

УДК 521.534:536.245.022

А.М. Гришин

ОБЩАЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Дается краткий обзор работ по механике реагирующих сред и утверждается, что древесина является пористой реагирующей средой. На основе законов сохранения массы, количества движения, энергии и уравнения состояния получена общая замкнутая система уравнений в частных производных для описания процессов зажигания и горения древесины. Утверждается, что реакционные и теплофизические свойства древесины сильно отличаются от другой природной реагирующей среды – торфа и предлагается новая физико-математическая модель зажигания и горения древесины.

Ключевые слова: *математическое моделирование, древесина, пористая среда, фильтрация, теплопроводность, нагревание, сушка, горение.*

Известно, что во многих случаях в результате действия лесных и степных пожаров возникают пожары в поселках, деревнях и городах. В связи с этим представляет интерес система уравнений для общего физико-математического моделирования зажигания и горения древесины, так как, используя эту модель, можно определить условия, при которых удастся предотвратить упомянутые выше пожары.

В работах [1 – 24] изложены основы механики реагирующих сред, теории природных пожаров и катастроф.

Согласно [1 – 6], древесина представляет собой пористую реакционноспособную среду, физико-химические свойства которой изменяются при нагревании и горении. Поэтому для математического моделирования процессов зажигания и горения древесины целесообразно использовать модели реагирующих сред, представленные в работах [7 – 19]. Теплофизические свойства древесины можно частично определить на основе справочных данных [3 – 6], а также путем решения обратных задач механики реагирующих сред [18] с использованием результатов экспериментов по зажиганию и горению древесины различных пород деревьев.

Надо сказать, что предлагаемый комплексный метод исследования базируется не только на теоретических (законы сохранения массы, количества движения и энергии), но и на экспериментальных данных, которые характеризуют свойства древесины как пористой реакционноспособной среды [1 – 10]. Поэтому целесообразно использовать модель пористой реагирующей среды, развитую в [7 – 18], для которой должна быть создана новая база данных для описания процессов нагрева, пиролиза и горения газообразных и конденсированных процессов пиролиза древесины с использованием методов решения обратных задач механики реагирующих сред [20]. На основе этой модели с использованием итерационно-интерполяционного метода [21] и результатов, представленных в [22 – 24], могут быть решены конкретные задачи о возникновении и распространении пожаров в селах, поселках и городах. В данной работе на основе результатов [10, 11 – 17, 22 – 24] представлена общая физико-математическая модель зажигания деревянной стены в результате действия лесных или степных пожаров.

Физическая модель зажигания и горения стенки из древесины

Анализ наблюдений за горением древесины позволяет выделить следующие физико-химические процессы (этапы):

- 1) нагрев от фронта лесного пожара вследствие конвекции и излучения;
- 2) сушка древесины;
- 3) пиролиз древесины и образование конденсированного (кокса), газообразных (CO , H_2 , CH_4) и дисперсного (частиц сажи) продуктов пиролиза;
- 4) горение газообразных горючих продуктов пиролиза;
- 5) горение дисперсных продуктов пиролиза (частиц сажи);
- 6) горение конденсированного продукта пиролиза (коксыка).

При горении древесины имеют место следующие физико-химические процессы:

- 1) кинетический режим горения, при котором скорость процесса определяется скоростью протекания гетерогенных химических реакций окисления конденсированных продуктов пиролиза древесины (угля);
- 2) диффузионный режим горения, при котором скорость разрушения древесины определяется скоростью диффузии окислителя (кислорода);
- 3) возможен третий режим разрушения горящей древесины, при котором происходит растрескивание продуктов пиролиза древесины, механический унос частиц кокса и их догорание в воздухе.

На рис. 1 представлена схема изменения состояния и химического состава древесины при ее нагревании и последующем горении.

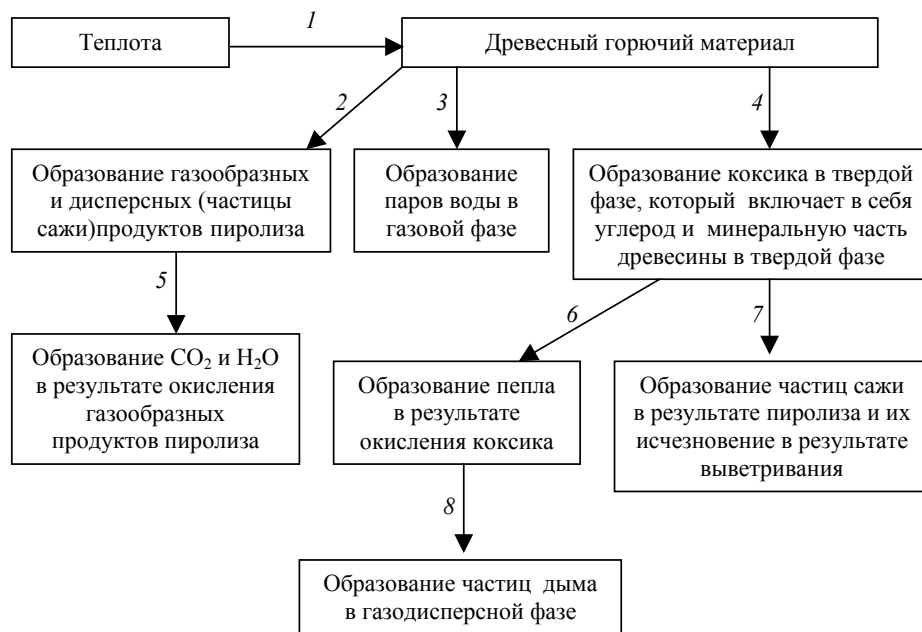


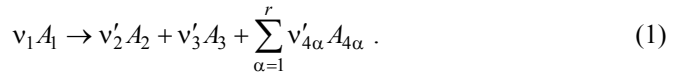
Рис. 1. Схема изменения агрегатного состояния и химического состава древесины при ее горении. Стрелки обозначают: 1 – подвод теплоты в результате излучения, конвекции и теплопроводности; 2 – сушка древесины; 3 – пиролиз древесины; 4 – образование коксыка; 5 – окисление газообразных и дисперсных продуктов пиролиза; 6 – образование пепла; 7 – образование и исчезновение частиц сажи; 8 – образование частиц дыма и их выветривание

Основная система уравнений

При выводе системы уравнений, выражающих законы сохранения массы, количества движения и энергии будем считать, что:

1) конденсированная фаза древесины в процессе горения состоит из четырех компонентов: исходного сухого материала, воды, конденсированного продукта пиролиза (угля) и продукта горения угля – золы;

2) при горении древесины в результате нагревания имеет место необратимая гомогенная реакция разложения



Здесь A_1 – символ исходного конденсированного вещества – влажной древесины; A_2 – символ воды; A_3 – символ конденсированного продукта реакции (угля); $A_{4\alpha}$ – символы газообразных горючих продуктов реакции разложения (пиролиза) – CO , H_2 , CH_4 , v_1 , v'_2 , v'_3 и $v'_{4\alpha}$ – соответствующие стехиометрические коэффициенты.

При выводе стехиометрического соотношения (1), выражающего закон сохранения массы, использовалась схема, представленная на рис. 1.

Процессы зажигания и горения древесины целесообразно исследовать, используя законы сохранения массы, количества движения и энергии. При этом на основе данных [1 – 6] были сделаны следующие допущения:

1. Древесина является двухтемпературной горючей недеформируемой пористо-дисперсной средой, состоящей из следующих фаз: φ_1 – сухое горючее органическое вещество¹; φ_2 – вода, связанная с этим веществом в порах; φ_3 – коксик (твердого продукта пиролиза древесины); φ_4 – зола; φ_5 – газовая фаза; φ_6 – частицы сажи; φ_7 – частицы дыма и φ_8 – капельки воды на границе раздела «древесина – внешняя среда» в пасмурный день.

2. Скорость и температура дисперсных частиц совпадают со скоростью и температурой несущей газовой фазы в соответствующей точке пространстве.

3. Газодисперсная фаза состоит из тех же компонентов, что и в общей физико-математической модели торфяных пожаров.

4. Силы инерции в уравнении движения газовой фазы малы по сравнению с силой давления, и уравнения сохранения количества движения можно использовать в форме квадратичного закона Дарси [4].

5. Влиянием обмена энергией между газовой фазы в порах дисперсными частицами дыма можно пренебречь по сравнению с теплообменом со стенками макропор, а последний учитывается выбором коэффициента объемной теплоотдачи.

6. Температура газовой фазы совпадает с температурой дисперсных частиц дыма.

С учетом сделанных допущений имеем следующую систему уравнений, которая получена на основе сведений, представленных в работах [6 – 19]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_j}{\partial x_j} = Q, \quad j = 1, 2, 3; \quad (2)$$

$$\varphi \mathbf{grad} p = - \left(\frac{\mu}{k_s} + \beta_s \frac{\rho |\mathbf{v}|}{\sqrt{k_s}} \right) \mathbf{v} + \rho \mathbf{F}, \quad \varphi = \sum_{i=5}^8 \varphi_i ; \quad (3)$$

¹ Сухая древесина состоит из лигнина и целлюлозы [4 – 6].

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} \sum_{i=5}^8 \rho_i \varphi_i c_{pi} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{\text{эфф}j} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial T}{\partial x_j} \left(\rho \sum_{\alpha=1}^N D_{\text{эфф}\alpha} C_{p\alpha} \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j} \right) + \\ + \alpha_V (T_s - T) + c_{ps} (T_s - T) (1 - \alpha_C) R_{1s} + \\ + c_{p7} (T_s - T) R_{2s} + q_{3s} R_3^{(s)} + q_{52} R_{52} + q_{53} R_{53} + q_{54} R_{54} + q_{2s} (R_{8-}^{(s)} - R_{8+}^{(s)}); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\rho \frac{d_\alpha c_\alpha}{dt} = R_\alpha + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_{\text{эфф}\alpha} \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j} \right) - c_\alpha Q, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{sj} \frac{\partial T_s}{\partial x_j} \right) + \\ + q_{1s} R_{1s} - q_{2s} R_{2s} + q_{3s} R_{3s} + q_{4s} R_{4s} + \alpha_V (T - T_s); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}; \quad \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_C R_{1s} - \frac{M_C}{M_1} R_{3s} - \alpha_4 R_{3s} - R_6^{(s)},$$

$$\rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_4 R_{3s} - R_7^{(s)} = R_{4s}; \quad (7)$$

$$\sum_{\alpha=1}^8 c_\alpha = 1, \quad \sum_{i=1}^8 \varphi_i = 1; \quad (8)$$

$$P = \rho_\Gamma R T \sum_{\alpha=1}^{N_\Gamma} \frac{c_{\alpha\Gamma}}{M_\alpha}, \quad N_\Gamma = N - 3; \quad (9)$$

$$Q = (1 - \alpha_C) R_{1s} + R_{2s} + \frac{M_C}{M_1} R_3 + R_6^{(s)} + R_7^{(s)} + R_8^{(s)}. \quad (10)$$

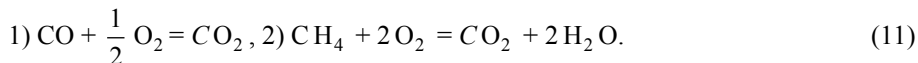
Здесь t – время, r – радиус-вектор любой точки; x_j ($i = 1, 2, 3$) – декартовы координаты; $\frac{d}{dt}$ – символ полной производной по времени; Q – массовая скорость образования газодисперсной фазы; k_s – коэффициент фильтрации; c_{pi} , c_{p7} , c_{ps} – теплоемкости при постоянном давлении отдельных компонентов газовой фазы, водяного пара и газообразных продуктов пиролиза; v_j , $|v|$ – компоненты и модуль осредненной скорости газа и дисперсных частиц; ρ_i – истинная плотность i -й фазы; $R_8^s = R_{8+}^s - R_{8-}^s$; $R_8^{(s)}$, $R_{8+}^{(s)}$ – массовые скорости конденсации паров и испарения свободной воды в газодисперсной фазе; q_{1s} , q_{2s} , q_{3s} и q_{4s} – теплоты пиролиза древесины, испарения связанной воды и горения коксика; q_{52} , q_{53} , q_{54} – теплоты горения CO, H₂, CH₄; p – давление газа в порах древесины; c_α – массовая концентрация α -компонента в газодисперсной среде; N – количество компонентов в газодисперсной среде; $N_\Gamma = N - 3$ – количество компонентов газовой фазы; N – общее число компонентов; R_α – массовая скорость образования α -компонента газовой фазы в результате пиролиза ЛГМ, испарения воды, гетерогенных и гомогенных химических реакций; $R_6^{(s)}$, $R_7^{(s)}$, $R_8^{(s)}$ – массовые скорости образования час-

тиц сажи, дыма и капелек воды при конденсации ее паров; $\rho_{\Gamma} = \sum_{\alpha=1}^7 \rho_{\alpha\Gamma}$ – плотность газовой фазы; $\rho_{\alpha\Gamma}$ – парциальные плотности компонентов газовой фазы (индекс 1 соответствует кислороду, 2 – CO; 3 – H₂; 4 – CH₄; 5 – CO₂; 6 – N₂; 7 – парам воды); $c_{\alpha\Gamma} = \rho_{\alpha\Gamma} / \rho_{\Gamma}$, $\alpha = 1, 2, \dots, 7$ – массовые концентрации для смеси газов; $c_{\alpha} = \rho_{\alpha}^0 / \rho$, $\alpha = 1, 2, \dots, 10$ – массовые концентрации компонентов газодисперсной смеси; ρ_{α}^0 – парциальные плотности отдельных компонентов газодисперсной фазы ($\alpha = 1, 2, \dots, 10$; первые семь значений ρ_{α}^0 соответствуют компонентам газовой фазы, а последние 8 – частицам сажи; 9 – частицам дыма; 10 – капелькам воды); $\rho = \rho_5 \varphi_5 + \rho_6 \varphi_6 + \rho_7 \varphi_7 + \rho_8 \varphi_8$ – плотность газодисперсной смеси; $\rho_5 - \rho_8$ – истинные плотности газовой фазы, частиц сажи, частиц дыма и капелек воды в микропорах древесины; $\varphi_5 - \varphi_8$ – объемные доли газовой фазы, частиц сажи, дыма и воды в порах древесины; λ – коэффициент молекулярной теплопроводности газовой фазы; μ – коэффициент динамической вязкости газа в порах; β_s – эмпирический коэффициент в законе фильтрации (3); k_s – коэффициент проницаемости в уравнении (3); $D_{\text{эфф}\alpha}$ – эффективный коэффициент диффузии α -компонента, в том числе сажи, золы и капелек воды; α_v – коэффициент внутреннего теплообмена; $R_{5\alpha}$ – массовые скорости изменения компонентов газовой фазы (индекс 1 соответствует скорости изменения O₂, 2 – горению CO, 3 – H₂, 4 – CH₄); R_{is} – массовые скорости образования (исчезновения) вещества конденсированных фаз (индекс 1 соответствует скорости пиролиза древесины, 2 – испарению воды, связанной с древесиной, 3 – горению коксика); T и T_s – температуры газовой и конденсированной фаз; λ_s – коэффициент теплопроводности пористой конденсированной фазы (древесины); q_k – тепловые эффекты химических реакций; $k = 1, 2, 3$, где 1 соответствует реакции пиролиза, 2 – массовой скорости испарения связанной воды, 3 – скорости гетерогенного коксика; α_C – коксовое число древесины; R – универсальная газовая постоянная; M_C и M_1 – атомарная и молекулярная массы углерода и кислорода; M_{α} – молекулярная масса α -компонента газовой фазы; как правило, $F = g$ – ускорение силы тяготения; $\lambda_{\text{эфф}}$ и $\mu_{\text{эфф}}$ – эффективные коэффициенты теплопроводности и вязкости газа; $\alpha_v = s\alpha_s$ – коэффициент объемного теплообмена в слое древесины; s – удельная поверхность древесины с учетом микропор [4]; α_s – коэффициент теплообмена типичного элемента древесины с окружающей средой; в (10) нижний индекс «js» соответствует реакциям с участием конденсированных веществ; верхний индекс «s» – характеристикам дисперсной фазы.

Уравнение (2) представляет собой закон сохранения массы газовой фазы в дифференциальной форме; 3 – уравнение фильтрации газообразных этой фазы; (4) – закон сохранения энергии в газовой фазе; (5) – уравнение сохранения массы α -компонента газовой фазы; (6) – закон сохранения энергии в конденсированной фазе; уравнения (7), (8) – описывают поведение объемных долей различных фаз, а выражение (9) представляет собой уравнение газовой фазы в порах.

Коэффициенты переноса, теплофизические и термокинетические постоянные

Итоговые гомогенные химические реакции в проницаемом слое древесины имеют вид [10 – 12]



Уравнения химической кинетики для этих реакций запишутся как [12]

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= -k_1 x_1 x_3^{0,25} T_1^{-2,25} \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right) = r_1, \\ \frac{dy_2}{dt} &= -k_2 x_3^{1,5} x_5^{-0,5} \frac{p_2}{T_1} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_1}\right) = r_2, \end{aligned} \quad (12)$$

где x_1 и x_2 – предэкспоненциальные множители; y_1 и y_2 – молярно-объемная концентрация окиси углерода CO и метана; x_1, x_3, x_5 – молярные концентрации CO, O₂, CH₄; k_1, k_2 – предэкспоненциальные множители; E_1 и E_2 – энергии активации соответствующих реакций; r_1 и r_2 – молярно-объемные скорости реакции.

Для определения скорости испарения связанной воды R_{2s} в многофазной среде – древесине – используется аналог закона Герца – Кнудсена [12]

$$R_{2s} = \frac{s_2 M_2 A_s \Phi_2 [k_{2s} \exp(-E_{2s} / RT_1) - p_2]}{(2\pi RT_1 M_2)^{0,5}}. \quad (13)$$

Здесь s_2 – удельная поверхность воды; M_2 – молекулярная масса воды; A_s – эмпирический множитель; p_2 – парциальное давление паров воды; $\pi=3,14$; E_{2s} – энергия активации процесса испарения воды; k_{2s} – предэкспоненциальный множитель.

Для нахождения парциального давления паров воды в древесине p_2 в (12) используется закон Дальтона [10 – 13]. Тогда для p_2 имеем выражение

$$p_2 = p c_2 \frac{M}{M_2}, \quad (14)$$

где M – молярная масса смеси; p – давление в смеси газов; c_2 – массовая концентрация паров воды.

Эффективные коэффициенты диффузии определяются по формуле Фристрона – Вестенберга [12, 19]

$$\begin{aligned} D_\alpha &= (1 - c_\alpha) \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq \alpha}}^N \frac{x_j}{d_{\alpha,j}} \right)^{-1}, \\ d_{\alpha,j} &= 1,66 \cdot 10^{-7} \frac{[(M_\alpha + M_j)/(M_\alpha M_j)]^{0,5} T_1^{1,67}}{P \sigma_{j,\alpha}^2 (\epsilon_{j,\alpha} / k T_1)^{0,17}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Формула для коэффициентов теплопроводности компонентов газовой фазы $\lambda_j, j = 1, 2, \dots, N$, взята из [19]

$$\lambda_j = \lambda_j^0 (0,115 + 0,354 \frac{c_{p,j}}{R}), \quad \lambda_5 = \sum_{i=1}^N \lambda_i c_i, \quad \lambda_i^0 = 8,3210^{-2} \frac{\sqrt{M_i T}}{M_i \sigma_i^2 \Omega^{(2,2)}}. \quad (16)$$

где $c_{p,j}$ – теплоемкости j -го компонента при постоянном давлении; $\Omega^{(2,2)}$ – эмпирические постоянные [19].

Коэффициенты теплоемкости компонентов газовой фазы $\lambda = \sum_{i=1}^4 \lambda_{is} \varphi_i + \lambda_5 \varphi_5 = a_j + b_j T + c_j' / T^2$ (a_j, b_j, c_j' – эмпирические постоянные) брались из [8], а значения величин c_{p5} и λ_{is} в конденсированной фазе взяты из [10 – 12]:

$$c_{p5} = \sum_{j=1}^N c_{pj} c_j, \quad \lambda = \sum_{i=1}^4 \lambda_{is} \varphi_i + \lambda_5 \varphi_5. \quad (17)$$

Здесь c_j – массовые концентрации компонентов газовой фазы; N – число компонентов газовой фазы; c_{pj} – теплоемкости отдельных компонентов; λ – коэффициент теплопроводности многофазной среды; λ_{is} и λ_5 – коэффициент теплопроводности компонентов конденсированной и газовой фаз.

Массовые скорости химических реакций R_1, R_{1s}, R_2 в уравнениях (2), (3)–(7) имеют вид

$$\begin{aligned} R_1 &= \eta_1 R_{1s} - M_1 r_1, & R_2 &= \eta_2 R_{1s} - R_{2s} + 2 M_2 r_2, \\ R_3 &= -\eta_3 R_{3s} - M_3 r_1 / 2 - 2 M_3 r_2, & R_4 &= M_4 (r_1 + r_2), \\ R_5 &= \eta_4 R_{1s} - M_5 r_2; \end{aligned} \quad (18)$$

$$R_{1s} = k_{1s} \rho_{1s} \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_{1s}}{RT_1}\right), \quad R_{3s} = \frac{M_C}{M_3} s_3 k_{3s} \varphi_5 \rho_5 \varphi_3 c_3 \exp\left(-\frac{E_{3s}}{RT_1}\right), \quad R_{4s} = \alpha_4 R_{3s}, \quad (19)$$

где R_1, R_{1s}, R_2 – размерные величины, упомянутых выше скоростей реакций, а величины

$$\alpha_C = \frac{M_C}{M_H - M_C}, \quad \eta_1 = \frac{M_1}{M_H}, \quad \eta_2 = \frac{M_2}{M_H}, \quad \eta_3 = \frac{M_3}{M_C}, \quad \eta_4 = \frac{M_5}{M_H}. \quad (20)$$

О математическом моделировании процессов переноса в приземном слое атмосферы при горении древесины

Над очагом горения древесины возникает конвективная колонка, содержащая дисперсные (частицы кокса и сажи) и газообразные продукты горения древесины). Математическое описание параметров состояния этой колонки (скорости, давления, температуры, концентраций компонентов) представляет сложную задачу математической физики. Эта система уравнений может быть получена как частный случай из общей математической модели лесных пожаров [12 – 16]. Для упрощения этой системы были сделаны следующие допущения:

1. В результате горения древесины возникает конвективная колонка из нагретого очагом пожара воздуха, а также продуктов пиролиза и горения древесины.

2. Для упрощения постановки задачи конвективную колонку можно считать осесимметричной.

3. Соответствующая система уравнений для моделирования процессов переноса в атмосфере над очагом горения древесины как частный случай может быть получена из системы уравнений, предложенной в [12] для описания состояния газодисперсной среды, возникающей при лесных пожарах.

4. На границе раздела атмосферы и очага горения древесины должны выполняться соотношения, выражающие законы сохранения массы, количества движения и энергии, примеры которых даны в [12].

Кроме того, для математического моделирования такой нестационарной задачи, как зажигание и горение древесины, необходимы начальные условия, аналогичные условиям, представленным в [14].

База данных общей математической модели горения древесины и методики численного решения задач

В основную систему уравнений (2) – (10) входят теплофизические коэффициенты, скорости сушки и реакций пиролиза и горения и множество эмпирических постоянных, совокупность которых представляет базу данных общей математической модели. Компоненты базы данных могут быть определены, с одной стороны, из литературных источников, а с другой – на основе экспериментальных исследований с помощью решения обратных задач механики реагирующих сред [20]. Очень важно, чтобы все компоненты базы данных были согласованы друг с другом. Это осуществлялось методом их варьирования в пределах их точности и выбора из условия наилучшего согласования соответствующих расчетных и экспериментальных данных. Очень важно при этом, чтобы решение прямых и обратных задач математической теории лесных пожаров при численном решении определялось с контролируемой точностью, что представляет собой сложную математическую задачу, так как основная система уравнений (2) – (10) нелинейна. Для численного решения прямых задач теории лесных пожаров использовались разработанные в ТГУ итерационно-интерполяционный метод [18] и специальные методики численного счета, основанные на применении метода Патанкара – Сполдинга.

В систему уравнений (2) – (10), представленную выше, входит ряд параметров, которые характерны не только для торфяных пожаров, но и для горения древесины (λ_s , D_α – коэффициенты теплопроводности и диффузии, теплофизические и термокинетические коэффициенты). К сожалению, из-за ограниченности полноценных экспериментальных данных по возникновению и распространению пожаров конкретной базы данных для математической модели (2) – (10) нет. Для ее создания необходимы результаты соответствующих экспериментальных исследований и использование методов решения обратных задач механики реагирующих сред [20]. После определения параметров, характеризующих теплофизические и реакционные свойства древесины, необходимо расчеты проводить с использованием правдоподобных допущений о порядках упомянутых выше величин, а в дальнейшем в качестве основного метода решения задач теории горения древесины целесообразно использовать итерационно-интерполяционный метод и некоторые приближенные аналитические методы [21].

Выводы и предложения по развитию теории зажигания и горения древесины при пожарах в деревнях, поселках и городах

По своей структуре (физическим, химическим и прочностным) свойствам древесина и торф значительно отличаются друг от друга. В иллюстрированном энциклопедическом словаре [1] дано следующее определение понятия древесины: «древесина – это ткань высших растений, служащая для проведения воды и растворов солей от корней к листьям и другим органам. Древесиной называют также срубленные и реликтовые стволы деревьев (деловая и строительная древесина). Древесину различных пород, имеющую красивый цвет, блеск и оригинальную текстуру, называют декоративной и используют для отделки мебели, интерьеров и художественных промыслов. Самая тяжелая древесина у железного дерева (1490 кг/м^3), а самая легкая – у бальзового дерева ($40 - 384 \text{ кг/м}^3$)».

В этом же словаре говорится о том, что «торф – осадочная порода, продукт неполного разложения растений в условиях болот» [1]. Кроме растительных остатков торф содержит аморфное органическое вещество (гумус), минеральные примеси и воду. В естественном состоянии – однородная по составу и окраске плотная масса черного или коричневого цвета. Он используется как удобрение, теплоизоляционный материал и реже – как топливо.

На основании этой информации можно утверждать, что древесина и торф значительно отличаются друг от друга по структуре строения, плотности, химическому составу, теплофизическим и реакционным свойствам.

Проблема математического и физического моделирования горения древесины далеко не исчерпана. Представляет интерес решение следующих принципиальных вопросов:

1. Создание экспериментальных установок и методик для определения теплофизических характеристик для определения коэффициентов теплопроводности и диффузии в древесине в обычных условиях.

2. Разработка экспериментальных установок и методик для определения термокинетических постоянных, характеризующих процессы сушки и пиролиза древесины.

3. Создание детерминированно-вероятностной модели для прогноза возникновения горения древесины в конкретных метеорологических и техногенных условиях с использованием геоинформационных технологий.

4. Разработка компьютерных программ для прогноза развития процесса горения древесины, а также экологических последствий горения древесины с использованием геоинформационных технологий.

5. Исследование предельных условий распространения горения древесины и разработка новых способов и устройств для их тушения.

Решение этих вопросов позволит в первом приближении завершить создание математической теории горения древесины и использовать ее для разработки как способов, так и средств для борьбы с горением древесины, а также прогнозов экологических последствий этих пожаров. На основании имеющегося опыта исследования задач теории лесных пожаров [9, 12 – 16] можно утверждать, что для разработки теории горения древесины необходимо сочетать экспериментальные и теоретические методы исследования. В качестве методической основы теории горения древесины целесообразно использовать механику многофазных реагирующих сплошных сред и метод математического моделирования с применением технологии распараллеливания вычислительных операций на суперкомпьютерах,

что позволит существенно уменьшить затраты машинного времени и получать поля температур и другие характеристики горения древесины в режиме, опережающем реальное время развития этого пожара. Для сокращения числа эмпирических входных данных, например эмпирических коэффициентов тепло- и массообмена, целесообразно использовать теорию сопряженных задач и численные методы механики реагирующих сред [7, 10, 11, 14, 20], а также методы решения некорректных (обратных) задач математической физики [21] и теории катастроф [22 – 24].

Поскольку в рамках общей системы уравнений (2) – (10) учитывались основные физико-химические процессы, определяющие распространение пожара, то на ее основе можно давать прогноз последствий пожаров в различных населенных пунктах с преобладанием деревянных строений.

Кроме того, в рамках предложенной физико-математической модели можно определить поля плотности излучения над очагом горения древесины в различные моменты времени, что в принципе позволяет, используя метод решения обратных задач [20] и математическую теорию катастроф [22 – 24], создать новую методику обнаружения и диагностики состояния среды в очаге горения древесины по данным аэрокосмического мониторинга.

Для математического моделирования конкретных задач о горении древесины (например, при пожарах в городах, поселках и деревнях) можно использовать итерационно-интерполяционный метод [21]. Кроме того, необходимо задать конкретные граничные и начальные условия. Используя экспериментальные данные об упомянутых выше пожарах и математическую технологию решения обратных задач математической физики, необходимо определить коэффициенты переноса, тепломассообмена, энергии активации и предэкспоненциальные множители различных химических реакций [21]. Знание упомянутых выше характеристик позволит осуществлять достаточно точное математическое моделирование зажигания и горения древесины с использованием вычислительных технологий, развитых в [21 – 24].

Автор благодарит профессора, д.т.н. А.С. Якимова за обсуждение работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бородулин В.И., Горкин А.П., Гусев А.А. и др.* Новый иллюстрированный энциклопедический словарь. М.: БСЭ, 1999. 911 с.
2. *Пожарная безопасность.* Энциклопедия. М.: ФГУ ВНИИ ПО МЧС России, 2007. 416 с.
3. *Мищенко К.П., Равдель А.А.* Краткий справочник физико-химических величин. Л.: Химия, 1972. 200 с.
4. *Харук Е.В.* Проницаемость древесины газами и жидкостями. Новосибирск: Наука, 1976. 187 с.
5. *Новосельцев В.Д.* Справочник лесничего. М.: Агропромиздат, 1986. 352 с.
6. *Чудинов С.В., Трофимов А.Н. и др.* Справочник лесохимика. М.: Лесная промышленность. 1987. 271 с.
7. *Гришин А.М.* Математическое моделирование некоторых нестационарных аэротермохимических явлений: дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск: Том. гос. ун-т, 1974. 432 с.
8. *Гришин А.М., Якимов А.С.* Исследование переходных режимов горения пористых реагирующих веществ // Численные методы механики сплошных сред. 1976. Т. 7. № 6. С. 39 – 51.
9. *Гришин А.М.* Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981. 277 с.
10. *Гришин А.М., Фомин В.М.* Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. Новосибирск: Наука, 1984. 319 с.

11. Алексеев Б.В., Гришин А.М. Физическая газодинамика реагирующих сред. М.: Высш. школа, 1985. 464 с.
12. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.
13. Бурасов Д.М., Гришин А.М. Математическое моделирование низовых лесных и степных пожаров. Кемерово: Практика, 2006. 134 с.
14. Linn R.R. A transport Model for Prediction of wild fire Behavior Los Alamos National Laboratory. 1997. 194 p.
15. Гришин А.М. О математическом моделировании торфяных пожаров // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2008. № 3(4). С. 85 – 95.
16. Гришин А.М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // Успехи механики. 2008. Т. 2. № 4. С. 41 – 89.
17. Гришин А.М., Якимов А.С., Рейн Г., Симеони А. О математическом и физическом моделировании возникновения торфяных пожаров // ИФЖ. 2009. Т. 82. № 5. С. 1210 – 1217.
18. Гришин А.М., Якимов А.С. Математическое моделирование возникновения торфяных пожаров // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52. № 2/2. С. 112 – 121.
19. Гиршфельдер Дж., Кертис Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: ИИЛ, 1961. 929 с.
20. Гришин А.М., Зинченко В.И., Кузин А.Я. и др. Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. 418 с.
21. Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н. и др. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. 320 с.
22. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Ч. 1. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. 526 с.
23. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Ч. 2. Кемерово: Практика, 2005. 560 с.
24. Гришин А.М., Петрин С.В., Петрина Л.С. Моделирование и прогноз катастроф. Ч. 3. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. 576 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

ГРИШИН Анатолий Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физической и вычислительной механики Томского государственного университета. E-mail: fire@mail.tsu.ru

Статья принята в печать 29.04.2010 г.