

УДК 532.529: 517.4

DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1\(60\).86-95](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).86-95)

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ВОЗДУШНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

**Б.Б. Рохман**, докт. техн. наук, **М.М. Нехамин**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

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

*На основе системы уравнений, описывающей процесс конверсии угля в парокислородной смеси, построена нестационарная модель воздушной газификации твердого топлива в фиксированном слое с учетом межфазного конвективного теплообмена, радиационно-кондуктивного теплопереноса твердой фазы, лучистого и кондуктивного теплообмена слоя со стенкой реактора, гетерогенных химических реакций, сил тяжести и аэродинамического сопротивления. Предложенная модель позволяет получить детальную информацию о геометрических, аэродинамических, тепловых и физико-химических параметрах воздушной газификации твердого топлива в неподвижном слое при различных давлениях в любой момент времени. Эта информация может быть использована при конструировании реакторов на стадиях эскизного, технического и рабочего проектирования, пуско-наладочных режимах и работе газогенератора на скользящих нагрузках, когда процесс воздушной газификации угля является нестационарным. Показано, что: а) основной процесс газификации коксозольных частиц протекает на малом участке фиксированного слоя 91 мм, что приводит к понижению температуры твердой фазы на 160 °С и концентрация  $CO_2 \rightarrow 0$ , вследствие чего оставшаяся часть интервала газификации ~ 185 мм является малоэффективной; б) участок окислительной зоны, где температура коксозольных частиц достигает максимального значения, очень узок и составляет ~ 34–41 мм; в) во временном интервале 1951–4052 с, где происходит интенсивное перемещение границ зон окисления и газификации по высоте слоя, состав синтетического газа (по объему) на выходе из реактора остается практически постоянным:  $CO = 34,32\%$  и  $N_2 = 65,66\%$ . Библ. 8, рис. 6.*

**Ключевые слова:** неподвижный слой, уголь, теплопроводность, воздушная газификация, кондуктивный, радиационный, температура.

## THEORETICAL STUDY OF NONSTATIONARY AIR GASIFICATION OF SOLID FUEL IN A FIXED BED AT ATMOSPHERIC PRESSURE

**B.B. Rokhman**, doctor of technical sciences, **M.M. Nekhamin**, candidate of technical sciences, senior researcher

Institute of Coal Energy Technology NAS Ukraine,  
04070, 19 Andreevskaya st., Kyiv, Ukraine.

*Based on the system of equations describing the process of coal conversion in the steam-oxygen mixture, a non-stationary model of air gasification of solid fuel in a fixed bed was constructed with allowance of interphase convective heat exchange, radiation-conductive heat transfer of the solid phase, radiant and conductive heat exchange of the bed with the reactor wall, heterogeneous chemical reactions, gravity and aerodynamic force. The proposed model provides detailed information on the geometric, aerodynamic, thermal, and physicochemical parameters of air gasification of solid fuel in a fixed bed at different pressures at any time. This data can be used in the draft, technical and detailed reactors designing, commissioning and operation of the gas generator on sliding loads, when the process of air coal gasification is non-stationary. It has been shown that: a) the main gasification process of coke-ash particles occurs in a small area of a fixed bed of 91 mm, which leads to a decrease in the temperature of the solid phase by 160 °C and a concentration of  $CO_2 \rightarrow 0$ , as a result of which the remaining part of the gasification interval of ~ 185 mm is ineffective; b) the section of the oxidation zone, where the temperature of the coke-ash particles reaches its maximum value, is very narrow ~ 34–41 mm; c) in the time interval of 1951–4052 s, where intensive displacement of the boundaries of the oxidation and gasification zones along the bed height occurs, the composition of the synthetic gas (by volume) at the reactor exit remains almost constant:  $CO = 34,32\%$  and  $N_2 = 65,66\%$ . Ref. 8, fig. 6.*

**Keywords:** fixed bed, coal, thermal conductivity, air gasification, conductive, radiation, temperature.



Б.Б. Рохман  
B. Rohman

**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 аэро-динамики, тепломассообмена и химического реагирования поли-дисперсного ансамбля твердого топлива в камерных и слоевых топках, в реакторах с циркулирующим кипящим слоем и в кипящем слое.

**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:** тел.: +38-044-425-53-77

**e-mail:** [Brolene@yahoo.com](mailto:Brolene@yahoo.com)

**Author information:** the leading researcher of the Institute of Coal Energy Technologies of the NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences. Biographical information of Rohman 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.

**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:** tel.: +38-044-425-53-77

**e-mail:** [Brolene@yahoo.com](mailto:Brolene@yahoo.com)



М.М. Нехамин  
M. Nekhamin

**Сведения об авторе:** старший научный сотрудник Института угольных энерготехнологий НАН Украины, кандидат технических наук.

**Образование:** 28 мая 1965 г. окончил Харьковский авиационный институт, а 01.11.1970 – аспирантуру Института электродинамики НАН Украины. Работал в институтах Академии Наук Украины в должностях младшего научного сотрудника, старшего инженера, руководителя группы, старшего научного сотрудника. 21 апреля 1982 г. защитил диссертацию кандидата технических наук.

**Научная сфера:** численное моделирование процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках.

**Публикации:** более 70 научных работ.

**ORCID:** 0000-0003-3679-321X

**Контакты:** тел.: +38-044-295-40-57

**e-mail:** [nmark@i.ua](mailto:nmark@i.ua)

**Author information:** senior staff scientist of Institute of Coal Energy Technologies of NAS of Ukraine, candidate of technical sciences.

**Education:** Finished the Kharkov aviation institute on May, 28 1965 and post-graduate course of Institute of electrodynamics of NAS of Ukraine on 01.11.1970. Worked in the institutes of Academy of Sciences of Ukraine in positions of junior scientist, senior engineer, leader of group, senior staff scientist. Protected dissertation of candidate of engineering sciences on April, 21 1982.

**Research area:** numeral modeling of processes of aerodynamics, heat and mass transfer in power plants.

**Publications:** more than 70 scientific papers.

**ORCID:** 0000-0003-3679-321X

**Contacts:** tel.: +38-044-295-40-57

**e-mail:** [nmark@i.ua](mailto:nmark@i.ua)

**Перечень используемых обозначений и сокращений:**

- a* – степень черноты частицы;
- B* – расход, кг/ч;
- C* – концентрации газовых компонентов, кмоль/м<sup>3</sup>;
- c* – теплоемкость, кДж/(кг·К);
- D* – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;
- H* – высота (м) или массовая доля водорода;
- h* – коэффициент конвективного теплообмена, кДж/(с·м<sup>2</sup>·К);
- g* – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;
- k* – константа скорости реакции, м/с;
- L* – универсальная газовая постоянная кДж/(кмоль·К);
- Nu* – критерий Нуссельта;
- P* – давление, Н/м<sup>2</sup>;
- Q* – тепловой эффект реакции (кДж/кмоль) или тепловой поток (кДж/(с·м<sup>3</sup>));
- R* – объемная доля компонента газовой смеси;

- r* – скорость гомогенной реакции, кмоль/(м<sup>3</sup>·с);
- t* – температура, °С;
- T* – температура, К;
- u* – скорость, м/с;
- z* – аксиальная координата, м;
- α* – коэффициент массообмена, (м/с) или лучистого теплообмена, (кДж/(с·м<sup>2</sup>·К));
- δ* – диаметр частицы, м;
- ε* – порозность слоя;
- λ* – коэффициент теплопроводности, кДж/(с·м·К);
- η* – кинематическая вязкость газа, м<sup>2</sup>/с;
- μ* – молекулярная масса, кг/кмоль;
- ρ* – плотность, кг/м<sup>3</sup>;
- τ* – время, с;
- Φ* – параметр модели теплопроводности зернистого слоя.

**Индексы нижние:**

ash	– зола;
air	– воздух;
bed	– слой;
C	– углерод;
CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O,	– окись и двуокись углерода, водяной
N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	пар, азот, кислород;
C + O <sub>2</sub> , C +	– гетерогенные реакции;
0,5O <sub>2</sub> , C + CO <sub>2</sub>	
CO + O <sub>2</sub>	– гомогенная реакция;
conv	– конвективный теплообмен;

**Индексы верхние:**

cond	– кондуктивный теплообмен;
w	– поверхность;

CO <sub>2</sub> →см,	– диффузия углекислого газа, кислорода,
O <sub>2</sub> →см,	окси углерода в газовую смесь;
CO→см	
D	– диффузия;
g	– газ;
max	– максимальное значение;
p	– частица;
p→w	– передача тепла от частиц к стенке;
эф	– эффективный;
0	– начальные условия.
rad	– лучистый теплообмен.

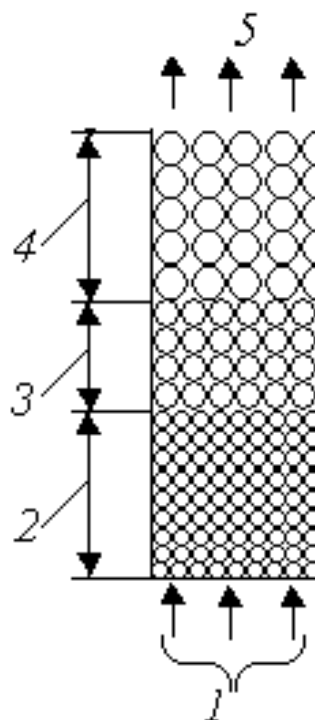
**Введение.** В работах [1, 2] построена двумерная модель и проведены численные исследования нестационарного процесса парокислородной газификации дробленных частиц шубаркольского каменного длиннопламенного угля под давлением 3 Мпа в неподвижном слое при различных соотношениях массовых долей компонентов парокислородной смеси: H<sub>2</sub>O/O<sub>2</sub> = 45/55, H<sub>2</sub>O/O<sub>2</sub> = 40/60 и H<sub>2</sub>O/O<sub>2</sub> = 72/28.

В настоящей работе рассматривается случай воздушной газификации частиц каменного угля в неподвижном слое при атмосферном давлении. Предполагается, что все летучие вещества выделяются в пиролизере, расположенном вне слоя, а в слое происходит термохимическая переработка коксозольного остатка. Для описания слоевого процесса была разработана нестационарная модель, базирующаяся на теоретических представлениях, изложенных в [1].

В отличие от стационарного процесса, где распределение параметров по высоте слоя не зависит от времени, здесь рассматривается случай невозобновляемой загрузки коксозольных частиц, вследствие чего процесс газификации становится неустановившимся и характеризуется изменяющимися во времени полями температур и концентраций двухфазной среды в слое.

В соответствии с изменениями, претерпеваемыми топливом в процессе термохимической переработки, неподвижный слой коксозольных частиц можно условно разделить на три зоны (рис. 1). Первая из них (поз. 2), примыкающая к колосниковой решетке, формируется из частиц золы и шлака, образующихся в результате горения и газификации твердого топлива, и предназначена для защиты колосников от перегрева. Над шлаковой подушкой располагается окислительная зона (поз. 3), где практически весь кислород на очень небольшом участке слоя расходуется на конверсию углерода согласно реакциям,

C+O<sub>2</sub>=CO<sub>2</sub> и C+0,5O<sub>2</sub>=CO. Этот диапазон характеризуется максимальным уровнем температур из-за высоких значений тепловыделения гетерогенных реакций. В восстановительной зоне поз. 4 углекислый газ взаимодействует с углеродом по эндотермической реакции C+CO<sub>2</sub>=2CO, что приводит к уменьшению температуры коксозольных частиц. По этой причине, с учетом высоких значений энергии активации скорость реакции C+CO<sub>2</sub>=2CO уменьшается, благодаря чему протяженность указанной области возрастает и становится значительно большей по сравнению с окислительной зоной.



**Рис. 1. Схема воздушной газификации твердого топлива в неподвижном слое:** 1 – горячий воздух; 2 – шлаковая подушка; 3 – зона окисления; 4 – зона газификации; 5 – выход синтетического газа.

**Fig. 1. Scheme of air gasification of solid fuel in a fixed bed:** 1 – hot air; 2 – slag pad; 3 – oxidation zone; 4 – gasification zone; 5 – syngas outlet.

**Постановка задачи.** Предлагаемая модель основана на следующих допущениях: 1) процесс нестационарный; 2) газовая смесь в реакторе состоит из кислорода, диоксида и оксида углерода, азота; 3) дисперсная фаза включает монодисперсные частицы сферической формы; 4) выход летучих происходит вне слоя; 5) гетерогенные реакции горения и газификации протекают на поверхности коксозольных частиц, что приводит к уменьшению их размера; 6) усадка неподвижного слоя за счет термохимической переработки твердого топлива не учитывается; 7) газ движется в режиме идеального вытеснения; 8) стехиометрическая схема реакций включает в себя три гетерогенные реакции:  $C+O_2=CO_2$ ,  $C+0,5O_2=CO$  и  $C+CO_2=2CO$ ; 9) гомогенная реакция  $CO+0,5O_2=CO_2$  не учитывается, так как ее скорость

$r_{CO+O_2} = 2,239 \cdot 10^{12} C_{CO} C_{H_2O}^{0,5} C_{O_2}^{0,25} \cdot \exp[-167,4 \cdot 10^3 / (L_g T_g)]$  равна нулю [3-6] из-за отсутствия в газе водяного пара температура жидкоплавкого состояния золы каменного угля  $t_3 = 1500-1570$  °C (экибастузкий разрез).

Слой прогревается высокотемпературной смесью дымовых газов и воздуха до температуры воспламенения частиц, расположенных в узкой области, примыкающей к решетке. Далее происходит отключение теплоносителя и подача вместо него горячего дутья с температурой  $t_{air} = 350$  °C. За начало отсчета  $\tau = 0$  выбрано время воспламенения твердой фазы.

**Основные уравнения.** Система уравнений, описывающая процесс воздушной газификации коксозольных частиц в плотном слое может быть представлена в следующем виде.

Уравнение неразрывности для кислорода

$$\frac{\partial C_{O_2}}{\partial \tau} + \frac{\partial(u_g C_{O_2})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{O_2 \rightarrow см} \frac{\partial C_{O_2}}{\partial z} \right] - \frac{6(k_{C+O_2} + k_{C+0,5O_2}) C_{O_2}^w (1-\varepsilon)}{\delta}. \quad (1)$$

Уравнение неразрывности для диоксида углерода

$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial \tau} + \frac{\partial(u_g C_{CO_2})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{CO_2 \rightarrow см} \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial z} \right] + \frac{6(k_{C+O_2} C_{O_2}^w - k_{C+CO_2} C_{CO_2}^w)(1-\varepsilon)}{\delta}. \quad (2)$$

Уравнение неразрывности для окиси углерода

$$\frac{\partial C_{CO}}{\partial \tau} + \frac{\partial(u_g C_{CO})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{CO \rightarrow см} \frac{\partial C_{CO}}{\partial z} \right] + \frac{12(k_{C+0,5O_2} C_{O_2}^w + k_{C+CO_2} C_{CO_2}^w)(1-\varepsilon)}{\delta}. \quad (3)$$

Уравнение изменения диаметра коксозольных частиц

$$\frac{d\delta}{d\tau} = - \left[ (k_{C+O_2} + 2k_{C+0,5O_2}) C_{O_2}^w + k_{C+CO_2} C_{CO_2}^w \right] \frac{2\mu_c}{\rho_p}. \quad (4)$$

Уравнение сохранения количества движения газовой фазы

$$\frac{\partial(\rho_g u_g)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho_g u_g^2)}{\partial z} = - \frac{\partial P_g}{\partial z} - g \rho_g + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \rho_g \eta_g \frac{\partial u_g}{\partial z} \right] - \frac{150 \eta_g \rho_g (1-\varepsilon)^2 u_g}{\delta^2 \varepsilon^3} - \frac{1,75 \rho_g (1-\varepsilon) u_g^2}{\delta \varepsilon^3}. \quad (5)$$

Уравнение теплового баланса коксозольных частиц

$$\rho_p (1 - \varepsilon) \frac{\partial c_p t_p}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_{\text{эф}} \frac{\partial t_p}{\partial z} \right] + \left[ (k_{C+O_2} Q_{C+O_2} + k_{C+0,5O_2} Q_{C+0,5O_2}) C_{O_2}^w - k_{C+CO_2} C_{CO_2}^w Q_{C+CO_2} - h_{\text{conv}} (t_p - t_g) \right] \frac{6(1 - \varepsilon)}{\delta} - Q_{p \rightarrow w}^{\text{rad}} - Q_{p \rightarrow w}^{\text{cond}}. \quad (6)$$

Уравнение сохранения энергии несущей среды

$$\frac{\partial \rho_g c_g t_g}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho_g u_g c_g t_g)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_{g,\text{эф}} \frac{\partial t_g}{\partial z} \right] + h_{\text{conv}} (t_p - t_g) \frac{6(1 - \varepsilon)}{\delta}, \quad (7)$$

где эффективный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{эф}}$  находится по формуле [7]

$$\frac{\lambda_{\text{эф}}}{\lambda_g} = \varepsilon \left( 1 + \frac{\alpha_{\text{rad},g} \delta}{\lambda_g} \right) + \frac{1 - \varepsilon}{\frac{1}{1/\Phi + \frac{\alpha_{\text{rad},p} \delta}{\lambda_g}} + \frac{2\lambda_g}{3\lambda_p}}, \quad (8)$$

коэффициент теплоотдачи излучением от частицы через газ мимо соседних зерен определяется согласно выражению [7]

$$\alpha_{\text{rad},g} = 0,227 \cdot 10^{-9} \left[ \frac{1}{1 + \varepsilon(1 - a_p)/(2a_p(1 - \varepsilon))} \right] (t_p + 273)^3, \quad (9)$$

коэффициент теплоотдачи излучением между соседними частицами [7] –

$$\alpha_{\text{rad},p} = 0,227 \cdot 10^{-9} \frac{a_p (t_p + 273)^3}{2 - a_p}, \quad (10)$$

Концентрации газовых компонентов на поверхности частицы и коэффициенты массообмена находятся как [8]

$$C_{O_2}^w = \frac{\alpha_{D,O_2} C_{O_2}}{\alpha_{D,O_2} + k_{C+O_2} + k_{C+0,5O_2}}, \quad C_{CO_2}^w = \frac{\alpha_{D,CO_2} C_{CO_2} + k_{C+O_2} C_{O_2}^w}{\alpha_{D,CO_2} + k_{C+CO_2}},$$

$$C_{CO}^w = \frac{\alpha_{D,CO} C_{CO} + 2(k_{C+0,5O_2} C_{O_2}^w + k_{C+CO_2} C_{CO_2}^w)}{\alpha_{D,CO}}, \quad \alpha_{D,O_2} = \frac{D_{O_2 \rightarrow \text{см}} \text{Nu}}{\delta}, \quad (11)$$

$$\alpha_{D,CO_2} = \frac{D_{CO_2 \rightarrow \text{см}} \text{Nu}}{\delta}, \quad \alpha_{D,CO} = \frac{D_{CO \rightarrow \text{см}} \text{Nu}}{\delta}.$$

Граничные условия на входе в слой ( $z = 0$ ) для уравнений (1)–(3) и (5)–(7) находятся из выражений:

$$\frac{\partial t_p}{\partial z} = C_{CO_2} = C_{CO} = 0, \quad C_{O_2} = C_{O_2,0}, \quad u_g = u_{g0}, \quad t_g = t_{g0}, \quad (12)$$

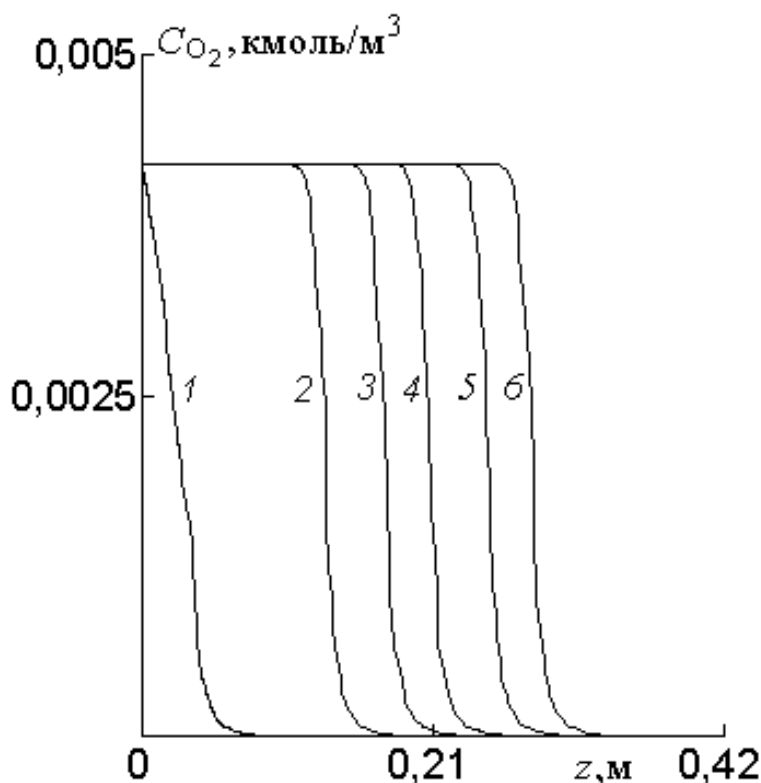
на выходе из слоя ( $z = H_{\text{bed}}$ ) –

$$\frac{\partial t_g}{\partial z} = \frac{\partial C_{O_2}}{\partial z} = \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial z} = \frac{\partial C_{CO}}{\partial z} = \frac{\partial u_g}{\partial z} = 0, t_p = t_{p0} = 700 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (13)$$

**Результаты численных расчетов.** Обсудим результаты расчета процесса воздушной газификации при атмосферном давлении дробленых коксозольных частиц каменного угля с зольностью 30 % диаметром  $\delta_0 = 9$  мм и плотностью  $\rho_p = 1350$  кг/м<sup>3</sup> ( $B_{N_2,0} = 145$  кг/ч,  $B_{O_2,0} = 43,3$  кг/ч и  $t_{\text{air}} = 350$  °С) в реакторе с неподвижным слоем порозностью  $\varepsilon = 0,4$ , высотой 0,415 м и сечением слоя 0,1256 м<sup>2</sup>.

В кислородной зоне  $0,105 \text{ м} < z < 0,139 \text{ м}$  ( $\tau = 1951$  с) наблюдается интенсивная конверсия коксозольных частиц в воздухе за счет окисли-

тельных и восстановительных гетерогенных реакций. Здесь тепловыделение экзотермических реакций  $C+O_2 = CO_2$  и  $C+0,5O_2 = CO$  превалирует над теплопоглощением эндотермической реакции  $C+CO_2 = 2CO$ , вследствие чего температура частиц  $t_p$  возрастает с 350 °С до максимального значения 1509,5 °С, концентрация  $C_{O_2}$  падает с 0,00419 кмоль/м<sup>3</sup> до 0,000676 кмоль/м<sup>3</sup>, содержание компонентов  $CO_2$  и  $CO$  повышается и достигает следующих значений:  $C_{CO_2,\text{max}} = 0,000225$  кмоль/м<sup>3</sup> и  $C_{CO} = 0,00163$  кмоль/м<sup>3</sup> (рис. 2–4, кривые 2).



**Рис. 2.** Распределение концентрации кислорода по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени: 1 – 600 с; 2 – 1951 с; 3 – 2551 с; 4 – 3002 с; 5 – 3602 с; 6 – 4052 с.

**Fig. 2.** Oxygen concentration distribution over the height of the fixed bed depending on time: 1 – 600 s; 2 – 1951 s; 3 – 2551 s; 4 – 3002 s; 5 – 3602 s; 6 – 4052 s.

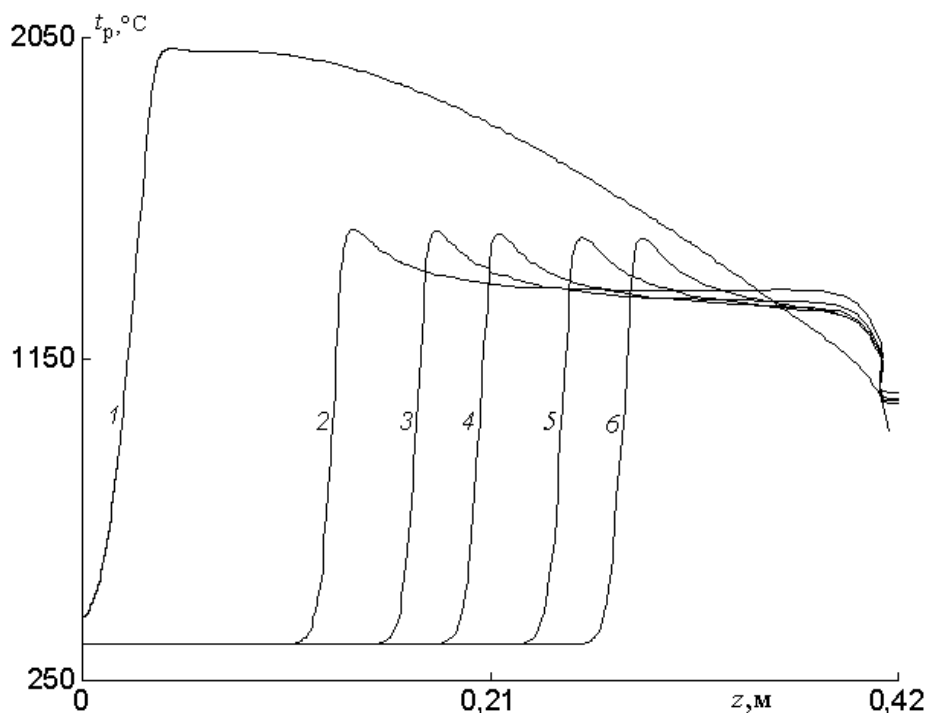


Рис. 3. Распределение температуры частиц по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени (обозначения те же, что на рис. 2).

Fig. 3. Particle temperature distribution over the height of the fixed bed as a function of time (notations are the same as in Fig. 2).

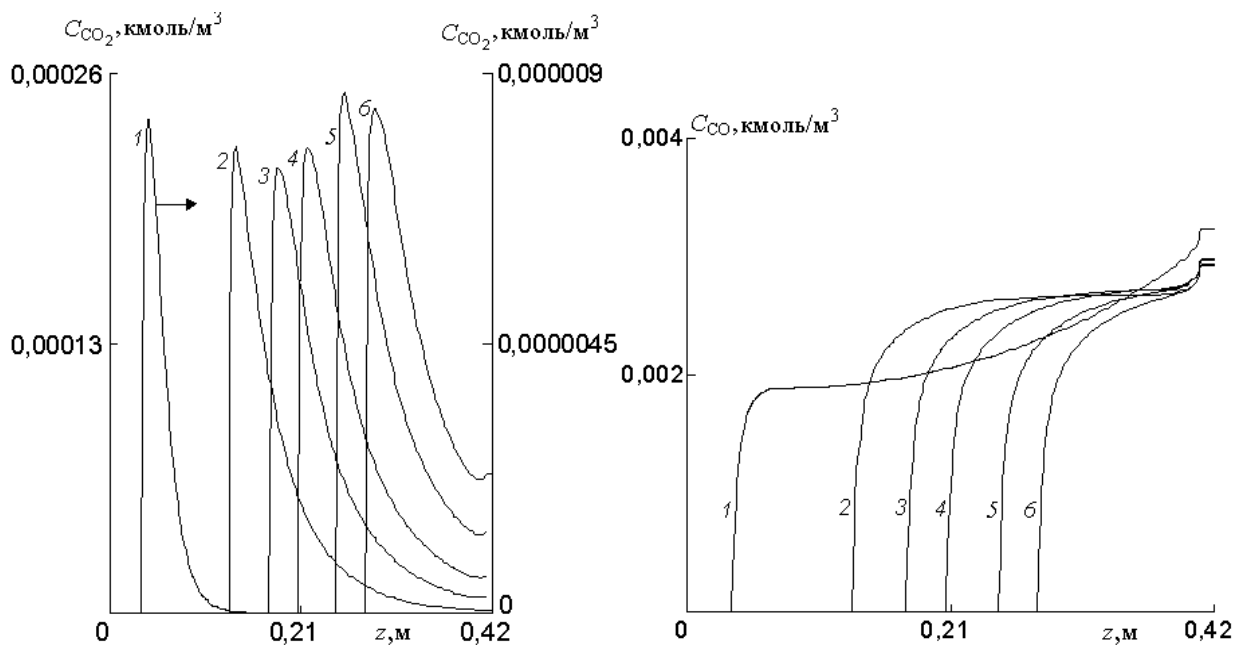


Рис. 4. Распределение концентраций компонентов газа CO<sub>2</sub> и CO по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени (обозначения те же, что на рис. 2).

Fig. 4. CO<sub>2</sub> and CO concentrations distribution over the height of the fixed bed depending on time (notations are the same as in Fig. 2).

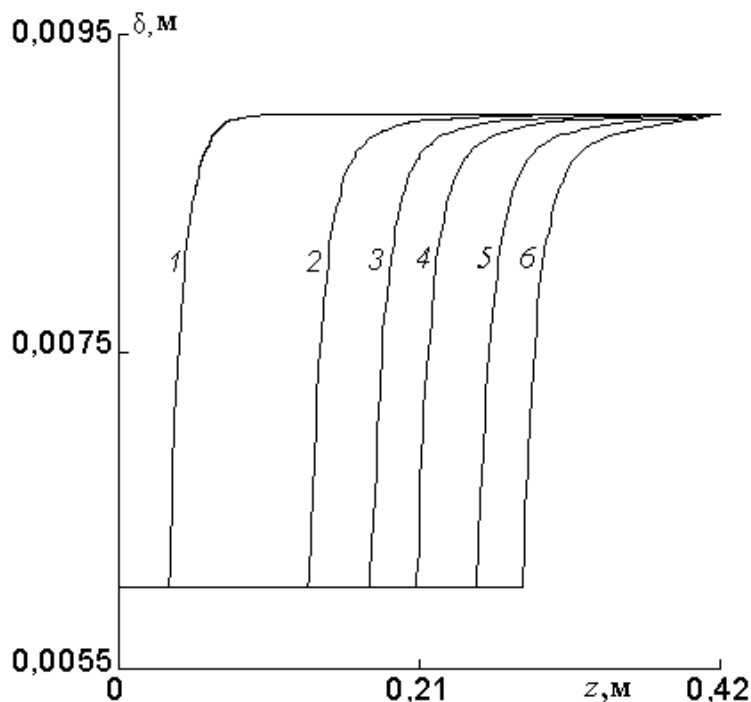


Рис. 5. Распределение диаметра частиц по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени (обозначения те же, что на рис. 2).

Fig. 5. Particle diameter distribution over the height of the fixed bed depending on time (notations are the same as in Fig. 2).

В этом интервале происходит резкое убывание функции  $\delta(\tau, z)$  из-за конверсии коксозольных частиц за счет гетерогенных реакций, благодаря чему диаметр дискретной фазы уменьшается с  $\delta = 7,34$  мм до минимального размера частиц  $\delta_{ash} = 6,02$  мм, состоящих из золы (рис. 5, кривая 2). Полученный таким образом инертный материал формирует шлаковую подушку поз. 2 (рис. 1), которая защищает колосники от перегрева.

В окислительно-восстановительной области реагирования  $0,139 \text{ м} < z < 0,156 \text{ м}$ , где происходит интенсивный отвод тепла от дробленки за счет конвективного межфазного теплообмена и концентрация  $C_{O_2}$  стремительно убывает до минимального значения, теплопоглощение эндотермической реакции превосходит тепловыделение экзотермических реакций, в результате значения  $t_p$  и  $C_{CO_2}$  снижаются до  $1445 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $0,000169 \text{ кмоль/м}^3$ , величина  $C_{CO}$  возрастает до  $0,002174 \text{ кмоль/м}^3$ , а диаметр частиц уменьшается с  $8,54$  мм до  $7,34$  мм.

Бескислородную восстановительную зону  $0,156 \text{ м} < z < 0,415 \text{ м}$  можно условно разделить на три характерных диапазона. В первом из них  $0,156 \text{ м} < z < 0,23 \text{ м}$  величина  $C_{CO_2}$  убывает до

минимального значения из-за протекания гетерогенной эндотермической реакции, благодаря чему концентрация  $C_{CO}$  повышается до  $0,0026 \text{ кмоль/м}^3$ , температура  $t_p$  снижается до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , а диаметр частиц  $\delta$  уменьшается с  $9$  мм до  $8,54$  мм. На втором участке  $0,23 \text{ м} < z < 0,39 \text{ м}$ , где скорость реакции  $C+CO_2=2CO$  близка к нулю, параметры рабочего процесса практически не изменяются. В третьем диапазоне  $0,39 < z < 0,415 \text{ м}$  величина  $t_p$  уменьшается из-за влияния граничного условия (см. (13)), что приводит к возрастанию зависимости  $C_{CO}(\tau, z)$ .

Конвективный теплообмен между твердой и газовой фазами обеспечивает резкое возрастание функции  $t_g(\tau, z)$  с  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  до максимального значения  $1407,3 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 6, кривая 2).

С течением времени высота шлаковой подушки повышается ( $\Delta z_{ash}(\tau = 600 \text{ с}) = 35,3 \text{ мм}$ ,  $\Delta z_{ash}(\tau = 4052 \text{ с}) = 283 \text{ мм}$ ), вследствие чего зоны окисления и газификации смещаются вверх по вертикальной оси  $z$  (рис. 2–6, ср. кривые 1 и б). При этом в интервале  $1951 \text{ с} < \tau < 4052 \text{ с}$  состав генераторного газа на выходе из реактора изменяется незначительно:  $R_{CO} = 34,32 \text{ } \%$ ,  $R_{N_2} = 65,66 \text{ } \%$  (рис. 4, ср. кривые 2 и б).



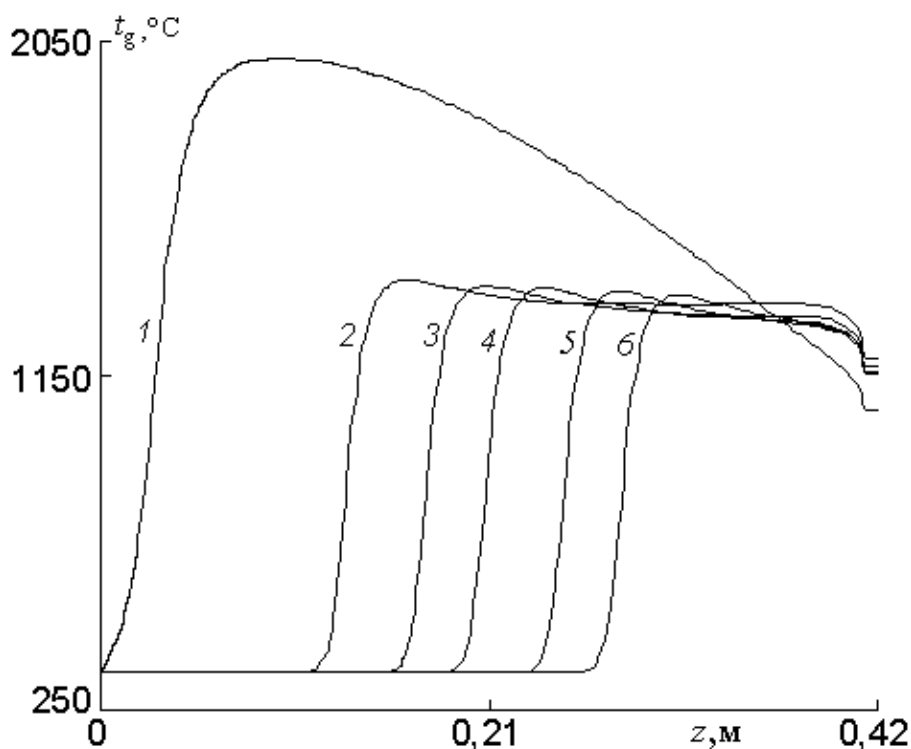


Рис. 6. Распределение температуры газа по высоте неподвижного слоя в зависимости от времени (обозначения те же, что на рис. 2).

Fig. 6. Gas temperature distribution over the height of the fixed bed as a function of time (notations are the same as in Fig. 2).

**Выводы.** 1. Предложенная модель позволяет получить детальную информацию о геометрических, аэродинамических, тепловых и физико-химических параметрах воздушной газификации твердого топлива в неподвижном слое при различных давлениях в любой момент времени. Эта информация может быть использована при конструировании реакторов на стадиях эскизного, технического и рабочего проектирования, пусконаладочных режимах и работе газогенератора на скользящих нагрузках, когда процесс воздушной газификации угля является нестационарным.

Показано, что:

а) интервал окислительной зоны, где температура коксозольных частиц достигает максимального значения, очень узок и составляет ~ 34–41 мм;

б) основной процесс газификации коксозольных частиц протекает на малом участке фиксированного слоя  $\Delta z_{bed} = 91$  мм, что приводит к понижению температуры твердой фазы на 160 °C и концентрации  $CO_2 \rightarrow 0$ , вследствие чего оставшаяся часть интервала газификации  $\Delta z_{bed} = 185$  мм является малоэффективной;

в) на участке  $1951 \text{ с} < \tau < 4052 \text{ с}$ , где происходит интенсивное перемещение границ зон окисления и газификации по высоте слоя, состав синтетического газа на выходе из реактора остается практически постоянным:  $R_{CO} = 34,32 \%$  и  $R_{N_2} = 65,66 \%$ .

1. *Рохман Б.Б.* Двумерная модель процесса газификации твердого топлива в неподвижном слое под давлением. 1. Исследование конверсии шубаркольского каменного угля в парокислородной смеси при отношении массовых долей  $H_2O/O_2=45/55$ . *Відновлювана енергетика*. 2019. № 1(56). С. 61-71.

2. *Рохман Б.Б.* Двумерная модель процесса газификации твердого топлива в неподвижном слое под давлением. 2. Численные результаты термохимической переработки шубаркольского каменного угля при отношении массовых долей в парокислородной смеси  $H_2O/O_2 = 72/28$ . *Відновлювана енергетика*. 2019. № 2(57). С. 91-98.

3. *Westbrook C.K., Dryer F.L.* Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames. *Combust. Sci. Technol.* 1981. Vol. 27. Pp. 31-43.

4. *Bustanmante F., Enick R.M., Killmeyer R.P., Howard B.H., Rothenberger K.S., Cugini A.V., Morreale B.D., Ciocco M.V.* Uncatalyzed and wall-catalyzed forward water-gas shift reaction kinetics. *AIChE J.* 2005. Vol. 51. Pp. 1440-1454.

5. Ma J., Zitney S.E. CFD modeling of entrained-flow gasifiers with improved physical and chemical submodels. *Energy Fuels* 2012. Vol. 26. Pp. 7195-7219.

6. Gómes-Barea A., Leckner B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2010. Vol. 36. Pp. 449-509.

7. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л. Химия. 1979. 176 с.

8. Rokhman B.B. Modeling and numerical investigation of the process of vapor-oxygen gasification of solid fuels in a vertical flow reactor under pressure. *Journal of Engineering Physics and Thermodynamics*. 2014. Vol. 87. No. 5. Pp. 1103-1115.

## REFERENCES

1. Rokhman B.B. Dvumernaya model processa gazifikatsii tverdogo topliva v nepodvizhnom sloe pod davleniem. 1. Issledovanie konversii shubarkolskogo kamennogo uglya v parokislородной smesi pri otnoshenii massovyh dolej  $H_2O/O_2=45/55$ . [Two-dimensional model of the solid fuel gasification in a fixed bed under presser. 1. Investigation of Shubarkol coal conversion in a steam-oxygen mixture with the mass part of  $H_2O/O_2=45/55$ ]. *Vidnovlyvana energetika*. 2019. No. 1(56). Pp. 61-71. [in Russian].

2. Rokhman B.B. (2019). Dvumernaya model processa gazifikatsii tverdogo topliva v nepodvizhnom sloe pod davleniem. 2. Chislovye rezultaty termohimicheskoy pererabotki shubarkolskogo kamennogo uglya pri sootnoshenii massovyh dolej  $H_2O/O_2=72/28$ . [Two-dimensional model of the solid fuel gasification in a fixed bed under presser. 2. Numerical results of thermal-chemical processing of Shubarkol coal at a ratio of mass fractions  $H_2O/O_2=72/28$ ]. *Vidnovlyvana energetika*. № 2(57). Pp. 91-98. [in Russian].

3. Westbrook C.K., Dryer F.L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames. *Combust. Sci. Technol.* 1981. Vol. 27. Pp. 31-43. [in English].

4. Bustanmante F., Enick R.M., Killmeyer R.P., Howard B.H., Rothenberger K.S., Cugini A.V., Morreale B.D., Ciocco M.V. Uncatalyzed and wall-catalyzed forward water-gas shift reaction kinetics. *AIChE J.* 2005. Vol. 51. Pp. 1440-1454. [in English].

5. Ma J., Zitney S.E. CFD modeling of entrained-flow gasifiers with improved physical and chemical submodels. *Energy Fuels* 2012. Vol. 26. Pp. 7195-7219. [in English].

6. Gomes-Barea A., Leckner B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2010. Vol. 36. Pp. 449-509. [in English].

7. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л. Химия. 1979. 176 с. [in English].

8. Rokhman B.B. Modeling and numerical investigation of the process of vapor-oxygen gasification of solid fuels in a vertical flow reactor under pressure. *Journal of Engineering Physics and Thermodynamics*. 2014. Vol. 87. No. 5. Pp. 1103-1115. [in English].

### ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПРОЦЕСУ ПОВІТРЯНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ТВЕРДОГО ПАЛИВА В НЕРУХОМОМУ ШАРІ ПРИ АТМОСФЕРНОМУ ТИСКУ

**Б.Б. Рохман**, докт. техн. наук, **М.М. Нехамін**, канд. техн. наук, старший науковий співробітник

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

*На основі системи рівнянь, яка описує процес конверсії вугілля в парокисневій суміші побудовано нестационарну модель повітряної газифікації твердого палива у фіксованому шарі з урахуванням міжфазного конвективного теплообміну, радіаційно-кондуктивного теплопереносу твердої фази, променистого і кондуктивного теплообміну шару зі стінкою реактора, гетерогенних хімічних реакцій, сил тяжіння і аеродинамічного опору. Запропонована модель дозволяє отримати детальну інформацію про геометричні, аеродинамічні, теплові і фізико-хімічні параметри повітряної газифікації твердого палива в нерухомому шарі при різних тисках в будь-який момент часу. Ця інформація може бути використана при конструюванні реакторів на стадіях ескізного, технічного та робочого проектування, пусконаладжувальних режимах і роботі газогенератора на ковзних навантаженнях, коли процес повітряної газифікації вугілля є нестационарним. Показано, що: а) основний процес газифікації коксозольних частинок відбувається на малій ділянці фіксованого шару 91 мм, що призводить до зниження температури твердої фази на 160 °С і концентрація  $CO_2 \rightarrow 0$ , внаслідок чого решта інтервалу газифікації ~ 185 мм є малоефективною; б) ділянка окислювальної зони, де температура коксозольних частинок досягає максимального значення, є дуже вузькою і становить ~ 34-41 мм; в) у часовому інтервалі 1951-4052 с, де відбувається інтенсивне переміщення границь зон окислення і газифікації по висоті шару, склад синтетичного газу (за об'ємом) на виході з реактора залишається практично незмінним:  $CO = 34,32\%$  і  $N_2 = 65,66\%$ . Бібл. 8, рис. 6.*

**Ключові слова:** нерухомий шар, вугілля, теплопровідність, повітряна газифікація, кондуктивний, радіаційний, температура.

Стаття надійшла до редакції 28.12.18  
Остаточна версія 18.03.20