

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жидкие и твердые ракетные топлива. – Сб. перев. с англ. / Под ред. Ю.Х. Шаулова. – М.: Иностранная литература, 1959. – 436 с.
2. Исследования ракетных двигателей на твердом топливе / Пер. с англ. Под ред. И.Н. Козловского. – М.: Иностранная литература, 1963. – 440 с.
3. Липанов А.М. Об одном классе прогрессивно горящих конструктивных форм // Физика горения и взрыва. – 1997. – Т. 33. – № 4. – С. 84–90.
4. Denison M.R., Baum E.A. A simplified model of unstable burning in solid propellants // ARS Journal. – 1961. – V. 31. – P. 1112–1122.
5. Сабденков К.О., Миньков Л.Л. Особенности горения ракетного топлива при не равном единиче числе Льюиса в газовой фазе // Инженерно-физический журнал. – 2001. – Т. 74. – № 6. – С. 61–72.
6. Пигфорд Р., Шервуд Т., Уилки Ч. Массопередача. – М.: Химия, 1982. – 695 с.
7. Новожилов Б.В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. – М.: Наука, 1973. – 176 с.
8. Сабденков К.О. Различные режимы горения твердого ракетного топлива, распадающегося на газ по механизму пиролиза // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 3. – С. 120–125.
9. Новожилов Б.В. Об акустическом резонансе при горении порохов // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 36. – № 1. – С. 5–11.

УДК 536.46+533.6

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ ПОРИСТОГО ПРОДУВАЕМОГО СЛОЯ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБОТКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛОМАССОБМЕНА

Г.Н. Исаков, А.Н. Субботин

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

Показано, что в зависимости от создаваемых условий теплообмена в пористом слое древесных отходов реализуются низко- и высокотемпературные режимы горения, и режим тления, при котором основная масса газообразных компонентов, образующихся при пиролизе, выбрасывается в атмосферу, не сгорая. С помощью математической модели, рассмотренной в работе, можно прогнозировать режимы сжигания пористых, коксующихся отходов и определять состав образующихся при этом газообразных продуктов.

Самым распространенным способом утилизации строительных отходов является их сжигание в волне горения [1, 2]. Проблема утилизации отходов с оптимальными экологическими последствиями является актуальной и сводится к выбору теплообменных режимов воздействия на топливо, чтобы количество вредных газов в продуктах сгорания было минимальным.

В данной работе рассматриваются процессы утилизации отходов деревообработки в вертикальной цилиндрической печи заданных размеров.

Физико-математическая модель. Предположим, что твердое пористое топливо (отходы деревообработки) помещено в расположенную вертикально цилиндрическую печь. Обозначим высоту слоя топлива через h . После загрузки осуществляется продувка печи высокоэнтальпийным газовым потоком.

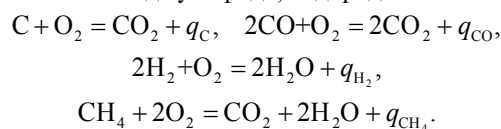
Будем считать, что процессы сушки и пиролиза твердого горючего описываются уравнениями вида:

$$v_2 M_2 \rightarrow v_2' M_2' - q_L,$$

$$v_1 M_1 \rightarrow v_3' M_3 + v_4' M_4 + \sum_{\alpha=2}^6 v_{5\alpha}' M_{5\alpha} + q_P.$$

Здесь $v_1 M_1$ – масса древесных отходов, $v_2 M_2$ – воды, $v_2' M_2'$ – водяного пара; $v_3' M_3$ – кокса, $v_4' M_4$ – золы, $v_{5\alpha}' M_{5\alpha}$ – α -компоненты газовой фазы, образующейся при пиролизе древесины.

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



В приведенных выше формулах $q_L, q_P, q_C, q_{CO}, q_{H_2}, q_{CH_4}$ – тепловые эффекты реакций испарения воды, пиролиза древесины, окисления кокса, оксида углерода, водорода и метана соответственно.

В силу цилиндрической симметрии физической задачи математическая модель, описывающая данный процесс, была записана в цилиндрической системе координат. Теплообмен на боковой поверхности на входном и выходном сечении рассматривались с использованием граничных условий третьего рода. Предполагая, что изменение искомых функций по радиусу значительно меньше, чем вдоль оси печи уравнения осреднялись по радиусу, в результате была получена следующая система уравнений:

- сохранения массы исходного конденсированного вещества

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_p, \quad R_p = k_p \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_p}{RT_s}\right), \quad (1)$$

- сохранения массы воды в связанном состоянии

$$\rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_L, \quad R_L = k_L \rho_2 \varphi_2 \exp\left(-\frac{E_L}{RT_S}\right), \quad (2)$$

- сохранения массы кокса

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_C R_p - sR_C,$$

$$R_C = \frac{M_C}{M_{O_2}} \rho_3 \varphi_3 c_1 k_C \varphi_3 \exp\left(-\frac{E_C}{RT_S}\right), \quad (3)$$

- сохранения массы золы

$$\rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_S R_p, \quad \alpha_C = \frac{v'_3 M_3}{v_1 M_1}, \quad \alpha_S = \frac{v'_4 M_4}{v_1 M_1}, \quad (4)$$

- неразрывности газовой фазы

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 \varphi_5) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 \varphi_5 v) = \alpha_G R_p + R_L + sR_C,$$

$$\alpha_G = \sum_{\alpha=2}^5 \frac{v_{5\alpha} M_{5\alpha}}{v_1 M_1}, \quad (5)$$

- сохранения массы α -компоненты газовой фазы

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 \varphi_5 c_\alpha) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 \varphi_5 c_\alpha v) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right) + R_{5\alpha} + sR_{5\alpha C},$$

$$\alpha = \overline{1, 6}, \quad \sum_{\alpha=1}^7 c_\alpha = 1, \quad (6)$$

- сохранения энергии газовой и конденсированной фазы

$$\rho_5 \varphi_5 c_{p5} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_5 \varphi_5 + \lambda_R \right) \frac{\partial T}{\partial z} +$$

$$+ q_{CO} R_{CO} + q_{H_2} R_{H_2} + q_{CH_4} R_{CH_4} - A_S (T - T_S) -$$

$$- \frac{2}{r_0} \alpha_1 \varphi_5 (T - T_S), \quad \lambda_5 = \sum_{\alpha=1}^7 \lambda_{5\alpha} c_\alpha, \quad \lambda_R = \frac{16 \sigma T^3}{s}, \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi} \frac{\partial T_S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial z} \right) + q_p R_p + q_C s R_C -$$

$$- q_L R_L + A_S (T - T_S) + \frac{2}{r_0} \alpha_1 \varphi_5 (T - T_S) -$$

$$- \frac{2r_1}{r_0^2} [\alpha_2 (T_S - T_E) + q_R],$$

$$\lambda_S = \sum_{i=0}^4 \lambda_i \varphi_i, \quad c_{p5} = \sum_{\alpha=1}^7 c_{p\alpha} c_\alpha, \quad (8)$$

- движения газа в порах (в форме квадратичного закона фильтрации) и уравнение состояния

$$v = - \frac{k}{\mu + k \beta \rho_5 |v|} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho_5 g \right), \quad p = \frac{\rho_5 RT}{M_5},$$

$$M_5 = 1 / \sum_{\alpha=1}^7 \frac{c_\alpha}{M_{5\alpha}}. \quad (9)$$

Система уравнений (1–9) решалась при следующих краевых условиях:

$$t = 0: \begin{cases} \varphi_i = \varphi_{iH}, \quad i = \overline{1, 4}, \quad c_\alpha = c_{\alpha H}, \quad \alpha = \overline{1, 6}, \\ T = T_S = T_H, \quad p = p_H, \end{cases} \quad (10)$$

$$z = 0: T = T_E, \quad p = p_E, \quad \lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial z} = \alpha_1 (T_S - T_E), \quad c_\alpha = c_{\alpha E},$$

$$z = h: \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad p = p_H, \quad \lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial z} = \alpha_1 (T_S - T). \quad (11)$$

В уравнениях (6–8) введены краткие обозначения скоростей реакций

$$R_{CO} = M_{CO} T^{-2,25} k_{CO} \left(\frac{c_1 M_5}{M_{O_2}} \right)^{0,25} \left(\frac{c_2 M_5}{M_{CO}} \right) \exp\left(-\frac{E_{CO}}{RT}\right),$$

$$sR_{51C} = -\frac{M_{O_2}}{M_C} sR_C, \quad R_{52C} = 0,$$

$$R_{H_2} = M_{H_2} k_{H_2} \frac{\rho_5 c_1}{M_{O_2}} \left(\frac{\rho_5 c_4}{M_{H_2}} \right)^{1,5} \exp\left(-\frac{E_{H_2}}{RT}\right),$$

$$R_{51} = -\frac{M_{O_2}}{2M_{CO}} R_{CO} - \frac{2M_{O_2}}{M_{CH_4}} R_{CH_4} - \frac{M_{O_2}}{M_{H_2}} R_{H_2},$$

$$R_{CH_4} = M_{CH_4} k_{CH_4} \frac{\rho_5 R}{M} \left(\frac{c_1 M_5}{M_{O_2}} \right)^{1,5} \left(\frac{c_5 M_5}{M_{CH_4}} \right)^{-0,5} \exp\left(-\frac{E_{CH_4}}{RT}\right),$$

$$R_{52} = \alpha_{CO} R_n - R_{CO}, \quad R_{54C} = 0,$$

$$R_{53} = \alpha_{CO_2} R_n + \frac{M_{CO_2}}{M_{CO}} R_{CO} + \frac{M_{CO_2}}{M_{CH_4}} R_{CH_4},$$

$$sR_{53C} = \frac{M_{CO_2}}{M_C} sR_C, \quad R_{54} = \alpha_{H_2} R_p - R_{H_2},$$

$$R_{55} = \alpha_{CH_4} R_p - R_{CH_4}, \quad R_{55C} = 0,$$

$$R_{56} = \frac{2M_{H_2O}}{M_{CH_4}} R_{CH_4} + \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}} R_{H_2}, \quad sR_{56C} = R_L.$$

Здесь v – скорость фильтрации; $\alpha_G, \alpha_C, \alpha_S$ – доля газообразных продуктов, кокса и золы при пиролизе; M_5 – молекулярная масса газовой фазы; индекс 5 приписывается величинам, характеризующим газовую, а c – конденсированную фазу; k – коэффициент проницаемости пористого слоя; T_S, T – температура конденсированной фазы и газа в порах; $E_p, E_L, E_C, E_{CO}, E_{H_2}, E_{CH_4}, k_p, k_L, k_C, k_{CO}, k_{H_2}, k_{CH_4}$ – энергии активации и предэкспоненциальные множители реакций пиролиза древесины, испарения воды гетерогенной и гомогенных реакций окисления C, CO, H₂ и CH₄ соответственно; R – универсальная газовая постоянная; $D_\alpha, \lambda_{5\alpha}, c_\alpha, M_{5\alpha}$ – коэффициент молекулярной диффузии, теплопроводности, массовая концентрация и молекулярная масса α -компоненты, параметр с индексом $\alpha=1$ соответствует O₂, $\alpha=2$ – CO, $\alpha=3$ – CO₂, $\alpha=4$ – H₂, $\alpha=5$ – CH₄, $\alpha=6$ – H₂O, $\alpha=7$ – N₂; p – давление газообразных продуктов в порах; $P=p/p_H$ – безразмерное давление; p_H – характерное давление; $A_S = \alpha_1 s$ – объемный коэффициент теплоотдачи; s – удельная поверхность пор; $q_R = \varepsilon_s \sigma T_S^4$ – радиационный поток от внешней стенки печи в окружающую среду; ε_s – степень черноты; t – время; $y = z/l^*$ – безразмерная пространственная переменная, z – размерная

пространственная переменная, направленная по оси печи; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи, характеризующие конвективный теплообмен во входном (выходном) сечении и на внешней стенке печи;

$l_* = \sqrt{(\lambda_1 R T_*^2 \exp(E_{CO} / RT_*) / (\rho_1 k_{CO} q_{CO} E_{CO}))}$ – масштаб длины; T_* – характерная температура; $\varphi_0 = (r_1^2 - r_0^2) / r_0^2$, r_1 – наружный, r_0 – внутренний радиус печи; $\rho_0, c_{p0}, \lambda_0$ – плотность, теплоемкость и теплопроводность стенки печи; $\rho_i, c_{pi}, \lambda_i, \varphi_i$ – плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности и объемная доля древесины ($i=1$), воды ($i=2$), кокса ($i=3$), золы ($i=4$) и газовой фазы ($i=5$); $\lambda_s, \lambda_R, \lambda_S$ – коэффициенты молекулярной и лучистой теплопроводности газовой фазы и коэффициент теплопроводности конденсированной фазы; σ – постоянная Стефана-Больцмана; μ – коэффициент динамической вязкости; β – константа в квадратичном законе фильтрации; g – ускорение свободного падения; $u = v/v_*$ – безразмерная скорость, масштаб скорости $v_* = 0,797 \cdot 10^{-3}$ м/с; масштаб длины $l_* = 0,95 \cdot 10^{-3}$ м.

Краевая задача (1–11) решалась численно. Технология решения задачи вида (1–11) с использованием итерационно-интерполяционного метода [3]

приведена в работах [4, 5]. Кинетические параметры процессов сушки, пиролиза и горения, а также теплофизические коэффициенты газообразных компонентов и конденсированных фракций были взяты из работ [6–13].

Результаты расчетов и их анализ. При численном решении задачи были найдены низко- и высокотемпературный режимы горения, и режим тления. Эти режимы зависят от условий теплообмена пористого слоя с продуваемым через него окислителем. Низкотемпературный режим реализуется при слабом вдуве не очень горячего окислителя. Профили температуры и объемной доли влаги при низкотемпературном горении для шести моментов времени, представлены на рис. 1. Данный режим горения был получен при $T_E = 800$ К и $\Delta P = P_E - P_H = 0,005$ ($\Delta p = 500$ Па). Здесь кривые 1–3 рис. 1, а, соответствуют процессу сушки, а кривые 4–6 процессу образования и распространения волны горения. Из данного рисунка следует, что при рассматриваемых условиях зажигание происходит на тыльной стороне слоя, а затем волна горения распространяется против потока. На рис. 1, б, приведены профили объемных долей воды для тех же моментов времени.

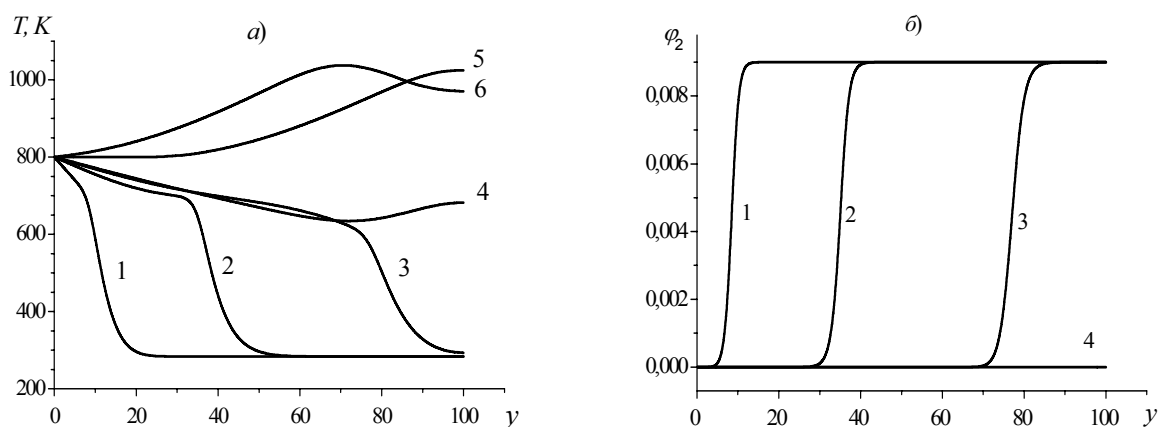


Рис. 1. Профили температуры: а) газовой фазы и б) объемной доли влаги в моменты времени t , с: 1) 4,8; 2) 56,9; 3) 145,1; 4) 311,7; 5) 390,3; 6) 482,1

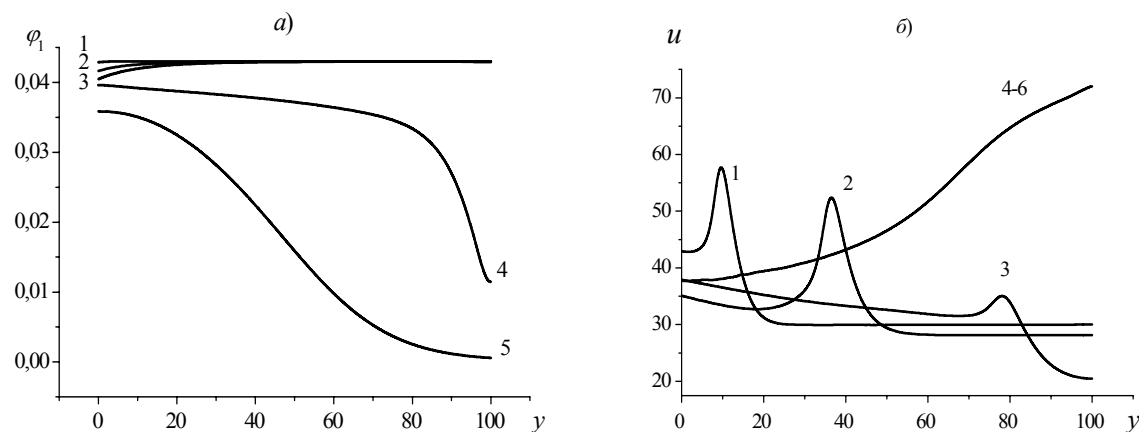


Рис. 2. Профили: а) объемной доли отходов деревообработки и б) скорости фильтрации в моменты времени t , соответствующие рис. 1

Анализируя данный рисунок, видим, что к моменту времени соответствующему кривой 4 рис. 1, *а*, объемная доля влаги равна нулю во всем объеме, после чего происходит заживание.

Профили объемной доли исходного конденсированного вещества приведены на рис. 2, *а*, который подтверждает описанный выше механизм заживания и горения отходов деревообработки. Здесь кривые 1–5 соответствуют кривым 1, 3–6, рис. 1, *а*. Видим, что топливо загорается с тыльной стороны ($z=h$), и горение распространяется в направлении, противоположном направлению вдува горячего окислителя. На рис. 2, *б*, изображены профили скорости фильтрации для моментов времени, соответствующих кривым 1–3 и 6, рис. 1, *а*. В зоне испарения скорость фильтрации имеет локальный максимум (кривые 1–3), а затем после высушивания слоя профиль скорости становится монотонно возрастающим (кривая 4, рис. 2, *б*).

Из анализа кривых 1–4, рис. 3, *а*, которые соответствуют кривым 1–4, рис. 1, *а*, можно заключить, что к моменту заживания в порах топлива пары воды отсутствуют.

На рис. 3, *б* представлены профили массовой концентрации в моменты времени, соответствующие кривым 1, 3 и 6, рис. 1, *а*, т. е. кривые 1 и 2 соответствуют процессу сушки, а кривая 3 – моменту распространения волны низкотемпературного горения. При перепаде давления $\Delta P=0,005$ и температуре $T_E=1000$ К реализуется также низкотемпературный режим горения. Но в отличие от предыдущего низкотемпературного режима волна горения распространяется в направлении движения потока окислителя.

Высокотемпературный режим горения реализуется при более высокой скорости продувки, например, взяв $\Delta P=0,05$, а температуру вдуваемого окислителя $T_E=1000$ К. На рис. 4, *а*, приведено пространственное распределение температуры при данном режиме горения для четырех моментов времени: прогрева (кривая 1), образования (кривая 2) и распространения (кривые 3, 4) волны горения. Пространственные распределения перепада давления для данного режима горения изображены на рис. 4, *б*. Здесь кривая 1 соответствует стадии прогрева, 2 – моменту образования, 3 – началу распространения волны горения.

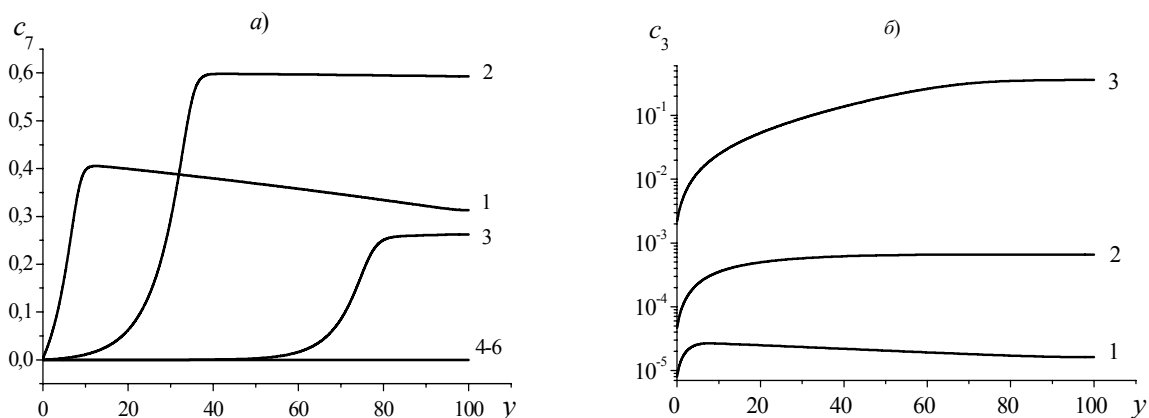


Рис. 3. Пространственные распределения: а) массовых концентраций паров воды и б) диоксида углерода в моменты времени, соответствующие рис. 1, *а*

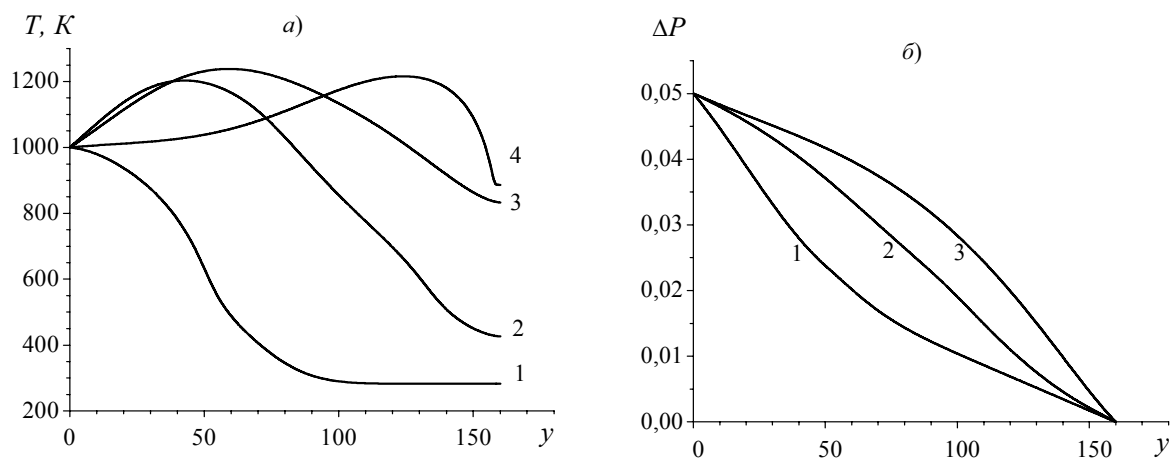


Рис. 4. Профили: а) температуры и б) давления для моментов времени t , с: 1) 13,9; 2) 54,4; 3) 81,7; 4) 139,2

Профили массовой концентраций СО для высокотемпературного режима приведены на рис. 5, а. Здесь кривые 1, 2 соответствуют стадиям прогрева и образования, а кривые 3, 4 моментам распространения волны горения. В силу того, что профили массовых концентраций остальных компонентов имеют качественно такой же вид, то они не приведены. Изменения объемной доли кокса, образующегося при прогреве, воспламенении и горении, представлены на рис. 5, б.

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 температуры вдуваемого окислителя. Данный режим реализуется, например, если $P_E - P_H = 0,1$ ($\Delta p = 10^4$ Па) и $T_E = 800$ К, т. е. при интенсивном вдуве не очень горячего окислителя. На рис. 6, а, приведены профили температуры в разные моменты времени. Здесь кривые 1–3 соответствуют стадии сушки и пиролиза, а кривая 5 соответствует моменту времени, начиная с которого твердое топливо полностью высушено. На рис. 6, б,

показано, что при тлеющем режиме сжигания не только идет процесс сушки и пиролиза древесных отходов с образованием кокса, но происходит и окисление кокса. Здесь кривые 1–3 соответствуют стадии прогрева и начала пиролиза. Затем (см. кривые 4 и 5, рис. 6, б) в окрестности входного сечения печи начинается реакция низкотемпературного окисления древесного угля, и объемная доля кокса начинает уменьшаться.

На рис. 7, а, изображены профили скорости фильтрации, из которых следует, что профиль скорости, пока не испарилась влага, является нелинейным. Здесь кривые 1–4 соответствуют процессу сушки (кривым 1–4, рис. 6, а), а кривая 5 соответствует кривой 6, рис. 6, а. И, наконец, на рис. 7, б, приведены профили давления вдоль оси реактора. Кривые 1 и 2 данного рисунка соответствуют начальной стадии процесса, т. е. кривым 1 и 2, рис. 6, а, кривая же 3 соответствует кривой 5, рис. 6, а. Следует отметить, что пока идет процесс сушки и интенсивное выделение водяного пара, профиль давления также нелинейный и становится линейным только после просушивания пористого слоя топлива.

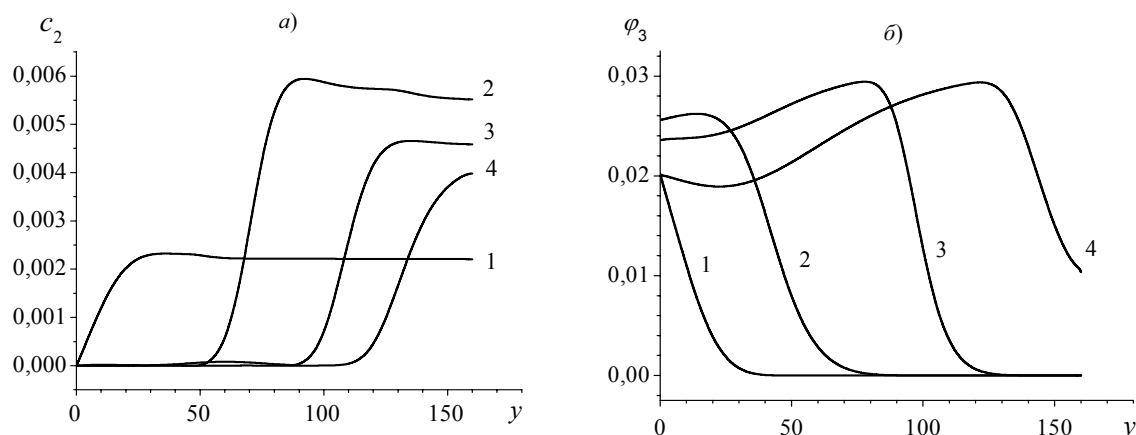


Рис. 5. Профили: а) массовой концентрации оксида углерода и б) объемной доли кокса в моменты времени t , с: 1) 13,9; 2) 54,4; 3) 81,7; 4) 139,2

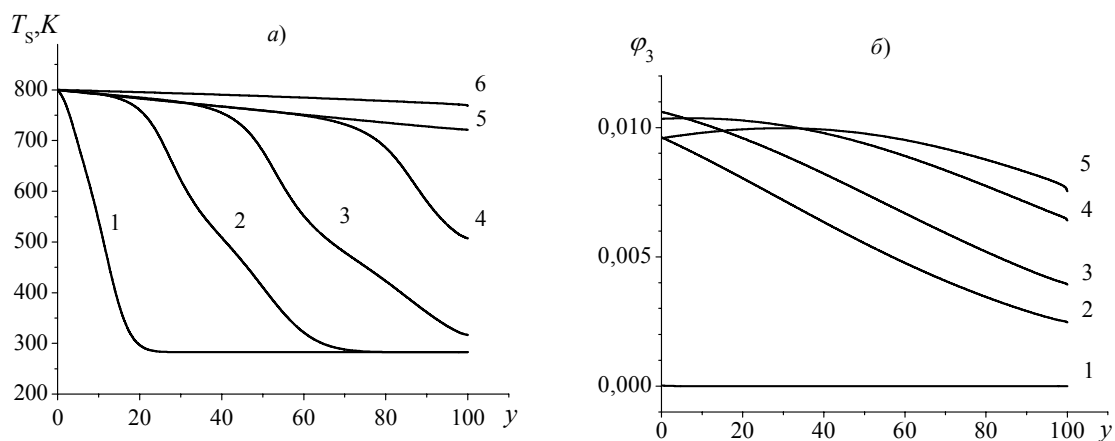


Рис. 6. Профили: а) температуры и б) объемной доли кокса в моменты времени t , с: 1) 1,2; 2) 5,1; 3) 11,4; 4) 21,9; 5) 79,3; 6) 747

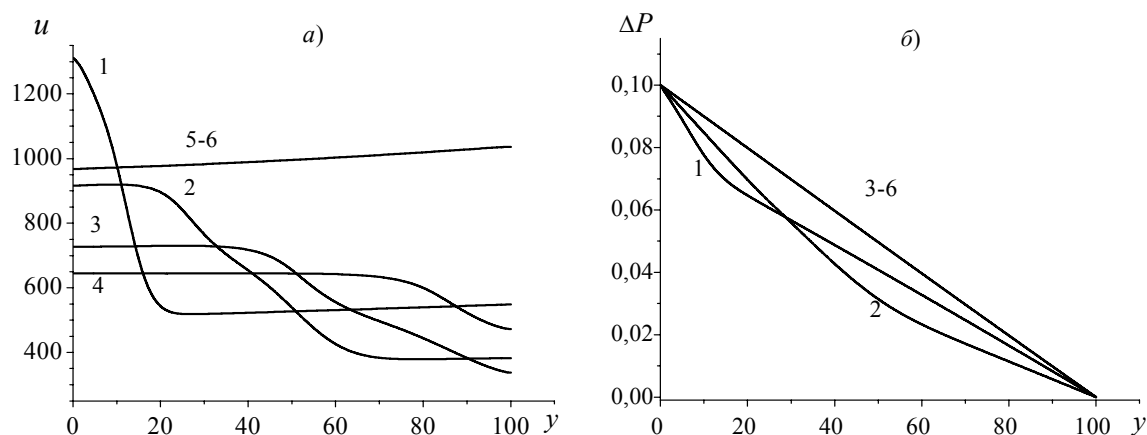


Рис. 7. Пространственное распределение: а) скорости фильтрации и б) давления в порах топлива для режима тления в моменты времени, соответствующие рис. 6, а

Следует отметить, что достоверность численного алгоритма используемого в данной работе исследовалась ранее в [5], где в качестве пористого коксующегося топлива брался торф. Численные расчеты работы [5] хорошо согласовывались по температуре и скорости горения торфа с экспериментальными данными работы [14]. Остальные характеристики в экспериментальной работе не определялись.

Выводы

- Показана возможность реализации различных режимов воспламенения и горения отходов де-

реобработки в зависимости от перепада давления (скорости продувки) и температуры продуваемого окислителя.

- Установлено, что при определенных условиях реализуется режим тления, при котором газообразные продукты пиролиза выбрасываются в атмосферу, не сгорая.
- Рассмотренную в данной работе математическую модель можно использовать при оценке состава газообразных продуктов горения пористых коксующихся топлив.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаков Г.Н., Субботин А.Н. Моделирование и оптимизация процессов высокотемпературной утилизации промышленных отходов // Третий Сибирский конгресс по промышленной и индустриальной математике: Тез. докл. – Новосибирск: Изд-во Института механики 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. Гришин А.М., Зинченко В.И. и др. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – 318 с.
4. 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.
5. Субботин А.Н. Влияние тепломассообмена на критические условия зажигания и горения торфяника // Сибирский физико-технический журнал. – 1992. – № 6. – С. 133–137.
6. Исаков Г.Н. Тепломассоперенос и воспламенение в гетерогенных системах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 142 с.
7. 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.
8. Щетинков Е.С. Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 739 с.
9. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева, Н.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – Т. 2. – 896 с.
10. Перельгин Л.М. Древесиноведение. – М.: Советская наука, 1957. – 252 с.
11. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
12. Краткий справочник физико химических величин / Под ред. К.П. Мищенко и А.А. Равделя. – Л.: Химия, 1967. – 182 с.
13. Померанцев В.В. и др. Основы практической теории горения. – Л.: Энергия, 1986. – 309 с.
14. Борисов А.А., Борисов Ал.А., Горелик Р.С. Экспериментальные исследования и математическое моделирование торфяных пожаров // Теплофизика лесных пожаров / Под ред. В.Е. Накорякова. – Новосибирск: Наука, 1984. – С. 5–12.