

УДК 532.529: 517.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА В НЕПОДВИЖНОМ ПЛОТНОУПАКОВАННОМ СЛОЕ

Б.Б. Рохман, доктор технических наук

Институт возобновляемой энергетики НАН Украины
02094 ул. Г.Хоткевича, 20А, г. Киев, Украина

Построена осесимметричная нестационарная модель процесса теплопереноса в неподвижном цилиндрическом плотноупакованном слое с учетом теплового потока через газовую фазу за счет теплопроводности и излучения, и теплоотдачи через частицы из-за кондуктивного и радиационного теплообмена между ними. С использованием разработанной модели получена детальная информация о профилях температуры частиц, коэффициентах эффективной теплопроводности и теплоотдачи излучением в любой точке поперечного сечения слоя в любой момент времени. Произведена оценка времени прогрева неподвижного слоя для различных видов коксозольных частиц угля и биомассы, что может быть использовано при пусконаладочных режимах установок термохимической переработки твердых топлив. Показано, что: 1) скорость прогрева неподвижного слоя зависит в основном от трех параметров: плотности, теплопроводности и диаметра частиц; 2) уменьшение коэффициента теплопроводности и диаметра частиц, а также повышение их плотности увеличивает время нагрева частиц в неподвижном слое; 3) время прогрева неподвижного слоя частиц соломы значительно ниже, чем при нагреве газового угля из-за меньшей величины насыпной плотности частиц биомассы; 4) времена нагрева частиц лузги и газового угля соизмеримы; 5) с увеличением времени прогрева неподвижного слоя происходит деформация профиля температур, вызванная ростом коэффициентов эффективной теплопроводности, теплоотдачи излучением между соседними частицами, теплопереноса от частицы через газ мимо соседних зерен из-за повышения значений температуры коксозольных частиц во всех точках поперечного сечения слоя. Библ. 4, рис. 8.

Ключевые слова: неподвижный плотноупакованный слой, солома, лузга, уголь, теплопроводность, плотность, кондуктивный, радиационный.

SIMULATION AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE NONSTATIONARY HEAT TRANSFER PROCESS IN THE STATIONARY PACKED BED

B. Rokhman, doctor of technical sciences, leading researcher

Institute of renewable energy, NAS Ukraine
02094 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv, Ukraine

An axisymmetric nonstationary model of the heat transfer process in a stationary cylindrical packed bed is developed with allowance for the heat flux through the gas phase due to thermal conductivity and radiation, and heat transfer through the particles due to conductive and radiative heat exchange between them. Using the developed model, extensive numerical studies of the influence of diameter, thermal conductivity and particle density (biomass, coal) on the heating rate of a fixed bed at any time were carried out. An estimate of the warm-up time of the fixed bed for various types of coke-ash particles of coal and biomass was made, which can be used in commissioning modes of plants for the thermochemical processing of solid fuels. It is shown that: 1) the rate of heating of the fixed bed depends mainly on three parameters: density, thermal conductivity and particle diameter; 2) a decrease in the coefficient of thermal conductivity and the diameter of the particles and an increase in their density increases the heating time of the particles in a fixed bed; 3) the warm-up time of the fixed bed of straw particles is significantly lower than when heating gas coal due to the lower bulk density of biomass particles; 4) the heating time of the husk particles and gas coal is commensurate; 5) with increasing warming time of the fixed bed, the temperature profile deforms due to an increase in the coefficients of effective thermal conductivity, heat transfer by radiation between adjacent particles, heat transfer from a particle through a gas past neighboring grains due to an increase in temperature values of coke-ash particles at all points of the cross section of the bed. Referenses 4, fig. 8.

Keywords: fixed packed bed, straw, husk, coal, thermal conductivity, density, conductive, radiation.

© Б.Б.Рохман, 2018



Б. Рохман
B. Rokhman

Сведения об авторе: ведущий научный сотрудник Института угольных энерго-технологий 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.

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

Author information: 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.

Publications: more than 90 scientific papers, 27 of them are indexed by the scientometric Scopus database, and 4 are indexed by the scientometric Web of Science database.

ORCID: 0000-0002-1270-6102

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

e-mail: brolene@yahoo.com

Условные обозначения:

a – степень черноты частицы;

c – теплоемкость, кДж/(кг·К);

D – диаметр цилиндрической поверхности, м;

R – радиус цилиндрической поверхности, м;

r – текущий радиус, м;

t – температура, °С;

α – коэффициент теплообмена, кДж/(с·м²·К);

δ – диаметр частицы, м;

ε – порозность слоя;

λ – коэффициент теплопроводности, кДж/(с·м·К);

ρ – плотность, кг/м³;

σ_0 – постоянная Стефана–Больцмана, кДж/(с·м²·К⁴);

τ – время, с;

Φ – параметр модели теплопроводности зернистого слоя.

Индексы:

bed – слой;

cond – кондуктивный теплообмен;

g – газ;

p – частица;

rad – лучистый теплообмен;

w – поверхность;

эф – эффективный;

0 – начальные условия;

I–V – варианты расчета.

Введение. Настоящая работа посвящена математическому моделированию и численному исследованию влияния геометрических и физических параметров различных видов коксозольных частиц твердых топлив на процесс радиального теплопереноса за счет нестационарной теплопроводности в цилиндрическом плотном слое.

Постановка задачи. Предлагаемая модель базируется на следующих основных предпосылках:

1) несферические коксозольные частицы каменного угля или биомассы (солома, лузга) име-

ют шарообразную форму, эквивалентный диаметр которых определяется через объем зерен неправильной формы;

2) рассматриваются коксозольные частицы без содержания летучих веществ и исходной влаги твердого топлива;

3) температура однородной боковой поверхности цилиндрической стенки, ограничивающей объем неподвижного слоя, постоянна и не меняется вдоль поверхности;

4) тепловым сопротивлением ограждающей

поверхности пренебрегаем;

5) не учитывается влияние изменения эн- тальпии газа на рассматриваемый процесс;

6) гетерогенная система газ – твердые час- тицы рассматривается как квазигомогенный континуум с эффективным коэффициентом теп- лопроводности;

7) газовая фаза в слое неподвижна;

8) температуры газа и частиц равны между собой.

Основные уравнения. Уравнение, описы- вающее изменение во времени радиального распределения температуры частиц в цилинд- рическом плотноупакованном зернистом слое имеет вид [1]

$$\rho_p(1-\varepsilon)\frac{\partial c_p t_p}{\partial \tau} = \frac{\partial}{r\partial r} \left[r\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial t_p}{\partial r} \right], \quad (1)$$

где эффективный коэффициент теплопроводно- сти $\lambda_{\text{эф}}$ находится по формуле [2]

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

коэффициент теплоотдачи излучением от части- цы через газ мимо соседних зерен определяется согласно выражению [2]

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

коэффициент теплоотдачи излучением между соседними частицами [2] –

$$\alpha_{\text{rad,p}} = 0,227 \cdot 10^{-9} \frac{a_p (t_p + 273)^3}{2 - a_p}. \quad (4)$$

Первый член формулы (2) учитывает тепло- вой поток через газовую фазу теплопроводно- стью и излучением, второй – теплоотдачу через частицы за счет кондуктивного и радиационного теплообмена между ними.

Некоторые результаты расчетов. Обсудим результаты расчетов пяти вариантов нагрева раз-

личных видов твердых топлив в цилиндрическом неподвижном слое.

Вариант I: газовый уголь,

$$\lambda_p = 0,0038 \text{ кДж}/(\text{с}\cdot\text{м}\cdot\text{К}) [3], \rho_p = 1383 \text{ кг}/\text{м}^3, \delta = 0,009 \text{ м}.$$

Вариант II: солома,

$$\lambda_p = 8 \cdot 10^{-5} \text{ кДж}/(\text{с}\cdot\text{м}\cdot\text{К}), \rho_p = 133 \text{ кг}/\text{м}^3, \delta = 0,0073 \text{ м}.$$

Варианты III и V: лузга,

$$\lambda_p = 0,0001 \text{ кДж}/(\text{с}\cdot\text{м}\cdot\text{К}), \rho_p = 200 \text{ кг}/\text{м}^3, \delta = 0,0019 \text{ м}.$$

Вариант IV: каменный уголь,

$$\lambda_p = 0,00025 \text{ кДж}/(\text{с}\cdot\text{м}\cdot\text{К}) [3], \rho_p = 1300 \text{ кг}/\text{м}^3, \delta = 0,009 \text{ м}.$$

Варианты III и V отличаются между собой способом расчета эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$. В варианте III величина $\lambda_{\text{эф}}$ вычисляется с использованием выражений (2)–(4), в V – согласно рекомендациям [4]:

$$\lambda_{\text{эф}} = \alpha_{\text{cond}} + \alpha_{\text{rad}}, \quad (5)$$

где коэффициент кондуктивного теплообмена рассчитывается как

$$\alpha_{\text{cond}} = \frac{2\lambda_g}{1 - \frac{\lambda_g}{\lambda_p}} \left(\frac{\ln(\lambda_p/\lambda_g)}{1 - \frac{\lambda_g}{\lambda_p}} - 1 \right), \quad (6)$$

а коэффициент теплоотдачи излучением – исходя из выражения

$$\alpha_{\text{rad}} = 0,707 \lambda_g (\lambda_p/\lambda_g)^{1,11} \left(\frac{4\sigma_0 (t_p + 273)^3 \delta/\lambda_p}{2 \left(\frac{1}{a_p} - 1 \right) + \frac{1}{0,576}} \right)^{0,96}. \quad (7)$$

Во всех вариантах $t_{p0} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_{\text{bed}} = 0,24 \text{ м}$, $\varepsilon = 0,4$, $a_p = 0,85$. Для решения двух- мерного уравнения нестационарной теплопро- водности (1) необходимо задать граничные усло- вия на оси и стенке ограждающего цилиндра. На оси неподвижного слоя граничные условия зада- ются из соображения симметрии ($r = 0$): $\partial t_p / \partial r = 0$, на поверхности цилиндра

($r = R$) – $t_{p,R} = t_w = 900$ °С. Расчетный материал проиллюстрирован на рис. 1–8, где представлены профили наиболее важных параметров процесса нагрева коксозольных частиц твердого топлива в неподвижном слое. На рис. 1 *a* показано распределение расчетных значений температур частиц газового угля по поперечному сечению неподвижного слоя. Видно, что с повышением времени

прогрева плотного слоя, наблюдается изменение характера зависимости $t_p(\tau, r)$, обусловленное ростом эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эф}(\alpha_{rad,p}, \alpha_{rad,g})$ (рис. 1 *б*) за счет возрастания коэффициентов теплоотдачи излучением $\alpha_{rad,p}(t_p)$ и $\alpha_{rad,g}(t_p)$ (рис. 2; см. (2)–(4)) из-за повышения значений температуры частиц t_p во всех точках поперечного сечения слоя.

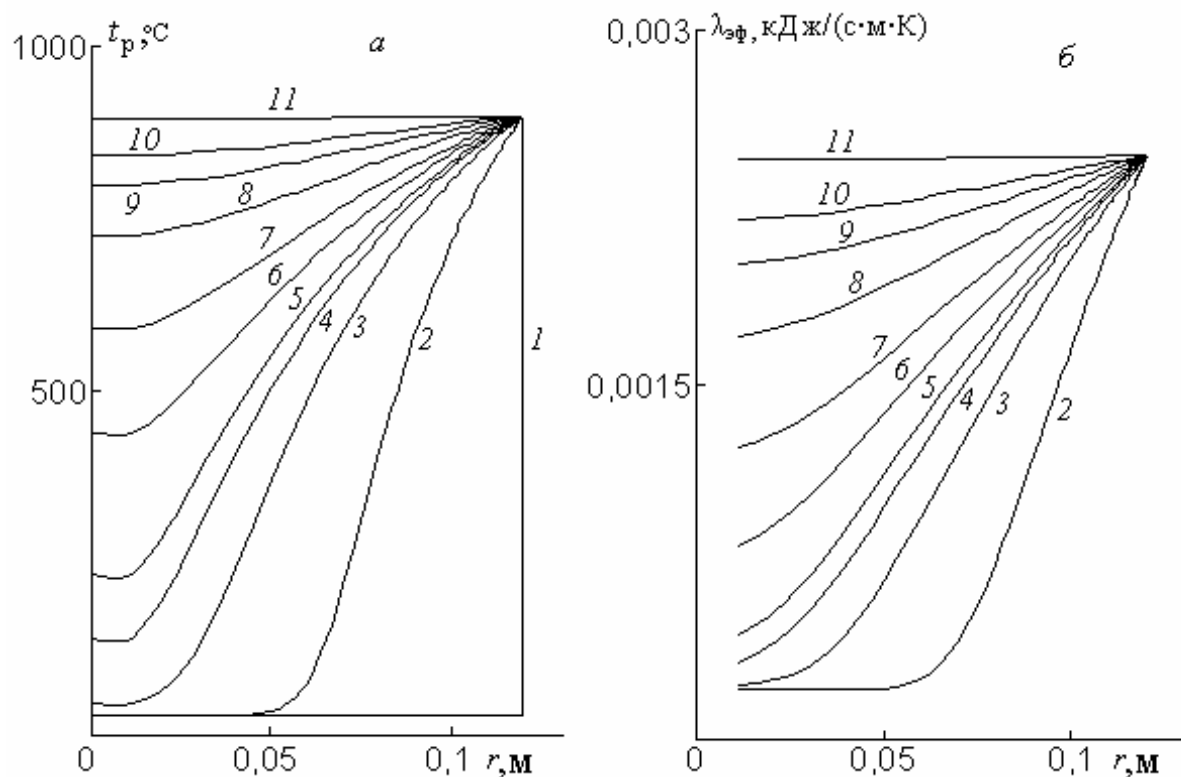


Рис. 1. Распределение температуры газового угля (*a*) и эффективного коэффициента теплопроводности (*б*) по поперечному сечению неподвижного слоя в зависимости от времени прогрева: 1 – 0,0002 с, 2 – 450 с, 3 – 1050 с, 4 – 1350 с, 5 – 1500 с, 6 – 1800 с, 7 – 2100 с, 8 – 2550 с, 9 – 3000 с, 10 – 3450 с, 11 – 5850 с (вариант I)

Fig. 1. Temperature distribution of the gas coal (*a*) and the effective coefficient of thermal conductivity (*б*) over the cross section of the fixed bed as a function of the heating time: 1 – 0,0002 s, 2 – 450 s, 3 – 1050 s, 4 – 1350 s, 5 – 1500 s, 6 – 1800 s, 7 – 2100 s, 8 – 2550 s, 9 – 3000 s, 10 – 3450 s, 11 – 5850 s (variant I)

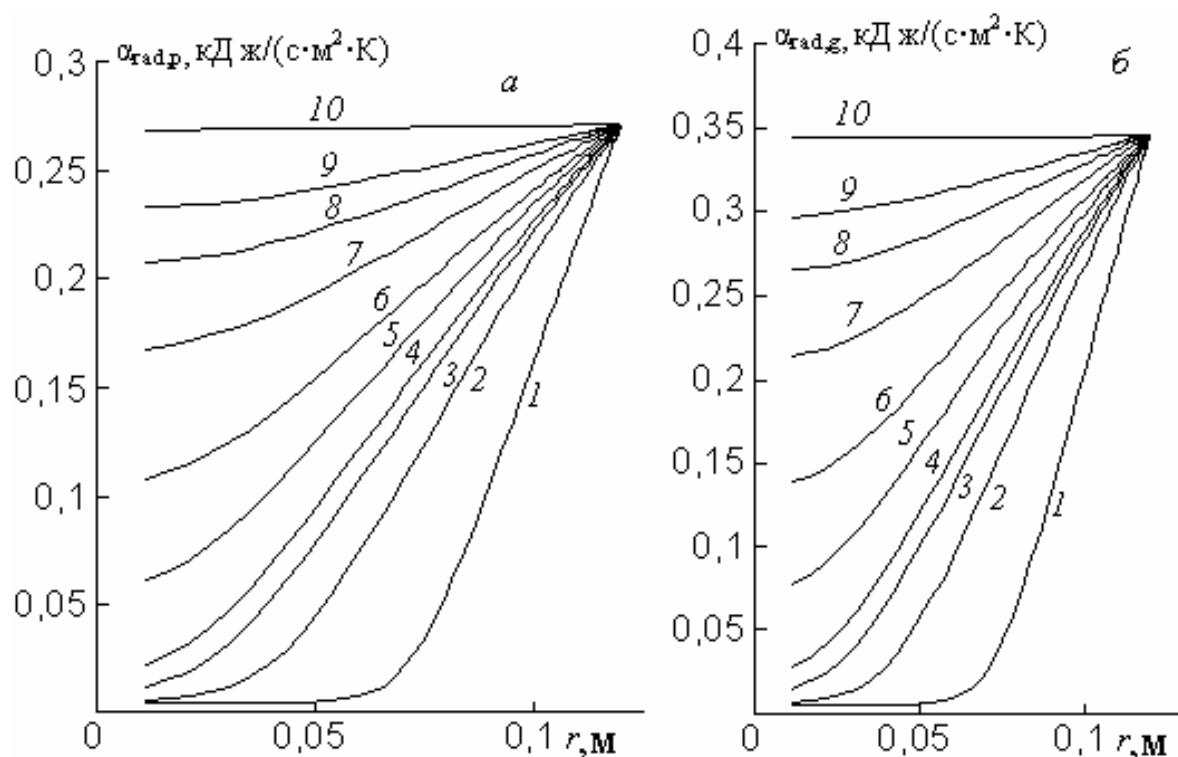


Рис. 2. Распределение коэффициентов теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{rad,p}}$ (а) и $\alpha_{\text{rad,g}}$ (б) по поперечному сечению неподвижного слоя в зависимости от времени прогрева газового угля: 1 – 450 с, 2 – 1050 с, 3 – 1350 с, 4 – 1500 с, 5 – 1800 с, 6 – 2100 с, 7 – 2550 с, 8 – 3000 с, 9 – 3450 с, 10 – 5850 с (вариант I)

Fig. 2. Distribution of the heat transfer coefficients for the radiation $\alpha_{\text{rad,p}}$ (a) and $\alpha_{\text{rad,g}}$ (б) over the cross section of the fixed bed, depending on the gas coal heating time: 1 – 450 s, 2 – 1050 s, 3 – 1350 s, 4 – 1500 s, 5 – 1800 s, 6 – 2100 s, 7 – 2550 s, 8 – 3000 s, 9 – 3450 s, 10 – 5850 s (variant I)

Скорость прогрева плотного слоя зависит в основном от трех параметров λ_p , ρ_p и δ , что следует из уравнений (1) и (2). С увеличением коэффициента теплопроводности материала λ_p и диаметра частиц δ и уменьшением их плотности, скорость прогрева плотноупакованного зернистого слоя возрастает.

В варианте II, где отношения $\lambda_{pI}/\lambda_{pII} = 47,5$ и $\rho_{pI}/\rho_{pII} = 10,4$, время прогрева слоя значительно меньше, чем в варианте I (ср. рис. 1 а и рис. 3 а). В этом случае определяющим фактором скорости нагрева частиц в слое является их плотность ($\rho_{pI} \gg \rho_{pII}$; см. (1)), вследствие чего градиент температур возрастает

($dt_p(\tau, r)/d\tau)_{II} > (dt_p(\tau, r)/d\tau)_I$, что приводит к повышению коэффициентов теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{rad,pII}}(t_p) > \alpha_{\text{rad,pI}}(t_p)$ и $\alpha_{\text{rad,gII}}(t_p) > \alpha_{\text{rad,gI}}(t_p)$, а следовательно и эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эфII}}(\alpha_{\text{rad,pII}}, \alpha_{\text{rad,gII}}) > \lambda_{\text{эфI}}(\alpha_{\text{rad,pI}}, \alpha_{\text{rad,gI}})$ (ср. рис. 1 б, рис. 2 и 3 б, рис. 4).

Несколько иная картина наблюдается в случае прогрева реторты с лузгой (вариант III). Здесь влияние первого фактора $\rho_{pI}/\rho_{pIII} = 6,9$ полностью компенсируется вторым – $\lambda_{pI}/\lambda_{pIII} = 38$, благодаря чему времена прогрева неподвижного слоя с газовым углем и лузгой оказываются соизмеримыми (ср. рис. 1, рис. 2 и рис. 5, рис. 6).

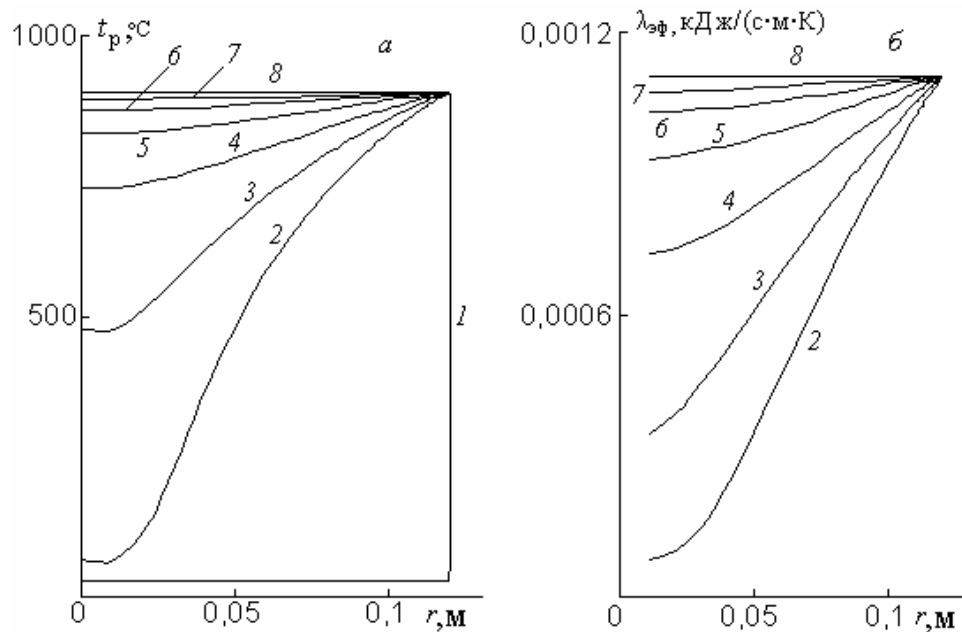


Рис. 3. Распределение температуры частиц соломы (*a*) и эффективного коэффициента теплопроводности (*б*) по поперечному сечению неподвижного слоя в зависимости от времени прогрева: 1 – 0,0002 с, 2 – 300 с, 3 – 450 с, 4 – 600 с, 5 – 750 с, 6 – 900 с, 7 – 1050 с, 8 – 1650 с (вариант II)

Fig. 3. Temperature distribution of the straw particles (*a*) and the effective coefficient of thermal conductivity (*б*) over the cross section of the fixed bed as a function of the heating time: 1 – 0,0002 s, 2 – 300 s, 3 – 450 s, 4 – 600 s, 5 – 750 s, 6 – 900 s, 7 – 1050 s, 8 – 1650 s (variant II)

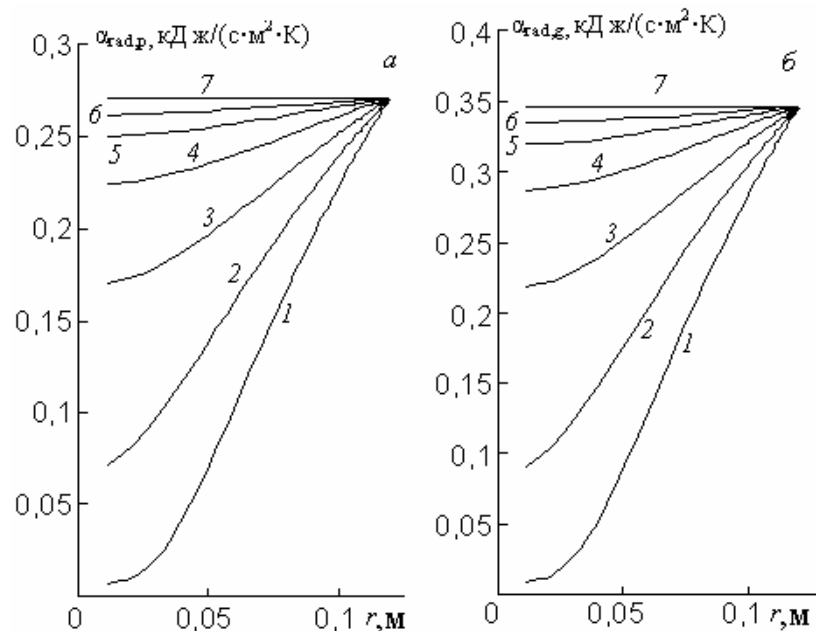


Рис. 4. Распределение коэффициентов теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{rad,p}}$ (*a*) и $\alpha_{\text{rad,g}}$ (*б*) по поперечному сечению неподвижного слоя в зависимости от времени прогрева частиц соломы: 1 – 300 с, 2 – 450 с, 3 – 600 с, 4 – 750 с, 5 – 900 с, 6 – 1050 с, 7 – 1650 с (вариант II)

Fig. 4. Distribution of the heat transfer coefficients for the radiation $\alpha_{\text{rad,p}}$ (*a*) and $\alpha_{\text{rad,g}}$ (*б*) over the cross section of the fixed bed, depending on the straw particles heating time: 1 – 300 s, 2 – 450 s, 3 – 600 s, 4 – 750 s, 5 – 900 s, 6 – 1050 s, 7 – 1650 s (variant II)

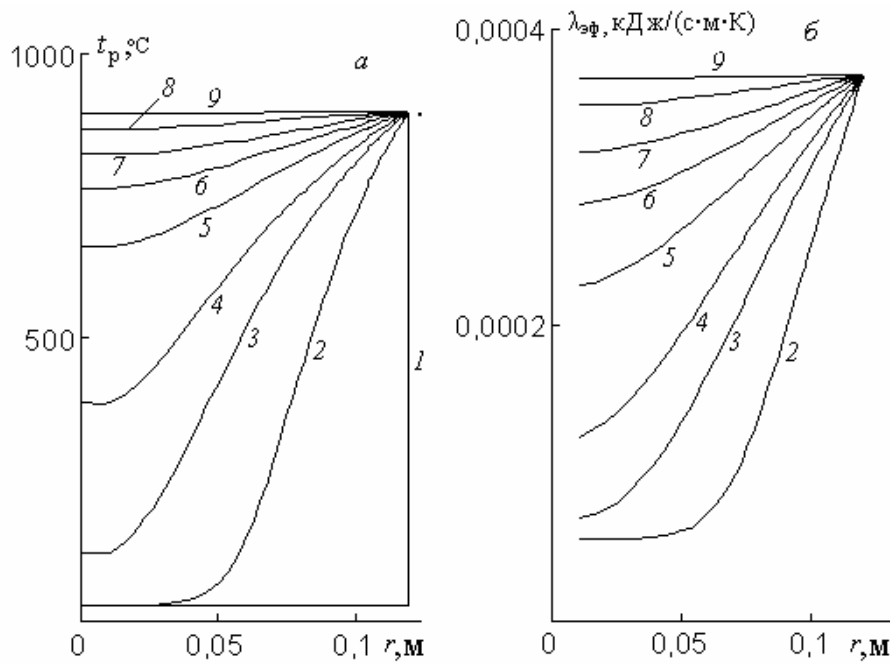


Рис. 5. Распределение температуры луги (а) и эффективного коэффициента теплопроводности (б) по поперечному сечению неподвижного слоя в зависимости от времени прогрева: 1 – 0,0002 с, 2 – 450 с, 3 – 1050 с, 4 – 1500 с, 5 – 2100 с, 6 – 2550 с, 7 – 3000 с, 8 – 3750 с, 9 – 5550 с (вариант III)

Fig. 5. Temperature distribution of the husk (a) and the effective coefficient of thermal conductivity (b) over the cross section of the fixed bed as a function of the heating time: 1 – 0,0002 s, 2 – 450 s, 3 – 1050 s, 4 – 1500 s, 5 – 2100 s, 6 – 2550 s, 7 – 3000 s, 8 – 3750 s, 9 – 5550 s (variant III)

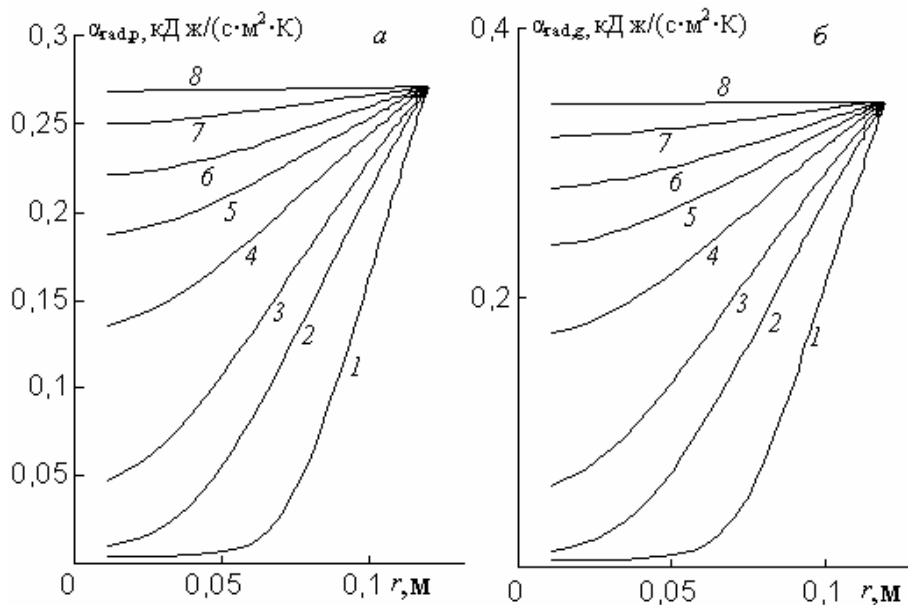


Рис. 6. Распределение коэффициентов теплоотдачи излучением $\alpha_{rad,p}$ (а) и $\alpha_{rad,g}$ (б) по поперечному сечению неподвижного слоя в зависимости от времени прогрева луги: 1 – 450 с, 2 – 1050 с, 3 – 1500 с, 4 – 2100 с, 5 – 2550 с, 6 – 3000 с, 7 – 3750 с, 8 – 5550 с (вариант III)

Fig. 6. Distribution of the heat transfer coefficients for the radiation $\alpha_{rad,p}$ (a) and $\alpha_{rad,g}$ (b) over the cross section of the fixed bed, depending on the husk heating time: 1 – 450 s, 2 – 1050 s, 3 – 1500 s, 4 – 2100 s, 5 – 2550 s, 6 – 3000 s, 7 – 3750 s, 8 – 5550 s (variant III)

Уменьшение коэффициента теплопроводности λ_p с 0,0038 до 0,00025 кДж/(с·м·К) (ср. варианты I и IV) приводит к уменьшению величины $\lambda_{эф}$, вследствие чего время прогрева частиц каменного угля в варианте IV оказывается выше, чем в варианте I (ср. рис. 1 и рис. 7).

Как отмечалось ранее, результаты расчетов эффективного коэффициента теплопроводности

$\lambda_{эф}$ для варианта III получены с использованием выражений (2)–(4) [2], а в варианте V – согласно зависимостям (5)–(7) [4]. Анализ численных исследований показывает, что значения зависимости $t_p(\tau, r)$, а также функции $\lambda_{эф}(\tau, r)$ в рассматриваемых вариантах достаточно близки, поэтому время прогрева в обоих вариантах соизмеримо (ср. рис. 5 и рис. 8).

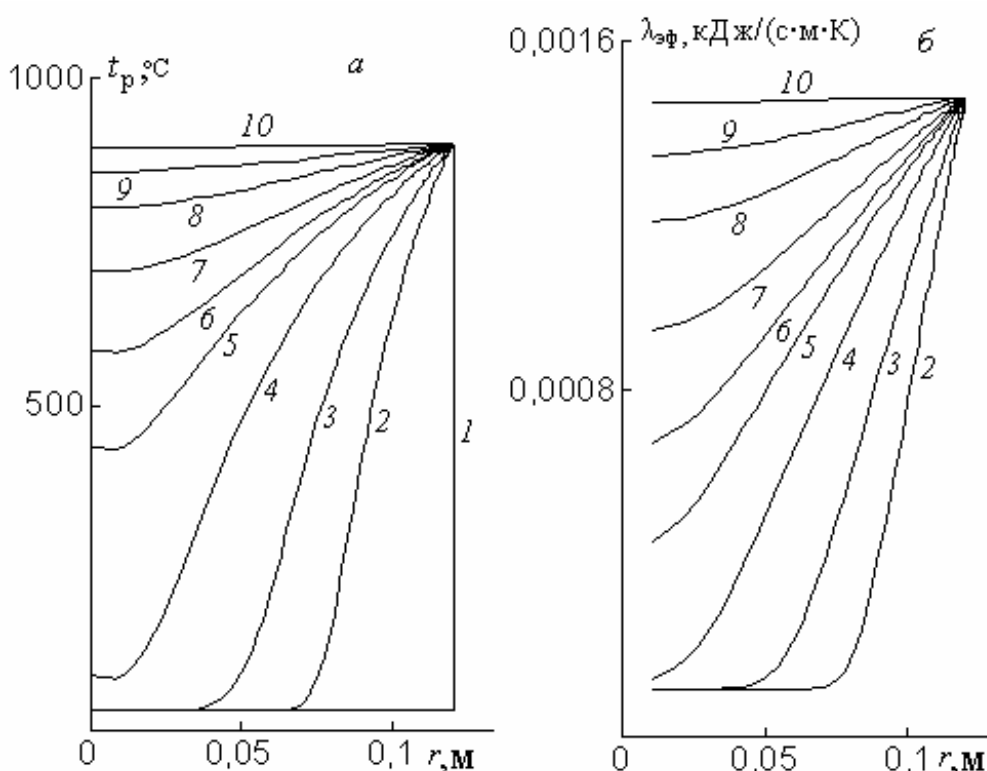


Рис. 7. Распределение температуры каменного угля (а) и эффективного коэффициента теплопроводности (б) по поперечному сечению неподвижного слоя в зависимости от времени прогрева: 1 – 0,0002 с, 2 – 450 с, 3 – 1050 с, 4 – 2100 с, 5 – 3000 с, 6 – 3450 с, 7 – 4050 с, 8 – 4950 с, 9 – 6000 с, 10 – 8850 с (вариант IV)

Fig. 7. Temperature distribution of the coal (a) and the effective coefficient of thermal conductivity (б) over the cross section of the fixed bed as a function of the heating time: 1 – 0,0002 s, 2 – 450 s, 3 – 1050 s, 4 – 2100 s, 5 – 3000 s, 6 – 3450 s, 7 – 4050 s, 8 – 4950 s, 9 – 6000 s, 10 – 8850 s (variant IV)

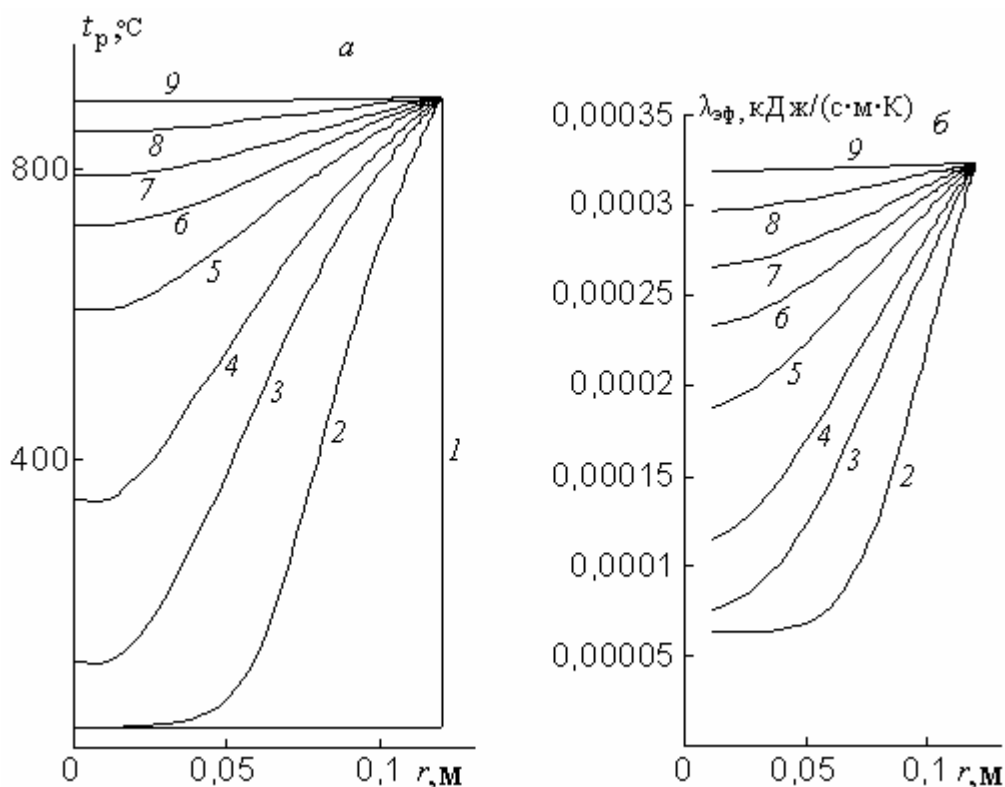


Рис. 8. Распределение температуры лужги (а) и эффективного коэффициента теплопроводности (б) по поперечному сечению неподвижного слоя в зависимости от времени прогрева: 1 – 0,0002 с, 2 – 450 с, 3 – 1050 с, 4 – 1500 с, 5 – 2100 с, 6 – 2550 с, 7 – 3000 с, 8 – 3750 с, 9 – 5550 с (вариант V)

Fig. 8. Temperature distribution of the husk (a) and the effective coefficient of thermal conductivity (b) over the cross section of the fixed bed as a function of the heating time: 1 – 0,0002 s, 2 – 450 s, 3 – 1050 s, 4 – 1500 s, 5 – 2100 s, 6 – 2550 s, 7 – 3000 s, 8 – 3750 s, 9 – 5550 s (variant V)

Выводы. 1. Построена двумерная осесимметричная математическая модель нестационарного процесса теплопроводности в неподвижном цилиндрическом плотноупакованном слое, которая включает в себя кондуктивный теплообмен, радиационный теплоперенос от частицы через газ мимо соседних зерен, теплоотдачу излучением между соседними частицами.

2. Предложенная модель позволяет получить детальную информацию о распределении температуры частиц, коэффициентах эффективной теплопроводности и теплоотдачи излучением в любой точке поперечного сечения слоя в любой момент времени. Кроме того, модель позволяет оценить время прогрева неподвижного плотноупакованного слоя для различных видов коксоугольных частиц угля или биомассы, что может быть использовано при пусконаладочных режимах установок термохимической переработки

твердых топлив.

3. Показано, что: а) с увеличением времени прогрева неподвижного слоя происходит деформация профиля температур $t_p(\tau, r)$, вызванная ростом коэффициентов эффективной теплопроводности $\lambda_{эф}(\alpha_{rad,p}, \alpha_{rad,g})$ и теплоотдачи излучением $\alpha_{rad,p}(t_p)$ и $\alpha_{rad,g}(t_p)$ из-за повышения значений температуры коксоугольных частиц во всех точках поперечного сечения слоя; б) время прогрева неподвижного плотноупакованного слоя частиц соломы значительно ниже, чем при нагреве газового угля из-за меньшей величины насыпной плотности частиц биомассы; в) времена нагрева частиц лужги и газового угля оказываются соизмеримыми. Это объясняется тем, что влияние первого фактора $\rho_{pl}/\rho_{plII} = 6,9$ полностью нивелируется вторым – $\lambda_{pl}/\lambda_{plII} = 38$; г) уменьшение коэффициента теплопроводности материала увеличивает время нагрева частиц в неподвижном слое.

1. Петухов Б.С., Лукачевский В.К. Справочник по теплообменникам. Т. №1. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.

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

3. Краснощеков Е.А., Сукомел А.М. Задачник по теплопередаче. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.

4. Mohamad A.A., Karim G.A. Flow and Heat Transfer Within Segregated Beds of Solid Particles // Journal of Porous Media 2001. Vol. 4 (3). Pp. 215–224.

МОДЕЛЮВАННЯ І ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПЕРЕНОСУ В НЕРУХОМОМУ ЩІЛЬНО УПАКОВАНОМУ ШАРІ

Б.Б. Рохман, доктор технічних наук

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

Побудовано осесиметричну нестационарну модель процесу теплопереносу в нерухомому циліндричному щільноупакованому шарі з урахуванням теплового потоку через газову фазу за рахунок теплопровідності і випромінювання, і тепловіддачі через частинки завдяки кондуктивному і радіаційному теплообміну між ними. З використанням розробленої моделі отримано детальну інформацію про профілі температури частинок, коефіцієнти ефективної теплопровідності і тепловіддачі випромінюванням в будь-якій точці поперечного перерізу шару в будь-який момент часу. Зроблено оцінку часу прогріву нерухомого шару для різних видів коксозольних частинок вугілля і біомаси, що може бути використано при пусконаладжувальних режимах установок термохімічної переробки твердих палив. Показано, що: 1) швидкість прогрівання нерухомого шару залежить в основному від трьох параметрів: щільності, теплопровідності і діаметра частинок; 2) зменшення коефіцієнта теплопровідності і діаметра частинок і підвищення їхньої щільності збільшує час нагрівання частинок в нерухомому шарі; 3) час прогріву нерухомого шару частинок соломи значно нижчий, ніж під час нагрівання газового вугілля через меншу за розміром насипну щільність частинок біомаси; 4) часи нагріву частинок лушпиння і газового вугілля сумірні; 5) зі збільшенням часу прогріву нерухомого шару відбувається деформація профілю температур, спричинена зростанням коефіцієнтів ефективної теплопровідності, тепловіддачі випромінюванням між сусідніми частинками, теплопереносу від частинки через газ повз сусідні зерна через підвищення значень температури коксозольних частинок у всіх точках поперечного перерізу шару. Бібл. 4, рис. 8.

Ключові слова: нерухомий щільно упакований шар, солома, лузга, вугілля, теплопровідність, щільність, кондуктивний, радіаційний.

REFERENCES

1. Petuhov B.S., Lukachevskiy V. K. (1987) *Spravochnik po teploobmennikam*. [Reference book for heat exchangers] Vol. 1. Moscow, USSR, Energoatomizdat, 560 p. (Rus.)

2. Aerov M.E., Todes O.M., Narinskiy D.A. (1979) *Apparaty so statsionarnym zernistym sloem*. [Apparatus with a stationary granular bed] Leningrad, USSR: Khimiya, 176 p. (Rus.)

3. Krasnoschekov E.A., Sukomel A.M. *Zadachnik po teploperedache*. (1980) [Heat Transfer Tasks] Moscow, USSR: Energiya, 288 p. (Rus.)

4. Mohamad A.A., Karim G.A. (2001) Flow and Heat Transfer Within Segregated Beds of Solid Particles. *Journal of Porous Media*, Vol. 4 (3), Pp. 215–224 (Eng.)

SYNOPSIS

A two-dimensional axisymmetric mathematical model of the nonstationary heat conduction process in a fixed cylindrical packed bed is developed, taking into account the heat flux through the gas phase due to thermal conductivity and radiation, and heat transfer through particles due to conductive and radiative heat transfer between them. The proposed model makes it possible to obtain detailed information on the calculated values of the temperature of the coke-ash particles or biomass, the coefficients of effective thermal conductivity and heat emission at any point in the cross section of the bed at any time. With the help of the developed model, extensive theoretical studies of the influence of the diameter, thermal conductivity, and density of coke-ash particles of biomass and coal on the heating time of the fixed bed to a specified temperature were made. It is shown that: a) with an increase of the heating time of the stationary bed, deformation of the temperature profile $t_p(\tau, r)$ occurs – the temperature equalization in the radial direction due to the growth of the coefficients of effective thermal conductivity $\lambda_{ef} = f(\alpha_{rad,p}, \alpha_{rad,g})$ and heat emission by radiation due to increasing temperature of the coke-ash particles at all points of the cross-section of the bed; b) the time for heating the fixed bed of straw particles is much lower than heating time of the gas coal because of the smaller value of the biomass particles bulk density; c) the heating times of the husk and gas coal particles are commensurate. This is because the influence of the first factor $\rho_{pl}/\rho_{pIII} = 6,9$ is completely leveled by the second factor – $\lambda_{pl}/\lambda_{pIII} = 38$; d) a decrease in the thermal conductivity of the material increases the heating time of the particles in the fixed bed.

Стаття надійшла до редакції 12.07.18

Остаточна версія 18.10.18