

УДК 536.16:536.245.022

Математическое моделирование процесса зажигания древесины*

А.М. Гришин, А.С. Якимов

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: fire@mail.tsu.ru

Предложена постановка и численное решение задачи о зажигании стенки из дерева в результате действия очага пожара на основе математической модели пористой реагирующей среды. Получено, что зажигание исходного реагента определяется процессами сушки, пиролиза (реакциями разложения и синтеза) сухой древесины, реакцией окисления оксида углерода, а также теплофизическими свойствами древесины.

Ключевые слова: древесина, теплопроводность, пиролиз, зажигание, горение.

Введение

Известны случаи, когда в результате действия лесных пожаров огонь перекидывается на деревянные постройки в поселках и городах [1]. В связи с этим представляет интерес математическое моделирование зажигания и горения стены деревянного строения при взаимодействии с фронтом лесного пожара. Древесина представляет собой пористую реакционноспособную среду [2–5], физико-химические свойства которой изменяются при нагревании и горении. Поэтому для математического моделирования процессов пиролиза, зажигания и горения древесины целесообразно использовать модели реагирующих сред, предложенных в работах [6–10].

В настоящей работе на основе моделей [8–10] определяется время зажигания стены из древесины с различными теплофизическими свойствами и начальным влагосодержанием.

1. Постановка задачи

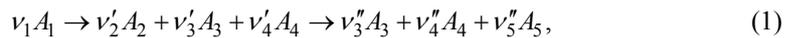
Анализ наблюдений за горением древесины, изложенный в работах [5, 11–13], позволяет выделить следующие основные физико-химические процессы (этапы): 1) нагрев от фронта лесного пожара вследствие конвекции и излучения, 2) сушка древесины, 3) пиролиз древесины, образование конденсированного (кокса) и газообразных горючих продуктов пиролиза, 4) горение газообразных горючих продуктов пиролиза, 5) горение конденсированного продукта пиролиза (коксыка).

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 11-01-00673-а, № 10-01-91054-НЦНИ-а).

При горении древесины имеют место следующие процессы: 1) кинетический режим горения, при котором скорость процесса определяется скоростью протекания гетерогенных химических реакций окисления конденсированных продуктов пиролиза древесины, 2) диффузионный режим горения, при котором скорость разрушения древесины определяется скоростью диффузии окислителя (кислорода).

Будем считать, что зажигание и горение древесины возникает в результате совместного действия конвективного (q_w) и лучистого (q_σ) тепловых потоков. Действие конвективного потока моделируется температурой очага T_e и коэффициентами тепло- и массообмена α_e и β_e . Рассмотрим пространственную задачу в параллелепипеде (рис. 1), где ось x_3 направлена вертикально вверх, начало координат берется на нижней стороне F_3 бетонной подложки. Суммарный тепловой поток фронта пожара $Q_w = q_w + q_\sigma$ направлен по оси x_1 перпендикулярно волокнам древесины рассмотренных пород, при этом вне области G_* лучистый тепловой поток отсутствует.

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



где $A_i, i = 1, \dots, 5$ — символы исходного конденсированного вещества — влажной древесины, связанной воды, конденсированного продукта пиролиза, газообразных горючих продуктов реакции пиролиза и пепла; $v_1, v'_2, v'_3, v'_4, v''_3, v''_4, v''_5$ — соответствующие стехиометрические коэффициенты.

Первая стадия реакции пиролиза (1) включает в себя стадию разложения древесины [6, 14], которая протекает с поглощением тепла и образованием кокса, что может быть интерпретировано как реакция синтеза, которая имеет экзотермический характер [4, 15, 16]. Вторая стадия — образование пепла из кокса, которое происходит с экзотермическим эффектом. Считается, что энергия активации и предэкспоненты процессов разложения и синтеза близки друг другу и поэтому первую стадию в целом можно моделировать как одностадийную химическую реакцию с переменным тепловым эффектом [15]. Температура перехода T_{s*} , при которой происходит смена этих режимов, считается

известной — $T_{s*} = 550 \text{ K}$ [5, 11].

Для упрощения анализа, согласно исследованиям [9, 10], будем предполагать, что древесина является двухтемпературной горючей недеформируемой пористой средой, состоящей из следующих компонентов: φ_1 — объемная доля сухого органического вещества (сухая древесина состоит из лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы [2–5]), φ_2 — объемная доля гигроскопической воды, связанной с этим

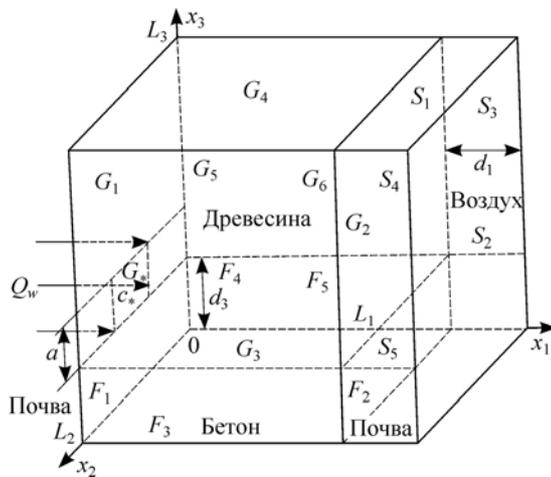


Рис. 1. Схема теплообмена древесины на бетонной подложке с внешней средой.

органическим веществом в порах [2–6], φ_3 — объемная доля коксика (продукта пиролиза органического вещества), а также конденсированного и газообразного продуктов горения (объемные доли φ_4 и φ_5). Кроме того, следуя выводам [6, 9], будем считать, что газовая фаза в слое древесины состоит из семи компонентов: CO, H₂O, O₂, CO₂, CH₄, H₂ и N₂ (массовые концентрации которых обозначим c_α , где $\alpha = \overline{1-7}$ соответствуют вышеперечисленным величинам), а в самом слое древесины имеет место испарение связанной воды и учитывается процесс фильтрации.

В целом считается, что фронт пожара при его заглублинии в слой древесины состоит из зон: прогрева, сушки, пиролиза, зоны горения газообразных и конденсированных продуктов пиролиза высушенной древесины и слоя пепла.

Математически сформулированная выше задача с учетом сделанных допущений сводится к решению следующей системы уравнений [9, 10]:

$$\frac{\partial \rho_5 \varphi_5}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_5 \varphi_5 \vec{W}) = Q, \quad (2)$$

$$\operatorname{grad} P = -\frac{\mu}{\xi} \vec{W} - \rho_5 g, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^4 c_{is} \rho_{is} \varphi_i \frac{\partial T_1}{\partial t} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{sj} \frac{\partial T_1}{\partial x_j} \right) + A_v (T_2 - T_1) + \sum_{i=1}^4 q_{is} R_{is}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho_5 \varphi_5 c_{p5} \frac{dT_2}{dt} = \operatorname{div}(\lambda_5 \varphi_5 \operatorname{grad} T_2) + \rho_5 \varphi_5 \operatorname{grad} T_2 \sum_{\alpha=1}^N c_{p\alpha} D_\alpha \operatorname{grad} c_\alpha + \sum_{i=1}^3 q_i r_i + \\ + A_v (T_1 - T_2) + c_{1s} (T_1 - T_2) (1 - \alpha_c) R_{1s} + c_{2s} (T_1 - T_2) R_{2s}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\rho_g c_{pg} \frac{\partial T_3}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_g \operatorname{grad} T_3), \quad (6)$$

$$\rho_b c_{pb} \frac{\partial T_4}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_b \operatorname{grad} T_4), \quad (7)$$

$$\rho_5 \varphi_5 \frac{dc_\alpha}{dt} = \operatorname{div}(\rho_5 \varphi_5 D_\alpha \operatorname{grad} c_\alpha) - c_\alpha Q + R_\alpha, \quad \alpha = 1, \dots, N-1, \quad (8)$$

$$\rho_{1s} \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \quad \rho_{2s} \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \quad \rho_{3s} \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1s} - R_{3s} - \alpha_4 R_{3s}, \quad (9)$$

$$\rho_{4s} \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = R_{4s},$$

$$\sum_{\alpha=1}^N c_\alpha = 1, \quad \varphi_5 = 1 - \sum_{i=1}^4 \varphi_i, \quad M^{-1} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \quad P = \frac{\rho_5 R T_2}{M}. \quad (10)$$

Здесь A_v — объемный коэффициент теплообмена между газовой и конденсированной фазой, c_p — коэффициент удельной теплоемкости, g — ускорение свободного падения, D — коэффициент диффузии, Q — суммарный тепловой поток, M — молекулярный вес, P — давление газа в порах, q_i , $i = 1, 2, 3$ — тепловые эффекты реакций окисления (19), q_{is} , $i = \overline{1,4}$ — тепловые эффекты реакций R_{1s} , R_{2s} , R_{3s} , R_{4s} ; r_1 , r_2 , r_3 — молярно-объемные скорости окисления оксида углерода, метана и водорода, R — универсальная газовая постоянная, R_{1s} — массовая скорость разложения сухого реагента (древесины),

R_{2s} — массовая скорость испарения связанной воды в древесине, R_{3s} — массовая скорость горения коксика, R_{4s} — массовая скорость образования золы, R_i , $i = \overline{1, 6}$ — массовая скорость образования и исчезновения компонент газовой фазы в уравнении диффузии (8), t — время, T_1 — температура каркаса древесины, T_2 — температура газовой фазы в порах реагента, T_3 — температура воздуха, T_4 — температура бетона, \vec{W} — вектор скорости фильтрации; $\alpha_4 = v_4'' M_{4s} / (v_3 M_{3s})$ — приведенный стехиометрический коэффициент [7], а правая часть третьего уравнения (9) характеризует массовую скорость образования и исчезновения коксика; α_c — доля кокса в ходе реакции пиролиза древесины, λ — коэффициент теплопроводности, μ — коэффициент динамической вязкости; φ_i , $i = \overline{1-4}$ — безразмерные объемные доли, при $i = 2, 3, 4$ — связанная вода, кокс, пепел соответственно; $\xi = \xi_* \varphi_5^3 / (1 - \varphi_5)^2$ — функция, описывающая влияние объемной доли газа на сопротивление, $\xi_* = d_p^2 / 120$ — характерная проницаемость, d_p — диаметр цилиндрических пор, φ_5 — объемная доля газовой фазы, определяемая второй формулой из уравнений (10); ρ — плотность, ρ_5 — плотность газовой фазы.

В системе (2)–(10) уравнения (6) и (7) — уравнения теплопроводности для воздуха за стенкой древесины G_2 и бетонной подложки (см. рис. 1).

Для решения системы уравнений (2)–(10) были использованы начальные условия:

$$\begin{aligned} T_i |_{t=0} = T_n, \quad i = 1, \dots, 4, \quad c_\alpha |_{t=0} = c_{\alpha n}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-1, \\ \rho_5 |_{t=0} = \rho_{5n}, \quad \varphi_i |_{t=0} = \varphi_{in}, \quad i = 1, \dots, 4; \end{aligned} \quad (11)$$

балансовые граничные условия [17]

$$\begin{aligned} (1 - \varphi_5)[q_\sigma + \alpha_c(T_e - T_{1,G_*})] = -\lambda_{s1} \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \Big|_{G_*}, \quad (1 - \varphi_5)\alpha_{G_1}(T_e - T_{1,G_1}) = -\lambda_{s1} \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \Big|_{G_1}, \\ \varphi_5[q_\sigma + \alpha_c(T_e - T_{2,G_*})] = -\varphi_5 \lambda_5 \frac{\partial T_2}{\partial x_1} \Big|_{G_*}, \quad \varphi_5 \alpha_{G_1}(T_e - T_{2,G_1}) = -\varphi_5 \lambda_5 \frac{\partial T_2}{\partial x_1} \Big|_{G_1}; \end{aligned} \quad (12)$$

условия сопряжения на границе раздела дерево–бетон (G_3) и дерево–воздух (G_2)

$$\begin{aligned} \lambda_b \frac{\partial T_4}{\partial x_3} \Big|_{G_{3-}} = \lambda_{s3} \frac{\partial T_1}{\partial x_3} \Big|_{G_{3+}}, \quad T_4 \Big|_{G_{3-}} = T_1 \Big|_{G_{3+}}, \quad T_1 \Big|_{G_3} = T_2 \Big|_{G_3}, \\ \lambda_{s1} \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \Big|_{G_{2-}} = \lambda_g \frac{\partial T_3}{\partial x_1} \Big|_{G_{2+}}, \quad T_1 \Big|_{G_{2-}} = T_3 \Big|_{G_{2+}}, \quad T_1 \Big|_{G_2} = T_2 \Big|_{G_2}; \end{aligned} \quad (13)$$

на грани бетонной подложки и почвы F_1 задается условие тепловой изоляции, а на остальных границах F_2, \dots, F_5 — начальная температура

$$\frac{\partial T_4}{\partial x_1} \Big|_{F_1} = 0, \quad T_4 \Big|_{F_i} = T_n, \quad i = 2, \dots, 5. \quad (14)$$

Здесь F_i , $i = 1-4$, G_j , $j = 1-6$ — грани параллелепипеда (см. рис. 1), где G_1 — грань параллелепипеда, G_2 , G_3 — плоскости сопряжения древесина–воздух, древесина–бетон; d_1 — толщина воздушного слоя вдоль оси x_1 (рис. 1), x_1 , x_2 , x_3 — оси декартовой системы координат, α_c — коэффициент теплообмена.

Начальная температура задается на остальных гранях параллелепипеда, так как тепловая волна за время окончания теплового воздействия не доходит до этих границ,

$$\begin{aligned} T_1|_{G_j} = T_2|_{G_j} = T_n, \quad j = 4, 5, 6, \\ T_3|_{S_i} = T_n, \quad i = 2, \dots, 5, \end{aligned} \quad (15)$$

где $S_i, i = 1, \dots, 5$ — грани параллелепипеда.

Используя аналогию процессов тепло- и массообмена [7] ($\beta_e = \alpha_e / c_{p5}$), имеем граничные условия

$$\beta_e(c_{\alpha,e} - c_{\alpha,w}) = \varphi_5 \rho_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} \Big|_{G_*}, \quad \beta_{G_1}(c_{\alpha,G_1} - c_{\alpha,w}) = \varphi_5 \rho_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} \Big|_{G_1}, \quad (16)$$

где β_e — коэффициент массообмена.

На гранях G_2 и G_3 задается условие — отсутствие выгорания концентраций компонент:

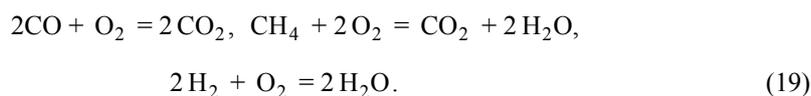
$$\frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} \Big|_{G_2} = 0, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_3} \Big|_{G_3} = 0, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-1; \quad (17)$$

на остальных гранях (G_4, G_5, G_6) берутся начальные значения концентраций, отвечающие начальной температуре T_n . Кроме того, задается равенство давления в порах на границах $G_i, i = 1, \dots, 6$ и во внешне среде, а также учитывается условие непротекания газовой смеси на границе бетонной подложки G_3 :

$$\begin{aligned} c_\alpha \Big|_{G_i} = c_{\alpha n}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-1, i = 4, 5, 6, \\ P \Big|_{G_*} = P_e, \quad P \Big|_{G_i} = P_n, \quad i = 1, \dots, 6, \quad \frac{\partial P}{\partial x_3} \Big|_{G_3} = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

2. Коэффициенты переноса, теплофизические и термокинетические постоянные

Известно [6, 8], что итоговыми гомогенными химическими реакциями в проникаемом слое древесины являются:



Уравнения химической кинетики для реакций окисления оксида углерода, метана и водорода имеют вид [18]

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} = -k_1 x_1 x_3^{0,25} T_2^{-2,5} \exp\left(-\frac{E_1}{RT_2}\right) = -r_1, \quad \frac{dy_2}{dt} = -k_2 x_5^{-0,5} x_3^{1,5} \frac{P}{T_2} \times \\ \times \exp\left(-\frac{E_2}{RT_2}\right) = -r_2, \quad \frac{dy_3}{dt} = -k_3 y_3 y_6^{1,5} \exp\left(-\frac{E_3}{RT_2}\right) = -r_3, \end{aligned} \quad (20)$$

где $E_i, i = 1, 2, 3$ — энергия активации гомогенных реакций окисления (19); $E_{is}, i = 1, 2, 3$ — энергия активации реакций $R_{1s}, R_{2s}, R_{3s}, R_{4s}$, определяемых ниже; k — постоянная Больцмана, $k_i, i = 1, 2, 3$ — предэкспоненциальные множители реакций

окисления (20), $x_j = c_j M / M_j$, $j = 1, \dots, 5$ — молярная концентрация, $y = \rho c_i / M_i$, $i = \overline{1, 6}$ — молярно-объемная концентрация.

Для испарения связанной воды в многофазной среде — древесине — используется аналог закона Герца–Кнудсена [6, 19]

$$R_{2s} = \frac{s_2 M_2 A_s \varphi_2 [k_{2s} \exp(-E_{2s} / RT_1) - P_2]}{(2\pi RT_1 M_2)^{0,5}}, \quad (21)$$

здесь A_s — коэффициент аккомодации; k_{is} , $i = \overline{1, 3}$ — предэкспоненциальные множители реакций R_{1s} , R_{2s} , R_{3s} ; s_2 — удельная поверхность испарения воды. Для нахождения парциального давления паров воды в слое торфа P_2 используется закон Дальтона [19], согласно которому $P_2/P = x_2$. Тогда получаем $P_2 = P c_2 (M/M_2)$, где давление смеси газов P находится из последней формулы (10).

Эффективный коэффициент диффузии берется по формуле Фристрона–Вестенберга [7, 20]

$$D_\alpha = (1 - c_\alpha) \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq \alpha}}^N x_j / d_{\alpha,j} \right)^{-1}, \quad d_{\alpha,j} = 1,66 \cdot 10^{-7} \frac{[(M_\alpha + M_j)/(M_\alpha M_j)]^{0,5} T_2^{1,5}}{P \sigma_{j,\alpha}^2 (\varepsilon_{j,\alpha} / kT_2)^{0,17}},$$

где $\varepsilon_{j,\alpha}$ — потенциальная энергия взаимодействия молекул, $\sigma_{i,j}$ — сечения взаимодействия молекул. Формула для коэффициентов теплопроводности компонента газовой фазы λ_j , $j = 1, 2, \dots, N$ взята из работы [21]

$$\lambda_5 = \sum_{i=1}^N \lambda_i c_i, \quad \lambda_j = \lambda_j^0 (0,115 + 0,354 \frac{c_{p,j}}{R}), \quad \lambda_i^0 = 8,32 \cdot 10^{-2} \frac{(M_i / T_2)^{0,5}}{\sigma_i^2 (\varepsilon_i / kT_2)^{0,147}},$$

$$c_{p5} = \sum_{j=1}^N c_{p,j} c_j, \quad \lambda_{sj} = \lambda_{sj}^s + \sum_{i=2}^4 \lambda_{\varphi_i}^s \varphi_i, \quad j = 1, 2, 3. \quad (22)$$

Коэффициенты теплоемкости компонента газовой фазы $c_{p,j} = a_j + b_j T_2 + c_j / T_2^2$, $j = 1, \dots, 7$ взяты из работы [22].

Выражения для $R_1 - R_6$, Q , $R_{1s} - R_{4s}$ в уравнениях (2), (8), (9) имеют вид [8, 9]:

$$R_1 = \eta_1 R_{1s} - M_1 r_1, \quad R_2 = \eta_2 R_{1s} - R_{2s} + 2 M_2 (r_2 + r_3), \quad R_3 = -\eta_3 R_{3s} -$$

$$- M_3 (r_1 + 2 r_2 + r_3), \quad R_4 = M_4 (2 r_1 + r_2), \quad R_5 = \eta_4 R_{1s} - M_5 r_2,$$

$$R_6 = \eta_5 R_{1s} - 2 M_6 r_3, \quad R_{1s} = k_{1s} \rho_{1s} \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_{1s}}{RT_1}\right), \quad Q = (1 - \alpha_c) R_{1s} + R_{2s} + R_{3s},$$

$$R_{3s} = \frac{M_c}{M_3} s_3 k_{3s} \varphi_5 \rho_5 \varphi_3 c_3 \exp\left(-\frac{E_{3s}}{RT_1}\right), \quad R_{4s} = \alpha_4 R_{3s}, \quad \mu = \mu_H \left(\frac{T_2}{T_H}\right)^{0,5}, \quad (23)$$

$$\alpha_c = \frac{M_c}{M_H - M_c}, \quad \eta_1 = \frac{M_1}{M_H}, \quad \eta_2 = \frac{M_2}{M_H}, \quad \eta_3 = \frac{M_3}{M_c}, \quad \eta_4 = \frac{M_5}{M_H}, \quad \eta_5 = \frac{M_6}{M_H},$$

здесь s_3 — удельная поверхность реагирования углерода, S_i , $i = 1, \dots, 5$ — грани параллелепипеда, η_i , $i = \overline{1, 5}$ — безразмерные параметры.

Сухая древесина представляет собой двухфазную систему [4], включающую в себя древесинное вещество (целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин) и воздух. Однако доля воздуха (по массе) в древесине крайне мала, и теплоемкость сухой древесины практически равна теплоемкости древесинного вещества. Поскольку состав древесинного вещества у всех пород одинаков, удельная теплоемкость древесины не зависит от породы и плотности и по данным работы [4] при 273 К для абсолютно сухой древесины равна $1,55 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К). С повышением температуры удельная теплоемкость древесины несколько повышается по линейному закону и при 373 К увеличивается примерно на 25 %.

Представленные в формуле (22) коэффициенты теплопроводности сухой древесины в продольном направлении λ_{1j}^s , $j = 1, 2, 3$, как известно из работ [2, 4, 5], в два раза выше, чем в поперечном, и в зависимости от плотности породы определяется в виде [2]

$$\lambda_{1j}^s = \lambda_{dr}^s K_\rho N. \quad (24)$$

где λ_{dr}^s — коэффициент теплопроводности абсолютно сухой древесины, взятой из работы [2], K_ρ — коэффициент, учитывающий базисную (условную) плотность древесины, N — учитывает направление теплового потока. Для тангенсального направления поперек волокон (по касательной к годичным слоям) $N = 1$, для радиального — $N = 1,15$; вдоль волокон хвойных и рассеянно-сосудистых пород (береза, лиственница, тополь, сосна, ель, кедр) $N = 2,2$, для кольцесосудистых (дуб) $N = 1,6$. Значения K_ρ и базисной плотности ρ_{bas} взяты из работы [4].

В табл. 1 приведены K_ρ в порядке возрастания базисной плотности: ель, тополь, сосна, береза, лиственница, дуб.

В табл. 2 даны плотности нормализованной ρ_n и абсолютно сухой древесины ρ_{1s} , коэффициент теплопроводности поперек и вдоль волокон древесины, коэффициент температуропроводности $\chi_{11}^s = \lambda_{11}^s / (\rho_{1s} c_{1s})$, начальная объемная доля сухой древесины $\varphi_{1н}$ определенной породы и начальная пористость. Начальная объемная доля связанной воды $\varphi_{2н}$ вычисляется по формуле [6] $\varphi_{2н} = (\rho_n - \rho_{1s} \varphi_{1н}) / \rho_{2s}$.

Таблица 1
Коэффициент, учитывающий базисную плотность древесины

Параметры	Ель	Тополь	Сосна	Береза	Лиственница	Дуб
ρ_{bas}	360	360	400	500	520	550
K_ρ	1,0	1,0	1,05	1,22	1,29	1,36

Таблица 2
Зависимости плотности, коэффициентов теплопроводности и температуропроводности, начальной объемной доли сухого реагента и начальной пористости от породы древесины

Параметры	Ель	Тополь	Сосна	Береза	Лиственница	Дуб
ρ_n , кг/м ³	445	455	500	630	660	690
ρ_{1s} , кг/м ³	420	430	470	600	630	650
λ_{11}^s , Вт/(м·К),	0,134	0,134	0,14	0,163	0,174	0,182
λ_{12}^s , Вт/(м·К),	0,1163	0,1163	0,122	0,142	0,15	0,158
λ_{13}^s , Вт/(м·К)	0,256	0,256	0,268	0,312	0,33	0,253
$\chi_{11}^s \cdot 10^4$, м ² /с	0,1772	0,1731	0,1655	0,1509	0,1534	0,1555
$\varphi_{1н}$	0,28	0,29	0,307	0,374	0,404	0,434
$\varphi_{2н}$	0,552	0,545	0,515	0,436	0,393	0,362

3. Методика расчета и исходные данные

Система уравнений (2)–(9) с краевыми условиями (11)–(18) решалась численно при помощи итерационно-интерполяционного метода [23]. Для варианта породы сосны с параметрами $\varphi_{1н} = 0,307$, $\varphi_{2н} = 0,178$, $\rho_{1с} = 470 \text{ кг/м}^3$ и входными данными из текущего раздела была проделана процедура тестирования численного метода. Для решения математической модели использовалась последовательность сгущающихся сеток по пространству: $h_{x_1} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $h_{x_3} = 0,09375 \text{ м}$, $h_{x_2} = 0,125 \text{ м}$, и задавалось $h_i = 2h_{x_i}$, $h_i = h_{x_i} / 2$, $h_i = h_{x_i} / 4$, $i = 1, 2, 3$, где h_{x_i} , $i = 1, 2, 3$ — опорные шаги разностной схемы по пространственным координатам.

Фиксировались следующие параметры: время зажигания t_* древесины, когда максимальная температура в образце достигает 1250 К, температура каркаса и газа в различные моменты времени, а также среднее значение скорости горения древесины от времени. При этом шаг по времени был переменным и вырабатывался автоматически с заданной точностью, одинаковой для всех сеток по пространству.

Погрешность времени зажигания t_* падала: $\varepsilon_1 = 16,4 \%$, $\varepsilon_2 = 7,3 \%$, $\varepsilon_3 = 3,7 \%$; тенденция уменьшения погрешности по температуре древесины сохранялась: $\varepsilon_1 = 7,4 \%$, $\varepsilon_2 = 2,5 \%$, $\varepsilon_3 = 1,8 \%$. Расхождение результатов по средней скорости горения также снижалось: $\varepsilon_1 = 18,5 \%$, $\varepsilon_2 = 11,4 \%$, $\varepsilon_3 = 5,6 \%$. Ниже результаты расчета получены для шагов по пространству $h_{x_1} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $h_{x_3} = 0,04687 \text{ м}$, $h_{x_2} = 0,0625 \text{ м}$.

Линейная скорость горения древесины определялась по формуле

$$\omega = \frac{(\Delta x)_*}{(\Delta t)_*} = \frac{x_{1(k)} - x_{1(k-1)}}{t_{*(k)} - t_{*(k-1)}}. \quad (25)$$

В выражении (25) $t_{*(k)}$ и $t_{*(k-1)}$ — время достижения температуры горения T_* при $x_1 = x_{1(k)}$ и $x_{1(k-1)}$, где k — текущий, а $(k-1)$ — предыдущий слой по x_1 в центре ($x_2 = 0,5L_2$, $x_3 = c_*$, $c_* = d_3 + a/2$, где d_3 — толщина бетонной подложки, a — высота грани G_* вдоль оси x_3 , c_* — центр очага горения в области G_* , L_i , $i = 1, 2, 3$ — длины сторон параллелепипеда) области G_* на рис. 1. Для теплофизических и термокинетических параметров древесины использовались данные работ [4–6, 11, 14, 15, 18–22]. Теплофизические характеристики воды и водяного пара брались из [24].

В табл. 3–5 приведены теплофизические, термокинетические коэффициенты древесины, теплофизические коэффициенты воздуха, бетона, значения массовых концентраций компонент при начальной температуре, а также молекулярные веса компонент газовой фазы и тепловые эффекты реакций (19).

Таблица 3
Теплофизические и термокинетические коэффициенты древесины

$\rho_{2с}^s$, кг/м ³	$\rho_{3с}^s$, кг/м ³	$\rho_{4с}^s$, кг/м ³	$c_{1с}^s$, Дж/кг·К	$c_{2с}^s$, Дж/кг·К	$c_{3с}^s$, Дж/кг·К	$c_{4с}^s$, Дж/кг·К	$\lambda_{\varphi_2}^s$, Вт/(м·К)	$\lambda_{\varphi_3}^s$, Вт/(м·К)	$\lambda_{\varphi_4}^s$, Вт/(м·К)
2000	130	130	1800	2090	1020	1020	0,6	0,041	0,041
$E_{1с}^s$, кДж/ моль	$E_{2с}^s$, кДж/ моль	$E_{3с}^s$, кДж/ моль	$q_{1с}^-$, кДж/ моль	$q_{1с}^+$, кДж/ моль	$q_{2с}^s$, кДж/ моль	$q_{3с}^s$, кДж/ моль	$k_{1с}^s$, с ⁻¹	$k_{2с}^s$, с ⁻¹	$k_{3с}^s$, с ⁻¹
62,15	16,76	50,28	$-2 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^6$	$-2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^5$

Таблица 4
Теплофизические коэффициенты воздуха, бетона и значения массовых концентраций компонент при начальной температуре

$\rho_g, \text{кг/м}^3$	$\rho_b, \text{кг/м}^3$	$c_{pg}, \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	$c_{pb}, \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda_g, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\lambda_b, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
1,29	2450	1004	1130	0,0253	1,75
$c_{1н}$	$c_{2н}$	$c_{3н}$	$c_{4н}$	$c_{5н}$	$c_{6н}$
0,2	0,005	0,23	0,001	0,1	0,05

Таблица 5
Молекулярные веса компонент газовой фазы и тепловые эффекты реакций (19)

$M_1, \text{кг/кмоль}$	$M_2, \text{кг/кмоль}$	$M_3, \text{кг/кмоль}$	$M_4, \text{кг/кмоль}$	$M_5, \text{кг/кмоль}$	$M_6, \text{кг/кмоль}$	$M_7, \text{кг/кмоль}$	$q_1, \text{Дж/кг}$	$q_2, \text{Дж/кг}$	$q_3, \text{Дж/кг}$
28	18	32	44	16	2	28	$2,81 \cdot 10^5$	$4,04 \cdot 10^5$	$2,31 \cdot 10^5$

Приведенные ниже результаты получены при $T_n = 293 \text{ К}$, $T_* = 560 \text{ К}$, $T_e = 1300 \text{ К}$, $\alpha_e = 1,5 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м}^2)$, $\omega_* = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$, $P_e = P_n = 1,013 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2$, $\mu_n = 1,81 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$, $q_\sigma = 1,2 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$, $A_v = 4 \cdot 10^5 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{К)}$, $d_p = 10^{-6} \text{ м}$, $\alpha_{G_1} = 1,0 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м}^2)$, $M_n = 130 \text{ кг/кмоль}$, $M_c = 12 \text{ кг/кмоль}$, $d_1 = 0,5 \text{ м}$, $d_3 = 0,5 \text{ м}$, $L_1 = 0,05 \text{ м}$, $L_2 = 4 \text{ м}$, $L_3 = 3 \text{ м}$, $a = 1,0 \text{ м}$, $c_* = 1 \text{ м}$, $R = 8,314 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$, $A_s = 0,08$, $c_{\alpha,e} = c_{\alpha,n}$, $\alpha = 1, 2, 4, 5, 6$, $c_{3e} = 10^{-3}$, $\varphi_{1н} = 0,28-0,434$, $\varphi_{3н} = 10^{-3}$, $\varphi_{4н} = 10^{-5}$, $s_2 = 0,05$, $s_3 = 0,2$, $\alpha_4 = 0,7$.

4. Результаты численного решения и их анализ

Временем зажигания древесины назовем величину $t = t_*$, при которой для $T_{1w} \geq T_*$ скорость горения ω равна или превышает характерную величину ω_* , а температура поверхности реагента резко возрастает до $T_m = 1250 \text{ К}$ ($T_m = \max(T_1, T_2)$). Для определенности полагалось, что величина температуры $T_* = 560 \text{ К}$ и скорости горения $\omega_* = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ известны из экспериментальных данных [11]. При $q_\sigma = 0$ наступает режим отсутствия горения реагента, при котором его скорость сравнима со скоростью пиролиза древесины $\omega_* \approx 10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$.

В табл. 6 приведено время зажигания различных пород древесины. Видно, что для неплотных пород $\rho_{1s} \leq 470 \text{ кг/м}^3$ с большой начальной пористостью $\varphi_{5н} \geq 0,515$ время t_* увеличивается с ростом доли воздуха, который снижает эффективный коэффициент теплопроводности λ_{sj} , $j = 1, 2, 3$ и увеличивает время прогрева образцов. Для плотных пород $\rho_{1s} \geq 600 \text{ кг/м}^3$ с малой начальной пористостью $\varphi_{5н} \leq 0,436$ (см. табл. 2) время зажигания t_* практически остается постоянным, что связано с незначительным изменением коэффициента температуропроводности χ_{11}^s (см. табл. 2), который определяет инерционность материала, т. е. его способность выравнять температуру древесины

Таблица 6
Время зажигания различных пород древесины

Порода древесины	Ель	Тополь	Сосна	Береза	Лиственница	Дуб
$t_*, \text{мин}$	5,175	4,655	1,918	1,458	1,462	1,467

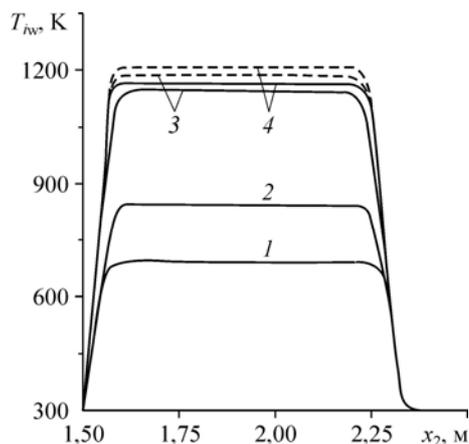


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности сосны каркаса T_{1w} (сплошные кривые) и газа T_{2w} (штриховые кривые) от продольной переменной x_2 при $x_3 = c_*$ в различные моменты времени.

1(1), 1,887(2), 1,906(3), 1,918(4) мин.

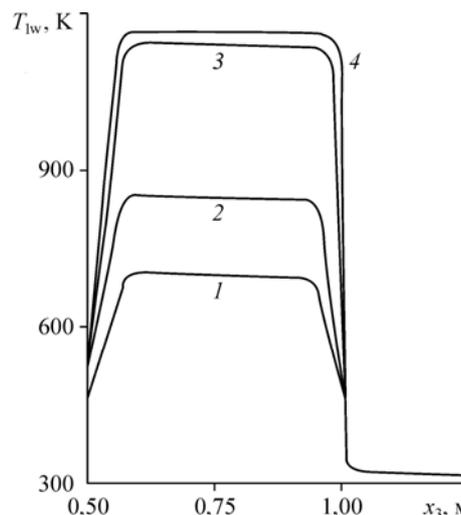


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности каркаса сосны от вертикальной переменной x_3 при $x_2 = L_2/2$ в те же моменты времени, что и на рис. 2.

при нагреве или охлаждении. Низкая теплопроводность ели, тополя и сосны позволяет брать значительно меньшую их толщину для деревянных ограждений, чем для пород 4–6 из табл. 2.

На рис. 2 дано распределение температур поверхности сосны каркаса T_{1w} и газа T_{2w} (сплошные и штриховые кривые соответственно) по продольной переменной x_2 при $x_3 = c_*$ в различные моменты времени: 1 (1), 1,887 (2), 1,906 (3), 1,918 (4) мин. Видно, что до момента времени зажигания $t < 1,906$ мин (далее на рис. 4 режиму зажигания $t = t_*$ будет отвечать кривая 3, имеющая максимум T_1) температура газа и каркаса древесины практически совпадают. Затем, при $t \geq t_*$, в результате тепловыделения от экзотермической реакции окисления оксида углерода (19), температура газовой фазы T_{2w} превышает температуру каркаса T_{1w} . Добавим, что в силу пространственного теплообмена (краевых эффектов) очага горения и стены дерева с окружающей относительно холодной средой (бетоном и воздухом) температура древесины резко падает на границах $x_2 = 1,5$ м и $x_2 > 2,25$ м (см. рис. 1).

На рис. 3 дана зависимость температуры поверхности каркаса сосны по вертикальной переменной x_3 ($x_2 = L_2/2$). Как видно из рис. 3, при $t = t_*$ температура на стыке древесины с подложкой ($x_3 = d_3$) на 630 К выше, чем при ее отсутствии ($x_3 > 1$ м), вследствие стока тепла в бетон, у которого коэффициент теплопроводности почти на порядок выше.

На рис. 4 изображено распределение температуры каркаса сосны по глубине слоя x_1 при $x_3 = c_*$, $x_2 = L_2/2$ (см. рис. 1); режиму зажигания отвечают кривые, имеющие выпуклость вверх или максимум. На рис. 5 представлено поле концентраций компонентов в проницаемом реагенте в те же моменты времени, что и на рис. 2 и во входных данных из раздела 3. На рис. 6 представлены объемные доли компонентов пористой среды по глубине слоя для исходного реагента φ_1 , связанной воды φ_2 , кокса φ_3 , пепла φ_4 при входных данных рис. 2. Из анализа результатов численного решения следует, что

Рис. 4. Зависимость температуры каркаса сосны в пористом слое реагента от поперечной переменной x_1 при $x_2 = L_2/2$, $x_3 = c_*$ в те же моменты времени, что и на рис. 2.

с ростом температуры проникаемого фрагмента среды сначала имеет место прогрев и испарение связанной воды, при этом объемная доля связанной воды при $T_1 > 373\text{ К}$ исчезает, превращаясь в концентрацию паров H_2O (рис. 5, *a*). В области высокой температуры ($T_1 > 450\text{ К}$) начинается процесс пиролиза исходного реагента с появлением основной массы паров воды, углекислого газа CO_2 и кокса (рис. 6, кривые для φ_3). Далее продукт пиролиза — кокс — начинает выгорать (тлеть) вглубь фрагмента пористой среды с образованием золы (рис. 6, кривые для φ_4) в результате экзотермической реакции окисления. Надо отметить, что водород H_2 и метан CH_4

(см. рис. 5, *b*) при $T_2 \leq 1300\text{ К}$ практически не окисляются в ходе гомогенных реакций из формул (19) с образованием CO_2 и H_2O , т. к. концентрации H_2 и CH_4 малы или изменяются незначительно в силу низких температур реагирующей среды. Известно [18], что вторая и третья газофазные реакции окисления из выражения (19) активизируются при $T_2 > 1300\text{ К}$.

Отметим, что колебания температуры в окрестности нагреваемой поверхности в моменты времени, близкие к зажиганию $t = t_*$ (кривые 3, 4 на рис. 4), связаны с эффектом выделения тепла от реакции синтеза древесины, с одной стороны, и с релаксационными процессами теплопроводности, а также выдувом газообразных продуктов разложения из разгорающихся пор, с другой стороны.

Представляет интерес исследование влияния содержания начальной объемной доли влаги $\varphi_{2\text{H}}$ на скорость процесса горения древесины. С уменьшением объемной доли влаги с $\varphi_{2\text{H}} = 0,25$ до $\varphi_{2\text{H}} = 0,2$ или $0,15$ для значения $\varphi_{1\text{H}} = 0,374$ (порода березы в табл. 2) имеет место уменьшение времени зажигания $t_* = 1,648, 1,445, 1,258$ мин. Это связано, в основном, с уменьшением затрат тепловой энергии на испарение связанной воды в древесине.

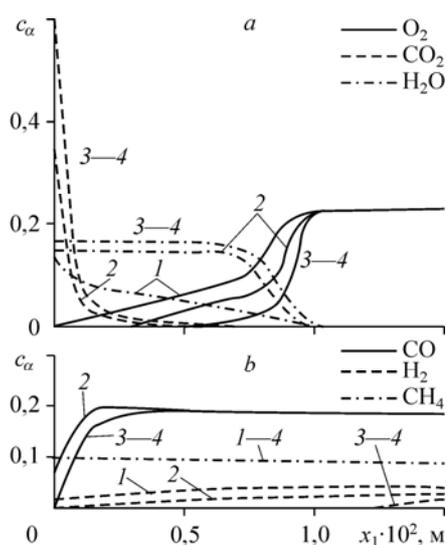
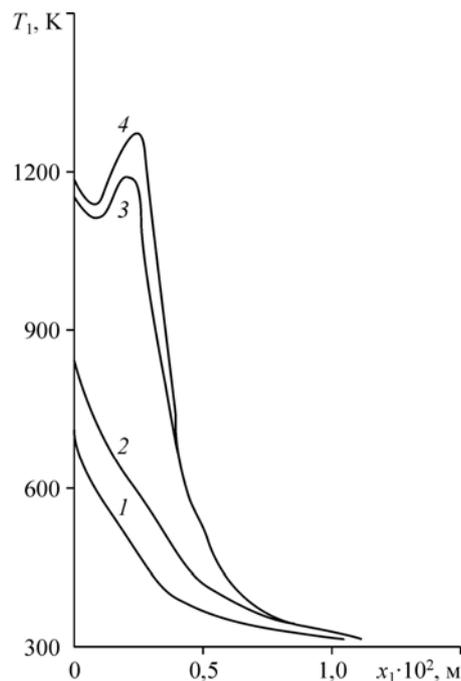


Рис. 5. Распределение безразмерных концентраций компонент по глубине x_1 образца сосны при $x_2 = L_2/2$, $x_3 = c_*$ в те же моменты времени, что и на рис. 2.



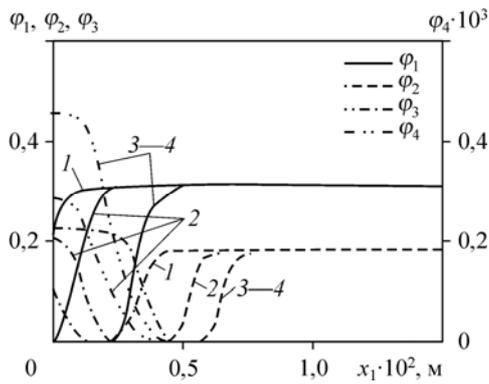


Рис. 6. Распределение безразмерных объемных долей по глубине x_1 образца сосны при $x_2 = L_2/2$, $x_3 = c_*$ в те же моменты времени, что и на рис. 2.

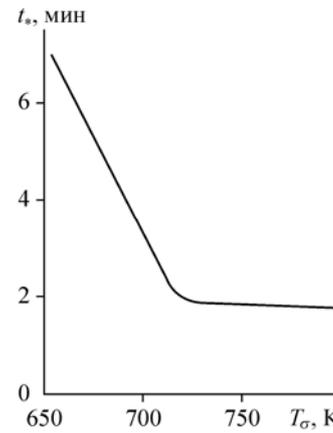
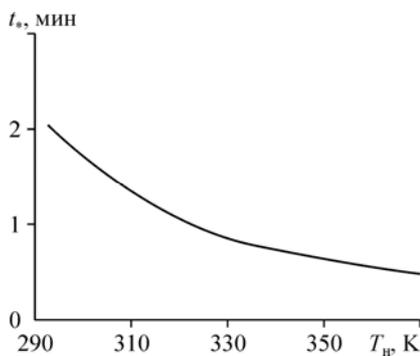


Рис. 7. Зависимость времени зажигания сосны от температуры T_σ , отвечающей кратковременному воздействию потока излучения.

Опираясь на данные работы [25], исследуем влияние кратковременного воздействия излучения на процесс зажигания сосны, когда максимальная температура поверхности достигает определенного значения T_σ при $Q_w = q_w + q_\sigma$ ($q_\sigma \neq 0$), а затем реагент разрушается только под действием конвективного теплового потока $Q_w = q_w$ ($q_\sigma = 0$). Из анализа рис. 7 видно, что время задержки зажигания (t_*) образца сосны с ростом T_σ уменьшается при низких температурах $T_\sigma < 725$ К, а потом сохраняет практически постоянное значение при высоких температурах $T_\sigma \geq 725$ К. Уменьшение t_* связано с тем, что поглощенный лучистый поток тепла в прогретом слое образца с увеличением T_σ растет. Поэтому при дальнейшем увеличении $T_\sigma \geq 725$ К имеют место быстрый рост температуры поверхности образца (кривые 3 и 4 на рис. 2) и зажигание реагента в силу низкой теплопроводности сухой древесины, и при $T_\sigma > 725$ К поглощенная энергия излучения практически не влияет на время задержки зажигания.

На рис. 8 отображены результаты, полученные в ходе зажигания образца сосны с различными начальными данными температуры T_n и влаги (объемной доли ϕ_{2n}). Видно, что время зажигания образца, предварительно нагретого до температуры 370 К, меньше, чем образцов при $T_n < 370$ К. Это обусловлено уменьшением затрат энергии на нагрев и испарения связанной воды в древесине.

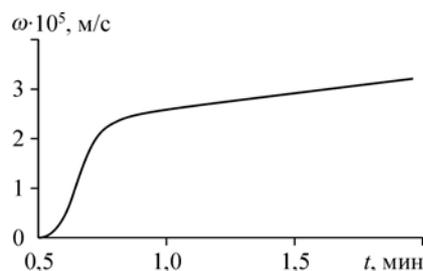


Этот результат качественно согласуется с экспериментальными данными статьи [25].

На рис. 9 приведена величина линейной скорости процесса горения сосны от времени для входных данных рис. 2. Видно, что имеет место постепенно ускоряющееся распространение пламени и быстрый рост температуры реагента

Рис. 8. Зависимость времени зажигания сосны от начальной температуры реагента.

Рис. 9. Зависимость линейной скорости горения сосны ω по глубине образца x_1 при $x_2 = L_2/2$, $x_3 = c_*$ от времени.



(кривые 3 и 4 на рис. 4), при этом среднее значение скорости горения древесины по порядку величины согласуется с экспериментальными данными [11].

Выводы

1. Дана постановка задачи о зажигании пространственной стенки из дерева, расположенной на подложке из бетона, с учетом процессов сушки, пиролиза, окисления газообразных и конденсированных продуктов и конкретной базы данных.
2. Установлено, что время зажигания древесины определяется интенсивностью внешнего очага горения, породой древесины, процессами сушки, пиролиза, экзотермической реакцией окисления оксида углерода, а также начальным содержанием влаги и начальной температурой образца.
3. Показано качественное и количественное согласование некоторых результатов расчета с известными экспериментальными данными [11, 25].

Индексы

w — нагреваемая сторона поверхности древесины	b — бетон,
при $x_1 = 0$, 1 внизу — каркас древесины,	g — воздух,
2 — газовая фаза в пористом реагенте,	p — пора,
s внизу и сверху — конденсированная фаза,	v — объем,
e — внешняя среда,	bas — базисный,
$*$ — характерная величина,	σ — лучистый поток тепла из газовой фазы,
c — кокс,	dg — сухая древесина,
n — начальное значение,	n — нормализованная плотность древесины,
1, ..., 7 — в газовой фазе соответствуют оксиду	m — максимальная величина,
углерода, парам воды, кислороду, диоксиду	знаки \pm сверху соответствуют реакциям синтеза
углерода, метану, водороду, азоту,	и разложения при пиролизе древесины,
1s, ..., 4s — в конденсированной фазе соответст-	
вуют древесине, связанной воде, коксу, золе,	

Список литературы

1. Шойгу С.К., Копылов Н.П., Баратов А.Н. и др. Пожарная безопасность. Энциклопедия. М.: МЧС России, ФГУ ВНИИ ПО МЧС России, ЗАО «Голден-Би», 2007. 405 с.
2. Перельгин Л.М., Уголев Б.Н. Древесиноведение. М.: Лесная промышленность, 1971. 286 с.
3. Харук Е.В. Проницаемость древесины газами и жидкостями. Новосибирск: Наука, 1976. 187 с.
4. Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. М.: Лесная промышленность, 1986. 366 с.
5. Глухарева М.И., Дроздов Н.П., Ермакова Л.А. и др. Справочник лесохимика. М.: Лесная промышленность, 1974. 376 с.
6. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981. 277 с.
7. Гришин А.М., Фомин В.М. Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. Новосибирск: Наука, 1984. 319 с.
8. Гришин А.М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // Успехи механики. 2002. Т. 1, № 4. С. 41–89.
9. Гришин А.М. Общая физико-математическая модель зажигания и горения древесины // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2010. № 2 (10). С. 60–70.
10. Гришин А.М., Пугачева П.В. Аналитическое решение задачи о зажигании стены деревянного дома в результате действия фронта лесного пожара // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2010. № 3 (11). С. 88–94.

11. Демидов П.Г. Горение веществ и способы тушения. М.: Министерство коммунального хозяйства РСФСР, 1955. 106 с.
12. Козлов В.Н., Нимвицкий А.А. Технология пирогазетической переработки древесины. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1954. 619 с.
13. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977. 239 с.
14. Богомолов В.Д., Соколов В.М., Чудинова А.С. Кинетические параметры процесса щелочной делигнификации древесины // Лесной журнал. 1976. № 1. С. 109–115.
15. Гришин А.М., Якимов А.С., Миков В.Л. Режимы воспламенения стеклопластиковой трубы с учетом смешанной конвекции окислителя // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 2. С. 13–22.
16. Калинин Г.А., Миков В.Л., Морозова Т.П. Исследование полиаминоамидного связующего методом комплексного термического анализа // Изв. Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1981. № 2. С. 164–167.
17. Гришин А.М., Голованов А.Н., Якимов А.С. Сопряженный теплообмен в композиционном материале // Прикл. механ. и техн. физика. 1991. № 4. С. 141–148.
18. Щетников Е.С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965. 739 с.
19. Алексеев Б.В., Гришин А.М. Физическая газодинамика реагирующих сред. М.: Высшая школа, 1985. 464 с.
20. Campbell E.C., Fristrom R.M. Reaction kinetics thermodynamics and transport in the hydrogen bromine system // Chem. Rev. 1958. Vol. 38, No. 2. P. 173–234.
21. Померанцев В.В. Основы практической теории горения. Л.: Энергия, 1973. 264 с.
22. Мищенко К.П., Равдель А.А. Краткий справочник физико-химических величин. Л.: Химия, 1972. 200 с.
23. Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н., Субботин А.Н., Якимов А. С. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. 320 с.
24. Вукалович М.П., Ривкин С.А., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Изд-во Стандартов, 1969. 430 с.
25. Кузнецов В.Т., Фильков А.И. Воспламенение различных видов древесины потоком лучистой энергии // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47, № 1. С. 74–79.

*Статья поступила в редакцию 7 июня 2012 г.,
после доработки 29 ноября 2012 г.*