

В ур. (7) вторую сумму для лучистого потока на поверхности горелки заменим аналогичной суммой для лучистого потока с правой поверхности экранной сетки, а координату x_ϕ координатой $x_\phi + L_\phi$, после этого указанную сумму запишем следующим образом:

$$\frac{R_\alpha}{J_\alpha} \sum_{j=0}^{J_\alpha} \left[\frac{\varepsilon_\phi \sigma T_\phi^4}{1 - \rho_\phi} - \frac{\alpha_\phi I_{\phi j}^x + [1 - \rho_\phi (1 - \alpha_\phi)] F_{\phi \phi j}^x}{(1 - \alpha_\phi)(1 - \rho_\phi)[1 + \alpha_\phi - \rho_\phi(1 - \alpha_\phi)]} + I_{\phi j}^x \right] \times \\ \times r_{\phi j} \gamma_\phi^{-x} (x_{\phi L} - x_\phi - L_\phi, r_k, r_{\phi j})$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эккерт Э.Р. Теория тепло и массообмена. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 680 с.
2. Зигель Р., Хауэл Дж. Теплообмен излучением. — М.: Мир, 1975. — 934 с.
3. Бушланов В.П., Бушланов И.В. Метод расчета теплообмена излучением в топке осесимметричной конфигурации на осно-

Выводы

На примере приближенной инженерной квазиодномерной методики расчета излучения показан способ построения формул для вычисления суммарного вектора потока лучистой энергии на основе уравнений (30)–(33) статьи [3]. Уравнения инженерного метода с предложенной конфигурацией топки пригодны для оптимизации размеров топки и горелки; добавляется правый торец; или ставится экранная сетка перед поверхностью горелки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований — грант РФФИ 06-08-00357-а.

ве уравнений для компонент суммарного вектора потока лучистой энергии. Система уравнений // Известия Томского политехнического университета. — 2007. — Т. 311. — № 4. — С. 20–23.

Поступила 9.07.2007 г.

УДК 536.46+533.2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ КОКСУЮЩИХСЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

А.Н. Субботин

Томский политехнический университет
E-mail: subbot@inbox.ru

Рассмотрена двумерная осесимметричная нестационарная математическая модель взаимодействия высокотемпературного потока газообразного окислителя с пористым твердым коксующимся топливом. Исследовано влияние параметров вдуваемого газа-окислителя, влагосодержания и пористости горючего на формирование режимов физико-химических превращений и распространение в виде волны горения. Получено, что с помощью предложенной модели можно моделировать высоко-, низкотемпературный режимы горения и режим тления.

Введение

Тепломассообменные процессы при физико-химических превращениях в пористом твердом горючем несут основную ответственность за образование в продуктах сгорания токсичных веществ, выбрасываемых в атмосферу (например, при утилизации отходов [1, 2], при низовых и подземных пожарах [3, 4]). Наиболее рациональным и экологически выгодным инструментом при решении практически важных задач является разработка и численное экспериментирование с физически обоснованными математическими моделями [2–6]. Одна из наиболее развитых в этом плане моделей рассмотрена в [6], однако ее одномерность не позволяет проанализировать радиальную составляющую исследуемых характеристик тепломассопереноса. В связи с этим применение двумерной осесимметричной нестационарной модели является обоснованным.

В данной работе, на примере утилизации отходов деревообработки в вертикальном цилиндрическом реакторе заданных размеров, представлены результаты компьютерного моделирования высокотемпературных процессов тепломассопереноса при физико-химических превращениях в пористых коксующихся материалах.

Физико-математическая модель

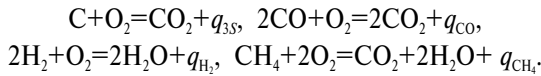
Рассматривается пористое топливо (отходы деревообработки) помещенное в расположенную вертикально цилиндрическую печь, высота слоя топлива h , радиус основания R . После загрузки начинается продувка печи высокотемпературным газовым потоком. Предполагается, что стенка печи металлическая, тонкая, температура стенки равна температуре соприкасающегося со стенкой топлива, так как теплопроводность стали значительно выше теплопроводности топлива.

Полагается, что процессы сушки и пиролиза конденсированного топлива описываются уравнениями вида:

$$\begin{aligned} v_2 M_2 &\rightarrow v_2' M_2' - q_{2s}, \\ {}_1M_1 &\rightarrow {}_2M_3 + {}_4M_4 + \sum_{\beta=2}^6 {}_5M_{5\beta} + q_p. \end{aligned}$$

Первое уравнение описывает процесс испарения воды ($v_2 M_2$) и превращения ее в пар ($v_2' M_2'$), второе – процесс пиролиза твердого топлива. Твердое топливо разлагается на конденсированные и газообразные продукты пиролиза.

Кроме данных реакций учитываются гетерогенная реакция горения кокса и гомогенные реакции окисления оксида углерода, водорода и метана:



Здесь $q_p, q_{2s}, q_{3s}, q_{CO}, q_{H_2}, q_{CH_4}$ – тепловые эффекты реакций пиролиза, испарения влаги, окисления кокса, оксида углерода, водорода и метана, Дж/кг.

В силу того, что физическая задача имеет ось симметрии, математическая постановка записывается в цилиндрической системе координат, тогда рассматриваемый процесс будет описываться следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} &= -R_p, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \quad \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \\ &= \gamma_c R_p - R_{3s}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \gamma_s R_p, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \varphi_s) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_s \varphi_s u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_s \varphi_s v) &= \\ &= \gamma_g R_p + R_{2s} + R_{3s}, \quad \sum_{j=1}^5 \varphi_j = 1, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \varphi_s c_\beta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_s \varphi_s u c_\beta) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_s \varphi_s v c_\beta) &= \\ &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho_s \varphi_s D_\beta \frac{\partial c_\beta}{\partial r} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_s \varphi_s D_\beta \frac{\partial c_\beta}{\partial z} \right) + R_{s\beta} + R_{5s\beta}, \\ \beta &= \overline{1, 6}, \quad \sum_{\beta=1}^7 c_\beta = 1, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^5 \rho_j \varphi_j c_{pj} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_s \varphi_s c_{ps} \left(u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= \\ &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_p R_p + \\ &+ q_{CO} R_{CO} + q_{H_2} R_{H_2} + q_{CH_4} R_{CH_4} + q_s R_s - q_{2s} R_{2s}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad v = -\frac{K}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} - \rho_s g \right), \quad p = \frac{\rho_s R T}{M}, \quad M = \frac{1}{\sum_{\beta=1}^7 \frac{c_\beta}{M_{s\beta}}}. \quad (5)$$

Здесь уравнения (1) – законы сохранения массы исходного конденсированного вещества, влаги, кокса и золы соответственно; (2) – уравнение сохранения массы газовой фазы; (3) – уравнения сохранения массы отдельных компонентов ($\beta=1$ – кислорода, $\beta=2$ – оксида углерода, $\beta=3$ – диоксида углерода, $\beta=4$ – водорода, $\beta=5$ – метана, $\beta=6$ – водяного пара); (4) – уравнение сохранения энергии; (5) – уравнение движения в форме Дарси в проекциях на оси r и z и уравнение состояния.

Система уравнений (1)–(5) решалась при следующих краевых условиях:

$$\begin{aligned} t = 0: \varphi_j &= \varphi_{jH}, \quad j = \overline{1, 4}, \quad c_\beta = c_{\beta H}, \\ \beta &= \overline{1, 6}, \quad \rho_s = \rho_{sH}, \quad T = T_H; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} r = R: \lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} &= \alpha_2 (T_w - T_s) + q_r, \quad \frac{\partial c_\beta}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0; \\ r = 0: \frac{\partial c_\beta}{\partial r} &= 0, \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} z = 0: \frac{\partial c_\beta}{\partial z} \Big|_{r \geq r_0} &= 0, \quad \rho_s \varphi_s D_\beta \frac{\partial c_\beta}{\partial z} \Big|_{r < r_0} = \\ &= \frac{\alpha_1}{c_{p5}} (c_\beta - c_{\beta 0}), \quad \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{r \geq r_0} = \rho_s g; \end{aligned}$$

$$p|_{r < r_0} = p_0, \quad \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{r \geq r_0} = \alpha_2 (T - T_s),$$

$$\lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{r < r_0} = \alpha_1 (T - T_0),$$

$$\begin{aligned} z = h: p &= p_e, \quad \rho_s \varphi_s D_\beta \frac{\partial c_\beta}{\partial z} = \frac{\alpha_1}{c_{p5}} (c_\beta - c_{\beta e}), \\ \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} &= \alpha_1 (T - T_e), \end{aligned} \quad (8)$$

где индексы 0, e , H приписываются величинам, характеризующим источник зажигания, внешнюю среду и слой горючего в начальный момент времени соответственно; s – удельная поверхность пор, 1/м; T_w, T_s – температура стенки печи и внешняя температура у боковой стенки, К; u и v – компоненты вектора скорости фильтрации газообразных продуктов в направлении осей координат r и z , м/с; $\gamma_c = v_3' M_3 / v_1 M_1$, $\gamma_s = v_4' M_4 / v_1 M_1$, $\gamma_g = \sum_{j=1}^5 v_{sj}' M_{sj} / v_1 M_1$ – массовые доли кокса, золы и газовой фазы, образующиеся при пиролизе топлива; $\lambda = \lambda_s + \lambda_r$ – эффективный коэффициент теплопроводности пористой среды, $\lambda_r = 16 \sigma T^3 / s$ – коэффициент лучистой теплопроводности; $\lambda_s = \sum_{j=1}^5 \lambda_j \varphi_j$ – коэффициент теплопроводности многофазной среды, Вт/(м·К); $\varphi_j, \rho_j, c_{pj}$ ($j=1, \dots, 5$) – объемные доли, истинные плотности и удельные теплоемкости топлива, воды, кокса, золы и газовой фазы соответственно, м³/м³, кг/м³, Дж/(кг·К); $c_{p5} = \sum_{\beta=1}^7 c_{p5\beta} c_\beta$, $\lambda_s = \sum_{\beta=1}^7 \lambda_{s\beta} c_\beta$ – удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности газовой фазы в порах твердого топлива, Дж/(кг·К), Вт/(м·К); K, μ – коэффициенты проницаемости и вязкости, Дарси, Н·с/м²; $c_1, c_{p51}, \lambda_{51}, c_2, c_{p52}, \lambda_{52}, c_3, c_{p53}, \lambda_{53}, c_4, c_{p54}, \lambda_{54}, c_5,$

$c_{p55}, \lambda_{55}, c_6, c_{p56}, \lambda_{56}, c_7, c_{p57}, \lambda_{57}$ – массовые концентрации, удельные теплоемкости и коэффициенты теплопроводности кислорода, оксида углерода, диоксида углерода, водорода, метана, водяного пара и азота соответственно, кг/кг, Дж/(кг·К), Вт/(м·К); $R_{25}, R_{35}, R_p, R_{CO}, R_{H_2}, R_{CH_4}$ – массовые скорости испарения влаги, окисления кокса, разложения топлива, окисления оксида углерода, водорода и метана, кг/(м²·с); α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи, характеризующие теплообмен топлива с внешней средой, Вт/(м²·К); v_1, v_3', v_4', v_{5j}' – стехиометрические коэффициенты; t – время, с; r_0 – радиус колосников, м; p – давление газообразных продуктов в порах, Па; $E_{35}, k_{35}, E_{25}, k_{25}, E_p, k_p, E_{CO}, k_{CO}, E_{H_2}, k_{H_2}, E_{CH_4}, k_{CH_4}$ – энергия активации и предэкспоненциальный множитель гетерогенных реакций горения кокса и испарения влаги, Дж/моль, м/с, а также гомогенных реакций разложения горючего и окисления оксида углерода, водорода и метана, Дж/моль, 1/с; $M_C, M_{CO}, M_{O_2}, M_{H_2}, M_{CH_4}, M_{H_2O}$ – атомарная масса углерода и молекулярные массы оксида углерода, кислорода, водорода, метана и водяного пара, кг/моль; $\alpha_1 = \alpha_0 [1 + k_1 (\rho_s q_p v_w)]$ – коэффициент теплоотдачи для пористого основания, α_0 – коэффициент теплоотдачи для непроницаемого основания, Вт/(м²·К); k_1 – эмпирическая константа, м²·с/кг; v_w – скорость вдува высокоэнтальпийного потока газообразного окислителя через колосники, м/с; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); D_β – эффективный коэффициент диффузии β -компоненты, м²/с; $q_R = \varepsilon_s \sigma T_w^4$ – радиационный поток от стенки печи в окружающую среду, Вт/м²; p_0, p_e – давление на нижнем и верхнем основаниях цилиндрической печи, Па. Кроме того, в уравнениях (1)–(4) введены краткие обозначения скоростей реакций

$$\begin{aligned} R_{51} &= -\left(\frac{M_{O_2}}{2M_{CO}}\right) R_{CO} - \left(\frac{2M_{O_2}}{M_{CH_4}}\right) R_{CH_4} - \left(\frac{M_{O_2}}{M_{H_2}}\right) R_{H_2}, \\ R_{52} &= \gamma_{CO} R_p - R_{CO}, \quad R_{552} = 0, \\ R_{53} &= \gamma_{CO_2} R_p + \left(\frac{M_{CO_2}}{M_{CO}}\right) R_{CO} + \left(\frac{M_{CO_2}}{M_{CH_4}}\right) R_{CH_4}, \\ R_{553} &= \left(\frac{M_{CO_2}}{M_C}\right) R_{35}, \quad R_{554} = 0, \\ R_{54} &= \gamma_{H_2} R_p - R_{H_2}, \quad R_{55} = \gamma_{CH_4} R_p - R_{CH_4}, \quad R_{555} = 0, \\ R_{56} &= \left(\frac{2M_{H_2O}}{M_{CH_4}}\right) R_{CH_4} + \left(\frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}}\right) R_{H_2}, \\ R_{556} &= R_{25}, \quad R_{CH_4} = \\ &= M_{CH_4} k_{CH_4} \left(\frac{\rho_s R}{M}\right) \left(\frac{C_1 M}{M_{O_2}}\right)^{1,5} \left(\frac{C_5 M}{M_{CH_4}}\right)^{-0,5} \exp\left(-\frac{E_{CH_4}}{RT}\right), \\ R_p &= k_p c_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_p}{RT}\right), \\ R_{CO} &= M_{CO} T^{-2,25} k_{CO} \left(\frac{c_1 M}{M_{O_2}}\right)^{0,25} \left(\frac{c_2 M}{M_{CO}}\right) \exp\left(-\frac{E_{CO}}{RT}\right), \end{aligned}$$

Краевая задача (1)–(8) решалась численно на компьютере. Технология решения задачи вида (1)–(8) с использованием итерационно-интерполяционного метода [7] приведена в работе [3]. Кинетические параметры процессов сушки, пиролиза и горения, а также теплофизические параметры газообразных компонентов и конденсированных фракций были взяты из работ [8–13] $\rho_1=1400$ кг/м³, $\rho_2=1000$ кг/м³, $\rho_3=1200$ кг/м³, $\rho_4=750$ кг/м³, $c_{p1}=1970$ Дж/(кг·К), $c_{p2}=4190$ Дж/(кг·К), $c_{p3}=967$ Дж/(кг·К), $c_{p4}=940$ Дж/(кг·К), $\lambda_1=0,074$ Вт/(м·К), $\lambda_2=0,610$ Вт/(м·К), $\lambda_3=0,186$ Вт/(м·К), $\lambda_4=0,137$ Вт/(м·К), $\varphi_{1H}=0,043$, $\varphi_{2H}=0,009$, $\varphi_{3H}=0$, $\varphi_{4H}=0$, $\varphi_{5H}=0,948$, $E_p=39,386$ кДж/моль, $E_{52}=34,8$ кДж/моль, $E_{53}=75,42$ кДж/моль, $E_{CO}=96,37$ кДж/моль, $E_{H_2}=28,74$ кДж/моль, $E_{CH_4}=251,8$ кДж/моль, $\varepsilon_s=0,9$, $k_p=35$ 1/с, $k_{52}=396$ м/с, $k_{53}=367$ м/с, $k_{CO}=1,8 \cdot 10^9$ моль·К^{2,25}/(м³·с), $k_{H_2}=1,4 \cdot 10^{14,5}$ м^{4,5}/(моль^{1,5}·с), $k_{CH_4}=7 \cdot 10^8$ моль·К/(Дж·с), $q_{52}=2,18 \cdot 10^6$ Дж/кг, $q_{53}=3,29 \cdot 10^7$ Дж/кг, $q_{CO}=10^7$ Дж/кг, $q_p=0$, $q_{H_2}=1,15 \cdot 10^8$ Дж/кг, $q_{CH_4}=2,53 \cdot 10^7$, $s=10^4$ 1/м, $\alpha_0=\alpha_s=6$ Вт/(м²·К); $T_H=T_3=T_e=293$ К, $k_1=0,4$, $\gamma_C=0,8$, $\gamma_S=0,04$, $\gamma_g=0,16$, $\gamma_{CO}=0,04$, $\gamma_{H_2}=0,0016$, $\gamma_{CH_4}=0,0444$, $p=10^5$ Па – характерное давление, $k_H=9,33 \cdot 10^{-12}$ м² – начальная проницаемость топлива, $\lambda_{CT}=60$ Вт/(м·К) – теплопроводность стенки утилизатора.

Результаты численных расчетов и их анализ

При численном решении задачи вычислялись все характеристики сжигаемого топлива: пространственные распределения температуры, объемных долей влаги, конденсированных и газообразных продуктов пиролиза, массовых концентраций газообразных компонентов, давления, поля скорости. В результате были установлены различные режимы горения в зависимости от способа подвода тепла и окислителя к слою сжигаемого вещества.

На рис. 1 и 2 приведены изотермы для высокотемпературного режима горения, который был получен при $\Delta P=P_0-P_e=0,05$ ($P=p/p_*$ – безразмерное, p_* – характерное давление). Температура вдуваемого газа T_0 при зажигании слоя горючего снизу бралась равной 1000 К.

Приведенные рисунки показывают динамику протекания процесса горения для рассмотренного режима (изотермы на всех рисунках приведены в градусах К). Радиус колосников на рис. 1 полагался равным 0,2 м, а на рис. 2 был равен 0,16 м.

Следует заметить, что если продолжить расчет, изображенный на рис. 1, б, то после зажигания всего слоя по толщине образуется очаг горения похожий на рис. 2, а именно, вдоль боковой стенки остается слабо прогретое топливо, и можно предположить, что стенка его охлаждает.

В связи с этим, с целью оценки влияния стенки печи на процесс сжигания топлива, во втором расчете (рис. 2) радиус колосников был уменьшен. Оказалось, что при интенсивной продувке топливом

сгорает в зоне интенсивной фильтрации (над колосниками), а в застойной (пристеночной) области прогревается слабо.

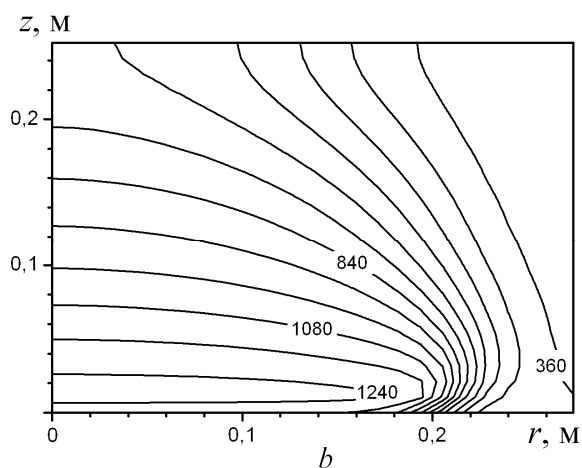
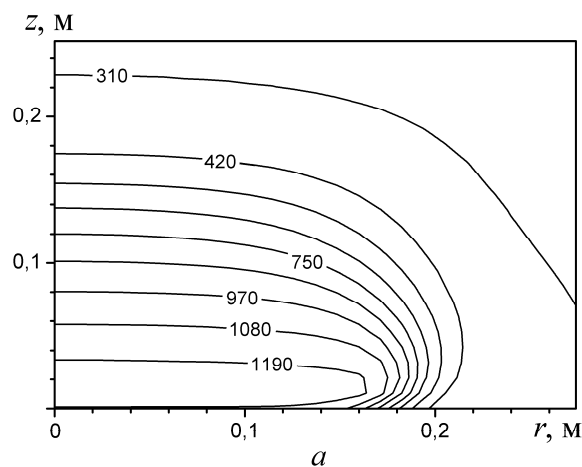


Рис. 1. Изотермы при высокотемпературном режиме сжигания слоя топлива из отходов древесины сосны для моментов времени: а) 0,22 ч, б) 0,45 ч

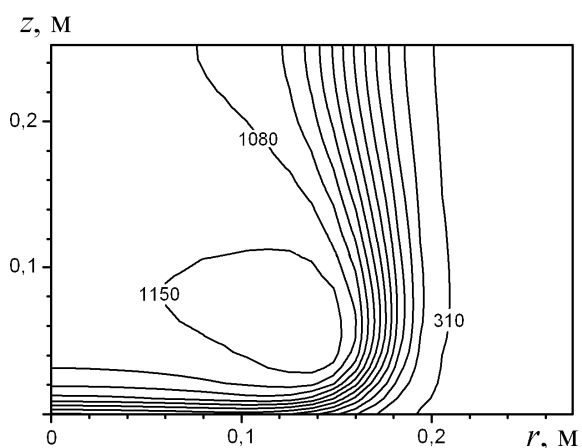


Рис. 2. Изотермы при высокотемпературном режиме сжигания слоя из отходов древесины сосны для момента времени $\tau=0,9$ ч

На рис. 3 и 4 представлены изотермы для низкотемпературного режима горения, который был по-

лучен при $T_0=800$ К и $\Delta P=0,005$, т. е. при слабом вдуве не очень горячего газа (радиус колосников для данного расчета был равен 0,4 м). В данном случае во вдуваемом газе задавалась малая концентрация окислителя (недостаточная для зажигания). Поэтому при слабой подаче окислителя зажигание происходит на верхней границе, где за счет массообмена с внешней средой окислителя больше и его достаточно для зажигания.

Из анализа рис. 3 и 4 следует, что после зажигания на тыльной стороне слоя, волна горения начинает распространяться по топливу против потока, но далеко вглубь топлива она не уходит, т. к. при заглублении окислителя становится недостаточно и горение в нижней части печи переходит в тлеющий режим.

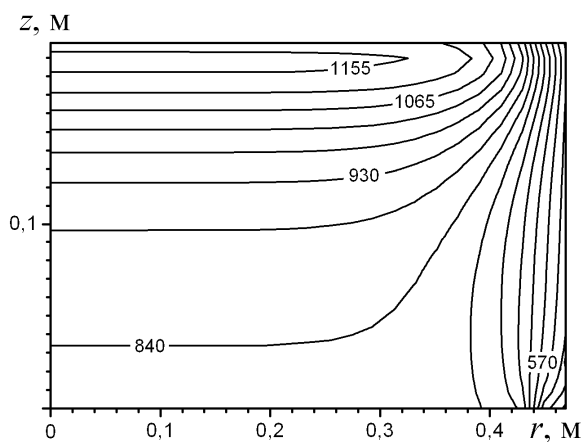


Рис. 3. Изотермы при зажигании топлива сверху для момента времени $\tau=0,37$ ч

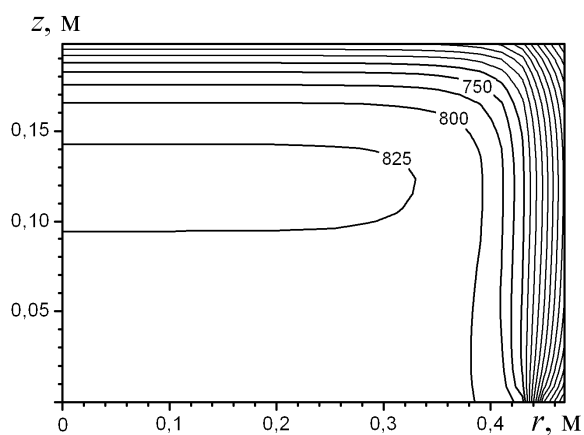


Рис. 4. Изотермы при зажигании слоя топлива сверху для момента времени $\tau=0,6$ ч

Представляет интерес режим тления, при котором происходит сушка и пиролиз твердого топлива, а затем окисление коксового остатка вплоть до золы, при этом температура в сжигаемом слое не превышает температуру вдуваемого воздуха. На рис. 5 и 6 показаны изотермы для двух моментов времени.

В данных расчетах радиус колосников полагался равным 0,26 м. Этот режим горения реализуется, например, при $P_0-P_c=0,1$ и $T_0=800$ К, т. е. при интенсивном вдуве не достаточно прогретого окисли-

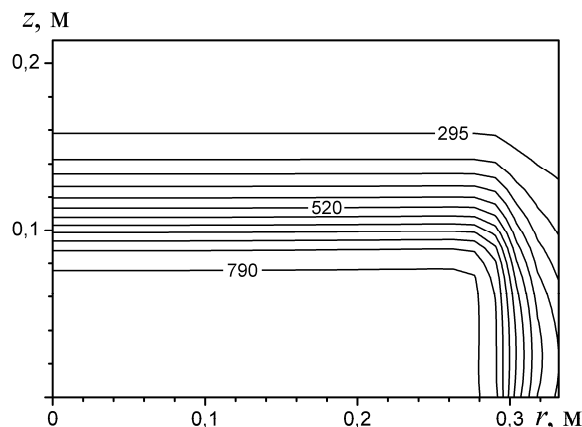


Рис. 5. Изотермы при тлеющем режиме горения для момента времени $\tau=0,33$ ч

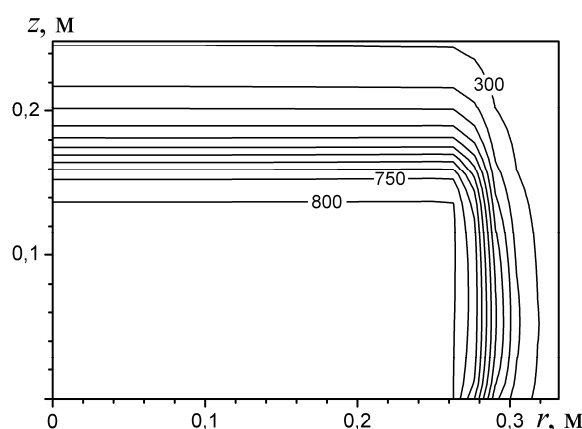


Рис. 6. Изотермы при тлеющем режиме горения для момента времени $\tau=0,48$ ч

теля. На рис. 5 и 6 приведены для данного режима горения изолинии для двух моментов времени. Видно, что весь сжигаемый слой топлива посте-

пенно прогревается до температуры дувяемого газа. Такое состояние реагирующей среды объясняется тем, что газообразные компоненты, образующиеся при пиролизе, уносятся во внешнюю среду, не вступая в реакцию. Из приведенных выше рисунков следует, что в центральной (приосевой) части печи профили температуры по координате z практически не отличаются. Необходимо отметить, что и остальные характеристики исследуемого процесса также совпадают. Резкое изменение всех параметров наблюдается на границе смешения ($r=r_0$) или вдоль боковой стенки печи, если радиус колосников совпадает с радиусом печи. Сравнение распределений температуры вдоль координаты z полученные по одномерной [6] и двумерной математической модели для приосевой области показало, что их отличие, если $R>2h$ не превышает 7 %.

Заключение

Предложена двумерная осесимметричная нестационарная математическая модель взаимодействия высокотемпературного потока газообразного окислителя с пористым твердым коксующимся топливом. Установлено, что с помощью предложенной модели, меняя скорость подачи окислителя, его температуру и концентрацию, можно моделировать или прогнозировать высоко-, низкотемпературный режимы горения и режим тления. Модель позволяет определять суммарную массу выбрасываемых β -компонентов газовой фазы, т. е. можно оценивать экологические последствия сжигаемых веществ. Если радиус колосников совпадает с радиусом печи, а высота сжигаемого слоя топлива, как минимум, в два раза меньше радиуса печи, то для определения интегральных характеристик рассмотренных выше процессов горения можно использовать одномерную математическую модель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исаков Г.Н., Субботин А.Н. Моделирование и оптимизация процессов высокотемпературной утилизации промышленных отходов // Третий Сибирский конгресс по промышленной и индустриальной математике: Сб. тез. докл. III Сибирского конгресса по промышленной и индустриальной математике (ИНПРИМ-98) (Институт математики СО РАН, Новосибирск). – Новосибирск: Изд-во Института математики СО РАН, 1998. – Ч. 5. – С. 123–124.
- Исаков Г.Н., Субботин А.Н. Тепломассообмен при высокотемпературной утилизации отходов деревообработки в вертикальном цилиндрическом реакторе // В сб.: Тепломассообмен ММФ-2000. Тепломассообмен в энергетических устройствах. IV Минский Международный форум. – Минск: ИТМО НАНБ, 2000. – Т. 10. – С. 418–427.
- Звягильская А.И., Субботин А.Н. Влияние влагосодержания и тепло- и массообмена с окружающей средой на критические условия возникновения очага низового пожара // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32. – № 5. – С. 99–106.
- Субботин А.Н. Влияние тепломассообмена на критические условия зажигания и горения торфяника // Сибирский физико-технический журнал. – 1992. – № 6. – С. 133–137.
- Исаков Г.Н. Тепломассоперенос и воспламенение в гетерогенных системах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 142 с.
- Исаков Г.Н., Субботин А.Н. Воспламенение и горение пористого продуваемого слоя отходов деревообработки при различных условиях тепломассообмена // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 5. – С. 130–135.
- Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н. и др. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. – Томск: Изд-во ТГУ, 2004. – 319 с.
- Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
- Исаков Г.Н., Касьянов Г.С. Влияние процессов испарения на зажигание влажной древесины в потоке газообразного окислителя // Физика горения и взрыва. – 1986. – Т. 22. – № 2. – С. 17–24.
- Щетинков Е.С. Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 739 с.
- Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. К.П. Мищенко и А.А. Равделя. – Л.: Химия, 1967. – 182 с.
- Померанцев В.В. и др. Основы практической теории горения. – Л.: Энергия, 1986. – 309 с.
- Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренина, Н.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – Т. 2. – 896 с.

Поступила 18.03.2008 г.