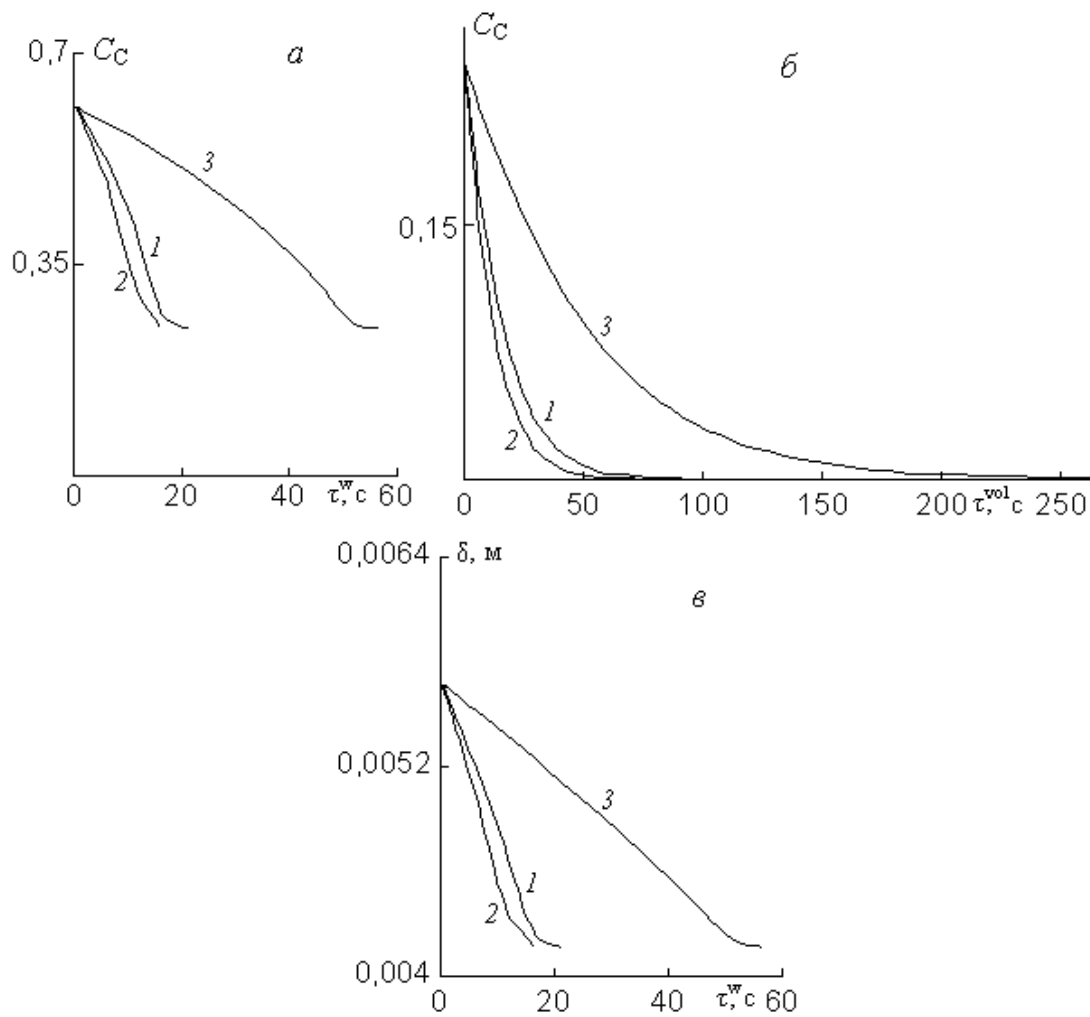


Рис. 4. Зависимость диаметра (δ) и концентрации углерода в частице соломы (*a* – поверхностное реагирование, *б* – объемное реагирование) от времени: 1 – вариант VII, 2 – вариант VIII, 3 – вариант IX.

Fig. 4. Time dependence between the diameter (δ) and the carbon concentration in the straw particle (*a* – surface reaction, *б* – bulk reaction): 1 – variant VII, 2 – variant VIII, 3 – variant IX.

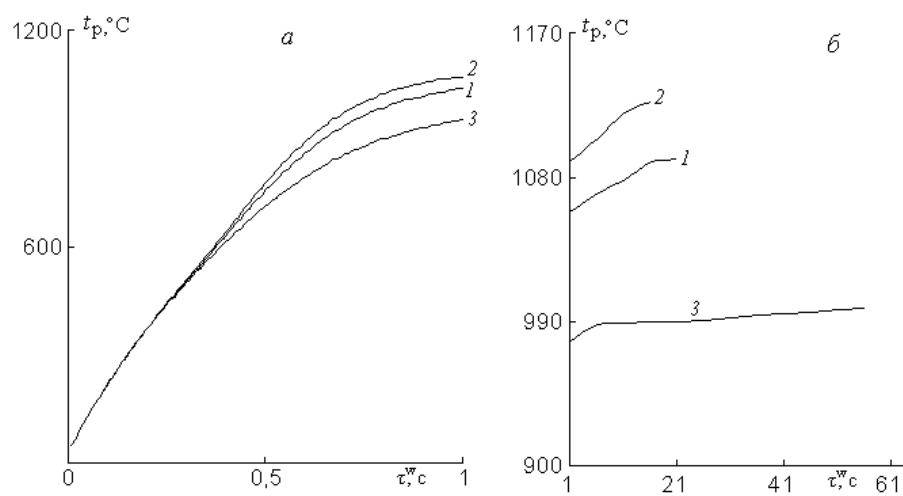


Рис. 5. Зависимость температуры частицы соломы от времени при поверхностном реагировании: 1 – вариант VII, 2 – вариант VIII, 3 – вариант IX.

Fig. 5. Time dependence of a straw particle temperature in the surface reaction: 1 – variant VII, 2 – variant VIII, 3 – variant IX.

Выводы. 1. Построены уравнения скорости конверсии углерода в диапазонах поверхностного и объемного реагирования с учетом кинетики гетерогенных реакций для диффузионной, кинетической и переходной областей реагирования. При выводе уравнений предполагалось, что в зоне с высокой концентрацией углерода ($C_{C,lim} < C_C < C_{C0}$) реагирование происходит на поверхности частицы по модели сжимающегося горючего ядра, вследствие чего диаметр частиц уменьшается. На втором участке ($C_C \leq C_{C,lim}$) реагирование протекает в объеме при неизменном размере частицы. Здесь используется модель прочного золотого каркаса, когда реакция идет во всем объеме частицы. На основе этих уравнений разработана модель горения и газификации коксозольной частицы твердого топлива в неподвижном слое с учетом лучистого и кондуктивно-конвективного теплообмена между слоем и частицей, эндотермических и экзотермических гетерогенных химических реакций.

2. Предложенная модель позволяет получить детальную информацию о геометрических, аэродинамических, тепловых и физико-химических параметрах процессов горения и газификации частицы биомассы в неподвижном слое.

3. Показано, что: а) временные интервалы прогрева и термохимической переработки мелкой коксозольной частицы соломы существенно меньше, чем крупной; б) расширение интервала объемного реагирования способствует росту времени выгорания частицы; г) с уменьшением содержания окислителя в газовой смеси скорость конверсии углерода и температура частицы уменьшаются, вследствие чего время термохимической переработки коксозольной частицы соломы возрастает.

1. Rokhman B.B. Theoretical Investigation of the Process of Steam-Oxygen Gasification of Coke-Ash Particles in a Fluidized Bed Under Pressure // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. - March 2015. - Volume 88, Issue 2. - Pp. 313–328.

2. Шрайбер А.А., Рохман Б.Б., Харченко А.В. К математическому моделированию эволюции состояния горящих частиц в псевдоожиженном слое // *Пром. теплотехника*. 1996. - Т. 18. - №1. - С. 86–91.

3. Рохман Б.Б. Моделирование процесса выгорания коксозольных частиц в кипящем слое // *Инженерно-физический журнал*. - 2012. - Т. 85, №3. - С. 526–534.

4. Баскаков А.П., Лукачевский Б.П., Мухленов И.П. и др. Расчеты аппаратов кипящего слоя. Справочник. - Л.: Химия, 1986. - 351 с.

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

ЧИСЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РІЗНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ПРОЦЕС ТЕРМОХІМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ КОКСОЗЛЬНОЇ ЧАСТИНКИ СОЛОМИ В НЕРУХОМОМУ ШАРІ

Б.Б. Рохман¹, доктор технічних наук, С.В. Ключ², кандидат технічних наук

¹Інститут вугільних енерготехнологій НАН України
04070 м. Київ, вул. Андріївська, 19

²Інститут відновлюваної енергетики НАН України
02094 м. Київ, вул. Гната Хоткевича 20А

Побудовано модель процесу горіння і газифікації коксозольної частинки твердого палива в нерухомому шарі з урахуванням радіаційного та кондуктивно-конвективного теплообміну і гетерогенних хімічних реакцій. На базі розробленої моделі проведено широкі числові дослідження впливу діаметра частинки біомаси, змісту окислювача в газовій фазі і співвідношення інтервалів поверхневого і об'ємного реагування на процес термохімічної переробки коксозольної частинки соломи в нерухомому шарі. Бібл. 5, рис. 5.

Ключові слова: нерухомий шар, солома, горіння, реакція, теплообмін, концентрація, вуглець, кисень.

REFERENCES

1. Rokhman B.B. (2015). Theoretical Investigation of the Process of Steam-Oxygen Gasification of Coke-Ash Particles in a Fluidized Bed Under Pressure *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. - Volume 88, Issue 2. - Pp. 313–328 (in Eng)

2. Shrayber A.A., Rokhman B.B., Kharchenko A.V. (1996). K matematicheskomu modelirovaniyu evolyutsii sostoyaniya goryashchikh chastits v psevdoozhizhennom sloye [To mathematical modeling of the evolution of the state of burning particles in a fluidized bed] *Prom. Teplotekhnika*. - Volume 18, №1, - Pp. 86–91 (in Rus)

3. Rokhman B.B. (2012). Modelirovaniye protsessa vygoraniya koksozol'nykh chastits v kipyashchem sloye [Simulation of the process of burning out of coke-ash particles in the fluidized bed] *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* - Volume 85, №3, - Pp. 526–534 (in Rus)

4. Baskakov A.P., Lukachevskiy B.P., Mukhlenov I.P. (1986). *Raschety apparatov kipyashchego sloya. Spravochnik*. [Calculations of fluidized bed apparatus. Reference book.] - Leningrad, USSR: Khimiya, - 351 p. (in Rus)

5. Pomerantsev V. V., Aref'yev K. I., Akhmedov D. B. (1986). *Osnovy prakticheskoy teorii goreniya* [Fundamentals of the practical theory of combustion]. – Leningrad, USSR: Energoatomizdat, – 312 p. (in Rus)

SYNOPSIS

Equations describing the rate of carbon conversion in the range of surface and bulk reactions are obtained taking into account the kinetics of heterogeneous reactions for the diffusion, kinetic and transition regions of the reaction. Deriving the equations, it was assumed that in the zone with a high carbon concentration ($C_{c,lim} < C_c < C_{c0}$) reaction proceeds on the surface of the particle according to the model of a compressible combustible core, so that diameter of the particles decreases. In the second zone ($C_c \leq C_{c,lim}$) reaction proceeds in the volume with the same particle size. Here we use the model of a strong ash frame

when the reaction proceeds throughout the volume of the particle. On the basis of the constructed equations, a model for thermochemical processing of the solid fuel coke-ash particle in a fixed bed is developed, taking into account the radiative and conductive-convective heat transfer between the bed and the particle and the heat release of chemical heterogeneous reactions. Numerical studies have been carried out in the intervals of surface and volumetric reacting in order to obtain detailed information on the geometric, aerodynamic, thermal, and physicochemical parameters of the combustion and gasification of a particle of straw in a fixed bed. It is shown that: a) with a decrease in the size of the coke-ash biomass particle, the time intervals for warming up and burning out are narrowed; b) expansion of the range of the volumetric reacting promotes an increase in the burnout time of the particle; d) As the concentration of oxygen in the gas mixture decreases, the rate of conversion of carbon and the temperature of the particle decrease, so that the time for the thermochemical treatment of the coke-ash straw particle increases.

Стаття надійшла до редакції 19.06.18
Остаточна версія 29.08.18