

## ТЕПЛОМАССОБМЕН В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБОТКИ И УГЛЕДОБЫЧИ

А.Н. Субботин

*Томский государственный университет, Томск, Россия*

Представлена двумерная осесимметричная нестационарная математическая модель взаимодействия пористого твердого горючего (лесные горючие материалы, отходы деревообработки) с высокочувствительным потоком газообразного окислителя. Математическая модель учитывает сушку и пиролиз твердого горючего, гетерогенную реакцию окисления кокса, гомогенные реакции окисления водорода, метана и оксида углерода. Численными расчетами установлено существенное влияние параметров вдуваемого газа-окислителя, влагосодержания и пористости горючего на формирование режимов физико-химических превращений и их распространения в виде волны горения. Определяемые при этом концентрации газообразных компонентов, образующиеся при горении, позволяют выбирать экологически безопасные режимы горения и использовать их при проектировании реакторов-утилизаторов цилиндрического типа.

### Введение

Тепломассообменные процессы при физико-химических превращениях в пористом твердом горючем несут основную ответственность за образование в продуктах сгорания токсических 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

Предполагается, что твердое пористое топливо (отходы деревообработки) помещено в расположенную вертикально цилиндрическую печь, высота слоя топлива  $h$ , радиус основания  $R$ . После загрузки начинается продувка печи высокочувствительным газовым потоком.

Будем считать, что процессы сушки и пиролиза твердого горючего описываются уравнениями вида:

$$\begin{aligned} v_2 M_2 &\rightarrow v'_2 M'_2 - q_{2S}, \\ v_1 M_1 &\rightarrow v'_2 M_3 + v'_4 M_4 + \sum_{\alpha=2}^6 v'_{5\alpha} M_{5\alpha} + q_P. \end{aligned}$$

Первое уравнение описывает процесс испарения воды ( $v_2 M_2$ ) и превращения ее в пар ( $v'_2 M'_2$ ), а второе уравнение процесс пиролиза твердого топлива. Твердое горючее разлагается на конденсированные и газообразные продукты пиролиза.

Кроме данных реакций учитываем гетерогенную реакцию горения кокса и гомогенные реакции окисления оксида углерода, водорода и метана:

$$\begin{aligned}
C + O_2 &= CO_2 + q_{2S}, \\
2CO + O_2 &= 2CO_2 + q_{CO}, \\
2H_2 + O_2 &= 2H_2O + q_{H_2}, \\
CH_4 + 2O_2 &= CO_2 + 2H_2O + q_{CH_4}.
\end{aligned}$$

В силу того, что физическая задача имеет ось симметрии, математическую постановку запишем в цилиндрической системе координат, тогда получим следующую систему уравнений:

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_p, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2S}, \quad \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_p - R_{3S}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_s R_p, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 \varphi_5) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_5 \varphi_5 u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 \varphi_5 v) = \alpha_g R_p + R_{2S} + R_{3S}, \quad \sum_{j=1}^5 \varphi_j = 1, \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 \varphi_5 c_\alpha) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_5 \varphi_5 u c_\alpha) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 \varphi_5 v c_\alpha) &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} \right) + \\
\frac{\partial}{\partial z} \left( \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right) + R_{5\alpha} + R_{5S\alpha}, \quad \alpha = \overline{1, 6}, \quad \sum_{\alpha=1}^7 c_\alpha &= 1, \quad (3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{j=1}^5 \rho_j \varphi_j c_{pj} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_5 \varphi_5 c_{p5} \left( u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \\
\frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{CO} R_{CO} + q_{H_2} R_{H_2} + q_{CH_4} R_{CH_4} + q_{3S} R_{3S} - q_{2S} R_{2S}, \quad (4)
\end{aligned}$$

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad v = -\frac{K}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial z} - \rho_5 g \right), \quad p = \frac{\rho_5 R T}{M}, \quad M = 1 / \sum_{j=1}^7 \frac{c_j}{M_{5j}}. \quad (5)$$

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 ( $\alpha=1$  – кислорода,  $\alpha=2$  – оксида углерода,  $\alpha=3$  – диоксида углерода,  $\alpha=4$  – водорода,  $\alpha=5$  – метана,  $\alpha=6$  – 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:

$$t = 0: \quad \varphi_j = \varphi_{jH}, \quad j = \overline{1, 4}, \quad c_\alpha = c_{\alpha H}, \quad \alpha = \overline{1, 6}, \quad \rho_5 = \rho_{5H}, \quad T = T_H; \quad (6)$$

$$r = 0: \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0;$$

$$r = R: \quad \lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_2 (T - T_s) + q_R, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0; \quad (7)$$

$$z = 0: \quad \left. \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right|_{r \geq r_0} = 0, \quad \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \left. \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right|_{r < r_0} = \frac{\alpha_1}{c_{p5}} (c_\alpha - c_{\alpha 0}), \quad \left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{r \geq r_0} = \rho_5 g,$$

$$p|_{r<r_0} = p_0, \quad \lambda_s \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{r \geq r_0} = \alpha_2 (T - T_s), \quad \lambda_s \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{r < r_0} = \alpha_1 (T - T_0), \quad (8)$$

$$z = h: \quad p = p_e, \quad \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = \frac{\alpha_1}{c_{p5}} (c_\alpha - c_{ae}), \quad \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_1 (T - T_e).$$

Где индексы  $0, e, H$  приписываются величинам, характеризующим источник зажигания, внешнюю среду и слой горючего в начальный момент времени соответственно;  $s$  – удельная поверхность пор;  $T_s, T_e$  – температура у боковой поверхности и окружающей среды над печью;  $u$  и  $v$  – скорость фильтрации газообразных продуктов в направлении осей координат  $r$  и  $z$ ;  $\alpha_c = v'_3 M_3 / v_1 M_1$ ,  $\alpha_s = v'_4 M_4 / v_1 M_1$ ,  $\alpha_g = \sum_{j=2}^4 v'_{5j} M_{5j} / v_1 M_1$  – массовые доли кокса, золы и газовой фазы, образующиеся при пиролизе топлива;  $\lambda = \lambda_s + \lambda_R$ ,  $\lambda_R = 16 \sigma T^3 / s$  – коэффициент лучистой теплопроводности;  $\lambda_s = \sum_{j=1}^5 \lambda_j \varphi_j$  – коэффициент теплопроводности многофазной среды;  $\varphi_j, \rho_j, c_{pj}$  ( $j = 1, \dots, 5$ ) – объемные доли, истинные плотности и удельные теплоемкости топлива, воды, кокса, золы и газовой фазы соответственно;  $K, \mu$  – коэффициенты проницаемости и вязкости;  $c_{p5} = \sum_{\alpha=1}^4 c_{p5\alpha} c_\alpha$ ,  $\lambda_5 = \sum_{\alpha=1}^4 \lambda_{5\alpha} c_\alpha$  – удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности газовой фазы в порах твердого топлива;  $R_p, R_{2s}, R_{3s}, R_{CO}, R_{H_2}, R_{CH_4}$  – массовые скорости разложения топлива, испарения влаги, окисления кокса, оксида углерода, водорода и метана;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи, характеризующие теплообмен топлива с внешней средой;  $v_1, v'_3, v'_4, v'_{5j}$  – стехиометрические коэффициенты;  $t$  – время;  $r_0$  – радиус колосников;  $p$  – давление газообразных продуктов в порах;  $E_{3s}, k_{3s}, E_{2s}, k_{2s}, E_p, k_p, E_{CO}, k_{CO}, E_{H_2}, k_{H_2}, E_{CH_4}, k_{CH_4}$  – энергии активации и предэкспоненциальные множители гетерогенных реакций горения кокса и испарения влаги, а также гомогенных реакций разложения горючего и окисления оксида углерода, водорода и метана;  $M_C, M_{CO}, M_{O_2}, M_{H_2}, M_{CH_4}, M_{H_2O}$  – атомарная масса углерода и молекулярные массы оксида углерода, кислорода, водорода, метана и водяного пара;  $v_w$  – скорость уноса газообразных продуктов из слоя топлива через пористую поверхность;  $q_{2s}, q_{3s}, q_{CO}, q_{H_2}, q_{CH_4}$  – тепловые эффекты реакций испарения влаги, окисления кокса, оксида углерода, водорода и метана;  $\alpha_1 = \alpha_2 [1 - k_1 (\rho_5 \varphi_5 v)_w]$  – коэффициент теплоотдачи для пористой поверхности,  $k_1$  – эмпирическая константа;  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи на непроницаемой стенке;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $D_\alpha$  – эффективный коэффициент диффузии  $\alpha$  – компоненты;  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$  – массовые концентрации кислорода, оксида углерода, диоксида углерода, водорода, метана и водяного пара соответственно,  $q_R = \varepsilon_s \sigma T^4$  – радиационный поток от стенки печи в окружающую среду,  $p_0$  и  $p_e$  – давление на нижнем и верхнем основаниях цилиндрической печи. Кроме того, в уравнениях (1) – (4) введены краткие обозначения скоростей реакций

$$R_{51} = - \left( \frac{M_{O_2}}{2M_{CO}} \right) R_{CO} - \left( \frac{2M_{O_2}}{M_{CH_4}} \right) R_{CH_4} - \left( \frac{M_{O_2}}{M_{H_2}} \right) R_{H_2}, \quad R_{52} = \alpha_{CO} R_p - R_{CO}, \quad R_{5s2} = 0,$$

$$R_{53} = \alpha_{CO_2} R_p + \left( \frac{M_{CO_2}}{M_{CO}} \right) R_{CO} + \left( \frac{M_{CO_2}}{M_{CH_4}} \right) R_{CH_4}, \quad R_{5S3} = \left( \frac{M_{CO_2}}{M_C} \right) R_{3S}, \quad R_{5S4} = 0,$$

$$R_{54} = \alpha_{H_2} R_n - R_{H_2}, \quad R_{55} = \alpha_{CH_4} R_p - R_{CH_4}, \quad R_{5S5} = 0, \quad R_{56} = \left( \frac{2M_{H_2O}}{M_{CH_4}} \right) R_{CH_4} + \left( \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}} \right) R_{H_2},$$

$$R_{5S6} = R_{2S}, \quad R_{CH_4} = M_{CH_4} k_{CH_4} \left( \frac{\rho_5 R}{M} \right) \left( \frac{C_1 M}{M_{O_2}} \right)^{1,5} \left( \frac{C_5 M}{M_{CH_4}} \right)^{-0,5} \exp\left( -\frac{E_{CH_4}}{RT} \right),$$

$$R_p = k_p \rho_1 \varphi_1 \exp\left( -\frac{E_p}{RT} \right), \quad R_{CO} = M_{CO} T^{-2,25} k_{CO} \left( \frac{c_1 M}{M_{O_2}} \right)^{0,25} \left( \frac{c_2 M}{M_{CO}} \right) \exp\left( -\frac{E_{CO}}{RT} \right),$$

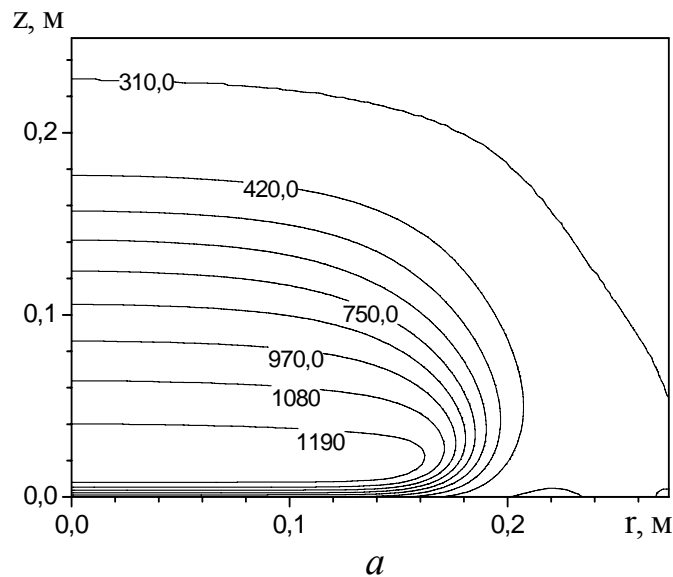
$$R_{2S} = k_{S2} s \rho_2 \varphi_2 \exp\left( -\frac{E_{2S}}{RT} \right), \quad R_{3S} = \left( \frac{M_C}{M_{O_2}} \right) s \rho_5 \varphi_5 c_1 k_{S3} \varphi_3 \exp\left( -\frac{E_{3S}}{RT} \right),$$

$$R_{H_2} = M_{H_2} k_{H_2} \left( \frac{\rho_5 C_1}{M_{O_2}} \right) \left( \frac{\rho_5 C_4}{M_{H_2}} \right)^{1,5} \exp\left( -\frac{E_{H_2}}{RT} \right).$$

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].

### 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



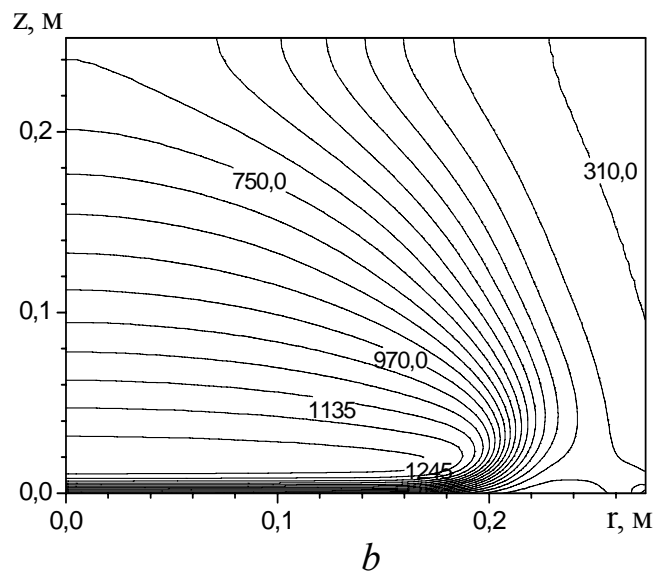


Рис. 1. Изотермы при высокотемпературном режиме сжигания слоя из отходов древесины сосны для двух моментов времени: *a* –  $t=13.2$  мин , *b* –  $t=27.0$  мин

газообразных компонентов, давления, поля скорости. В результате были установлены различные режимы горения в зависимости от способа подвода тепла и окислителя к слою горючего вещества. На рисунках 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), а температура вдуваемого газа  $T_0$  при зажигании слоя

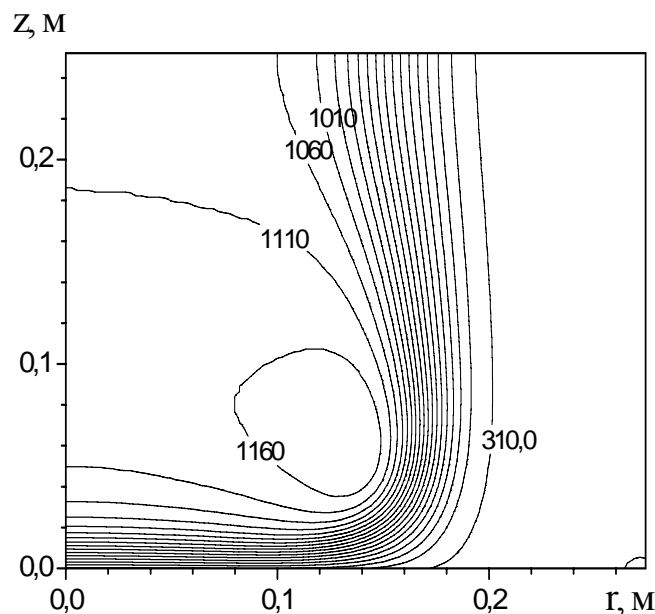


Рис. 2. Изотермы при высокотемпературном режиме сжигания слоя из отходов древесины сосны для момента времени  $t=54.7$  мин

горючего снизу была равна  $1000\text{ K}$ . Приведенные рисунки показывают динамику протекания процесса горения для рассмотренного режима (следует отметить, что изотермы на всех рисунках приведены в градусах  $K$ ). Радиус колосников на рисунке 1 полагался равным  $0.2\text{ м}$ , а на рисунке 2 был равен  $0.16\text{ м}$ . Следует заметить, что если продолжить расчет, изображенный на рисунке 1б, то после зажигания всего слоя по толщине образуется очаг горения похожий на рисунок 2, а именно, вдоль боковой стенки

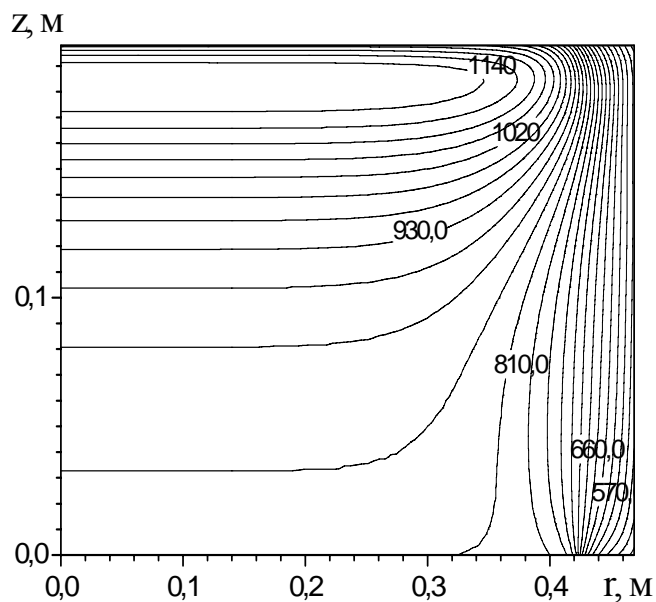


Рис. 3. Изотермы при зажигании слоя топлива сверху для момента времени  $t = 22.1\text{ мин}$

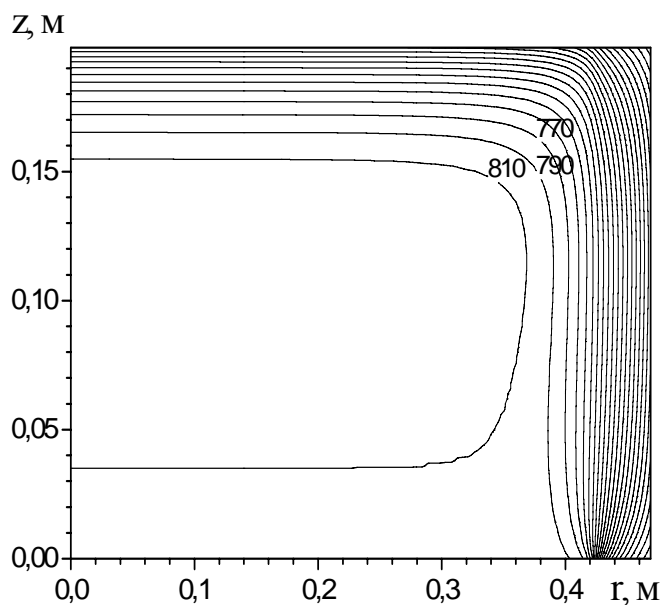


Рис. 4. Изотермы при зажигании слоя топлива сверху для момента времени  $t = 36.6\text{ мин}$

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

На рисунках 3 и 4 представлены изотермы для низкотемпературного режима горения, который был получен при  $T_0 = 800\text{ K}$  и  $\Delta P = 0.005$ , т.е. при слабом вдуве не

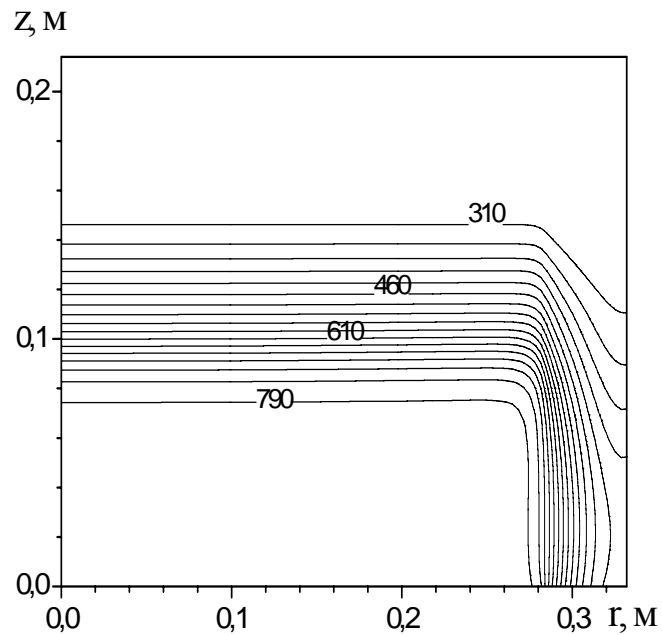


Рис.5. Изотермы при тлеющем режиме горения для момента времени  $t=19.9$  мин

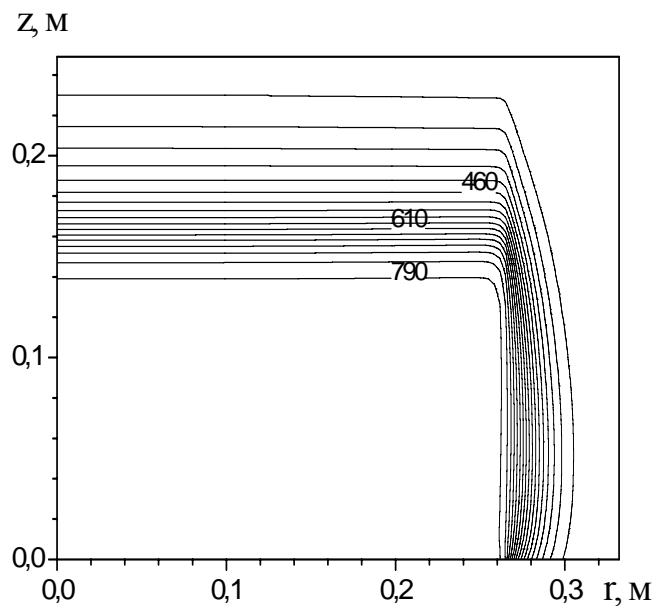


Рис.6. Изотермы при тлеющем режиме горения для момента времени  $t=28.8$  мин

очень горячего газа (радиус колосников для данного расчета был равен 0.4 м). Следует заметить, что в этом случае во вдуваемом газе концентрация окислителя мала (недостаточна для зажигания), поэтому при слабой продувке зажигание происходит на верхней границе, где за счет массообмена с внешней средой окислителя становится больше, достаточным для зажигания.

Из анализа рисунков 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.

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 рисунках 5 и 6 показаны изотермы для двух моментов времени. При проведении расчетов в данном случае радиус колосников полагался равным 0.26 м. Данный режим реализуется, например, при  $P_0 - P_e = 0.1$  и  $T_0 = 800 K$ , т. е. в случае интенсивного вдува не очень горячего воздуха. На рис.5 и рис. 6 приведены для данного режима изолинии для двух моментов времени. Видно, что весь сжигаемый слой топлива постепенно прогревается до температуры вдуваемого газа. Такое поведение реагирующей среды объясняется тем, что образующиеся при пиролизе газообразные компоненты выбрасываются во внешнюю среду, не успев прореагировать.

### **Заключение**

С помощью предложенной математической модели было установлено, что, меняя скорость подачи окислителя, его температуру и концентрацию, можно моделировать или прогнозировать различные режимы горения: высокотемпературный, низкотемпературный, режим тления. При этом рассматриваемая модель позволяет определять суммарную массу выбрасываемых  $\alpha$  – компонентов газовой фазы. Если радиус печи  $R$  мало отличается от радиуса колосников  $r_0$ , а высота сжигаемого слоя топлива, по крайней мере, в два раза меньше радиуса печи, то для определения интегральных характеристик явления можно использовать одномерную математическую модель [6] рассмотренных выше процессов горения.

### **Литература**

- [1] Исаков Г.Н., Субботин А.Н. Моделирование и оптимизация процессов высокотемпературной утилизации промышленных отходов. Третий сибирский конгресс по промышленной и индустриальной математике. Сборник тезисов докладов третьего 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.
- [2] Исаков Г.Н., Субботин А.Н. Тепломассообмен при высокотемпературной утилизации отходов деревообработки в вертикальном цилиндрическом реакторе Тепломассообмен ММФ-2000 // Тепломассообмен в энергетических устройствах. IV Минский Международный форум. Минск. ИТМО НАНБ. 2000. Т. 10. с. 418–427.
- [3] 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.
- [4] Субботин А.Н. Влияние тепломассообмена на критические условия зажигания и горения торфяника. Сибирский физико-технический журнал. 1992. № 6. с. 133–137.
- [5] Исаков Г.Н. Тепломассоперенос и воспламенение в гетерогенных системах. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 1999. 142 с.
- [6] Исаков Г.Н., Субботин А.Н. Воспламенение и горение пористого продуваемого слоя отходов деревообработки при различных условиях тепломассообмена. Известия



- Томского политехнического университета. Томск. Изд-во ТПУ. 2006. Т. 309. № 5 с. 130–135.
- [7] Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н., Субботин А.Н., Якимов А.С. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск. Изд-во ТГУ. 2004. 319 с.
- [8] Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Москва. Наука. 1972. 720 с.
- [9] 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.
- [10] Щетинков Е.С. Физика горения газов. Москва. Наука. 1965. 739 с.
- [11] Краткий справочник физико химических величин. Под ред. Мищенко К.П. и Равделя А.А. Ленинград. Химия. 1967. 182 с.
- [12] Померанцев В.В. и др. Основы практической теории горения. Ленинград. Энергия. 1986. 309 с.
- [13] Теплотехнический справочник. Под ред. В.Н. Юренева, Н.Д. Лебедева. Москва. Энергия. 1976. Т. 2. 896 с.