

УДК 536.16:536.245.022

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЧАСТИЦАМИ, НАГРЕТЫМИ ДО ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Д. П. Касымов, В. В. Перминов, Е. Н. Голубничий, А. С. Якимов

Томский государственный университет, 634050 Томск, yakimovas@mail.ru

Выполнено численное моделирование зажигания конструкции из древесного материала набором «горячих» частиц. Задача рассматривается в декартовых координатах в трехмерной постановке. Найдено, что зажигание исходного реагента определяется процессами теплообмена с очагом пожара, сушки, пиролиза сухой древесины, реакциями окисления оксида углерода, метана и водорода. Установлены зависимости времени задержки зажигания древесного материала от начальных температур реагента, нагретых частиц и количества «горячих» частиц, при которых реализуются условия зажигания. Приводится качественное сравнение результатов расчета с известными данными.

Ключевые слова: древесина, нагретые частицы, горение, зажигание, сопряженный теплообмен.

DOI 10.15372/FGV2022.9287

EDN SHHAVW

ВВЕДЕНИЕ

Лесные и городские пожары приводят к большим материальным потерям, разрушая жилые и промышленные здания. Довольно часто огонь возникает от вторичных источников зажигания (нагретых до высокой температуры частиц неметаллов или металлов [1]) и перебрасывается на деревянные строения [2]. Воспламенение деревянных конструкций может происходить из-за кондуктивного переноса тепла от нагретых частиц, которые часто накапливаются на крышах, внутри помещений, в углах зданий, заборов. Исследования показали, что тлеющие и горячие частицы играют ведущую роль как в воспламенении конструкций, так и в распространении огня [3, 4].

Согласно [5, 6] древесина представляет собой пористую реакционноспособную среду, физико-химические свойства которой изменяются при нагревании и горении. В данной работе для математического моделирования процессов зажигания и горения древесины использованы модели реагирующих сред, представленные в работах [7–9].

Отметим, что в работах [1, 10–12] результаты получены при моделировании зажигания композиционных материалов одиночной нагретой частицей в двумерной постановке. Изучение влияния пожаров на деревянные конструк-

ции в натуральных крупномасштабных экспериментах затруднено из-за плохой воспроизводимости результатов, их зависимости от внешних условий (переменный ветер, температура окружающей среды) [13], а также из-за высокой стоимости организации экспериментов. В основном эти проблемы решаются в лабораторных условиях, позволяющих с некоторыми допущениями частично моделировать воздействие «нагретых» частиц на образцы из дерева.

Наблюдение [7, 8, 14–16] за горением древесины позволяло выделить следующие основные этапы процесса: 1) нагрев от фронта городского 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 (кокса).

Цель настоящего исследования — создание физико-математической трехмерной модели зажигания конструкции из древесины. Моделируется случай, когда «нагретые» частицы (от 5 до 10 частиц), образованные во время пожара, скапливаются в углах зданий, на крышах, в жилых помещениях и приводят к их воспламенению.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

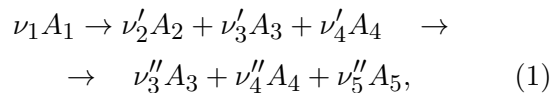
Будем считать, что зажигание и горение древесного материала (ДМ) происходит в результате кондуктивного взаимодействия с «нагретыми» инертными металлическими частицами. Фрагмент области взаимодействия представлен на рис. 1.

Рассмотрим пространственную задачу в параллелепипеде: нижний элемент 1 (область 1), на котором располагается элемент 2 (область 2 на заднем плане рис. 1), частицы находятся на элементе 1 и плотно (без зазора) примыкают к элементу 2. В общем случае теплофизические свойства элементов 1 и 2 могут различаться. Ось x_3 направлена вертикально вверх, начало координат находится на нижней стороне области 1. Ось x_2 идет от внешней стороны области 2 в направлении, как на рис. 1, а ось x_1 идет слева направо.

Горение древесины протекает в двух режимах: 1) кинетический режим, при котором скорость процесса определяется скоростью гетерогенных химических реакций окисления конденсированных продуктов пиролиза древесины; 2) диффузионный режим, при котором скорость разрушения древесины определяется скоростью диффузии окислителя (кислорода).

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: исходной сухой древесины, воды, конденсированного продукта пиролиза (кокса) и продукта горения кокса — пепла; 2) при горении древесины в результате нагревания имеет место необра-

тимая гомогенная реакция разложения



где A_i — исходное конденсированное вещество, $i = 1, \dots, 5$ соответствуют влажной древесине, связанной воде, конденсированному продукту пиролиза, газообразным горючим продуктам реакции пиролиза, пеплу; $\nu_1, \nu'_2, \nu'_3, \nu'_4, \nu''_3, \nu''_4, \nu''_5$ — соответствующие стехиометрические коэффициенты.

Первая стадия реакции пиролиза (1) включает в себя процесс разложения древесины [9, 17], который протекает с поглощением тепла, и процесс образования кокса, который может быть интерпретирован как реакция синтеза и носит экзотермический характер [6, 18, 19]. Вторая стадия — образование пепла из кокса, сопровождаемое экзотермическим эффектом. Считается, что значения энергии активации и предэкспонентов процессов разложения и синтеза близки, и поэтому первую стадию в целом можно моделировать как одностадийную химическую реакцию с переменным тепловым эффектом [18]. Температура перехода T_{1*} , при которой происходит смена эндотермического и экзотермического режимов, считается известной: $T_{1*} = 550$ K [14, 20].

Для упрощения анализа, следуя [9, 21, 22], будем предполагать, что: 1) древесина является двухтемпературной горючей недеформируемой пористой средой, состоящей из следующих фаз: $\varphi_1^{(i)}$ — сухое органическое вещество (сухая древесина состоит из лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы [5, 6, 20]), $\varphi_2^{(i)}$ — гигроскопическая вода, связанная с этим органическим веществом в порах [5, 6, 20], $\varphi_3^{(i)}$ — кокс (продукт пиролиза органического вещества), а также конденсированные и газообразные продукты горения (объемные доли $\varphi_4^{(i)}$ и $\varphi_5^{(i)}$); 2) газовая фаза в слое древесины состоит из семи компонентов [16]: CO , H_2O , O_2 , CO_2 , CH_4 , H_2 и N_2 , массовые концентрации которых $c_j^{(i)}$, $i = 1, 2$, $j = 1, \dots, n_1$; 3) в самом слое древесины происходит испарение связанной воды и учитывается процесс фильтрации. Везде далее верхний индекс $(i) = 1$ обозначает область 1, а $(i) = 2$ — область 2.

В целом считается, что фронт пожара при его заглублении в слой древесины состоит из зон прогрева, сушки, пиролиза, зоны горения

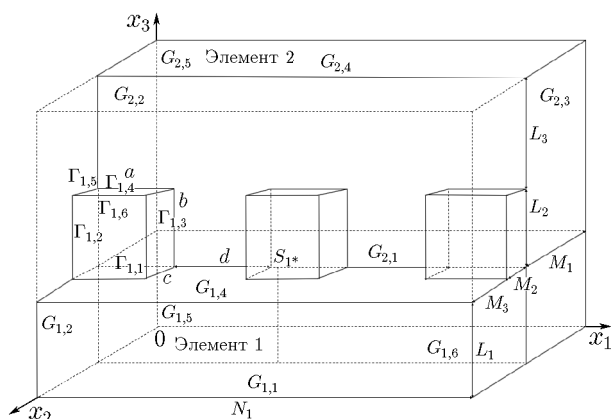


Рис. 1. Схема теплообмена образца древесного материала с «горячими» частицами

газообразных и конденсированных продуктов пиролиза высушенной древесины и из слоя пепла.

Предполагается, что воздушная среда, окружающая нагретые частицы и конструкцию из древесины, инертна и на первом этапе исследования не участвует в процессе тепло- и массообмена с частицами и ДМ.

Математически сформулированная выше задача с учетом сделанных допущений сводится к решению следующей системы уравнений [9, 21, 22]:

$$\frac{\partial \rho_5^{(i)} \varphi_5^{(i)}}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho_5^{(i)} \varphi_5^{(i)} \mathbf{W}_i) = Z_i, \quad i = 1, 2; \quad (2)$$

$$\operatorname{grad} p_i = -\frac{\mu_i}{\xi_i} \mathbf{W}_i - \rho_5^{(i)} g, \quad i = 1, 2; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^4 c_{pj}^{(i)} \rho_j^{(i)} \varphi_j^{(i)} \frac{\partial T_1^{(i)}}{\partial t} &= \sum_{k=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\lambda_{ks}^{(i)} \frac{\partial T_1^{(i)}}{\partial x_k} \right) + \\ &+ \sum_{j=1}^4 Q_{js}^{(i)} R_{js}^{(i)} + A_V (T_2^{(i)} - T_1^{(i)}), \quad i = 1, 2; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho_5^{(i)} \varphi_5^{(i)} c_{p5}^{(i)} \frac{dT_2^{(i)}}{dt} &= \operatorname{div} (\lambda_5^{(i)} \varphi_5^{(i)} \operatorname{grad} T_2^{(i)}) + \\ &+ \rho_5^{(i)} \varphi_5^{(i)} \operatorname{grad} T_2^{(i)} \sum_{j=1}^{n_1} c_{pj}^{(i)} D_j^{(i)} \operatorname{grad} c_j^{(i)} + \\ &+ \sum_{j=1}^3 q_j^{(i)} r_j^{(i)} - A_V (T_2^{(i)} - T_1^{(i)}) + \\ &+ c_{p1}^{(i)} (T_1^{(i)} - T_2^{(i)}) (1 - \alpha_c) R_{1s}^{(i)} + \\ &+ c_{p2}^{(i)} (T_1^{(i)} - T_2^{(i)}) R_{2s}^{(i)}, \quad i = 1, 2; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho_5^{(i)} \varphi_5^{(i)} \frac{dc_j^{(i)}}{dt} &= \operatorname{div} (\rho_5^{(i)} \varphi_5^{(i)} D_j^{(i)} \operatorname{grad} c_j^{(i)}) - \\ &- c_j^{(i)} Z_i + R_j^{(i)}, \end{aligned}$$

$$j = 1, \dots, n_1 - 1, \quad i = 1, 2. \quad (6)$$

Уравнение теплопроводности для нагретых частиц

$$\begin{aligned} \rho_3 c_{p3} \frac{\partial T_{3,k}}{\partial t} &= \operatorname{div} (\lambda_3 \operatorname{grad} T_{3,k}), \\ k &= 1, \dots, n_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Замыкающие переменные соотношения для уравнений (2)–(6) имеют вид:

$$\begin{aligned} \rho_1^{(i)} \frac{\partial \varphi_1^{(i)}}{\partial t} &= -R_{1s}^{(i)}, \quad \rho_2^{(i)} \frac{\partial \varphi_2^{(i)}}{\partial t} = -R_{2s}^{(i)}, \\ \rho_3^{(i)} \frac{\partial \varphi_3^{(i)}}{\partial t} &= \alpha_c R_{1s}^{(i)} - R_{3s}^{(i)} (1 + \alpha_4), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\rho_4^{(i)} \frac{\partial \varphi_4^{(i)}}{\partial t} = R_{4s}^{(i)};$$

$$\sum_{j=1}^{n_1} c_j^{(i)} = 1, \quad \varphi_5^{(i)} = 1 - \sum_{j=1}^4 \varphi_j^{(i)},$$

$$Y_i^{-1} = \sum_{j=1}^{n_1} \frac{c_j^{(i)}}{m_j}, \quad p_i = \frac{\rho_5^{(i)} R T_2^{(i)}}{Y_i},$$

$$R_{1s}^{(i)} = k_{1s} \rho_1^{(i)} \varphi_1^{(i)} \exp \left(-\frac{E_{1s}}{R T_1^{(i)}} \right),$$

$$Z_i = (1 - \alpha_c) R_{1s}^{(i)} + R_{2s}^{(i)} + R_{3s}^{(i)}, \quad (9)$$

$$R_{3s}^{(i)} = \frac{m_c}{m_3} s_3 k_{3s} \varphi_5^{(i)} \rho_5^{(i)} \varphi_3^{(i)} c_3^{(i)} \exp \left(-\frac{E_{3s}}{R T_1^{(i)}} \right),$$

$$R_{4s}^{(i)} = \alpha_4 R_{3s}^{(i)},$$

$$c_{p5}^{(i)} = \sum_{j=1}^{n_1} c_{pj}^{(i)} c_j^{(i)}, \quad \lambda_{js}^{(i)} = \lambda_{1j}^{s,i} \varphi_1^{(i)} + \sum_{k=2}^4 \lambda_{\varphi_k}^{s,i} \varphi_k^{(i)},$$

$$j = 1, 2, 3, \quad i = 1, 2.$$

Для описания испарения связанной воды в многофазной среде — древесине используется аналог закона Герца — Кнудсена [23]:

$$\begin{aligned} R_{2s}^{(i)} &= \frac{s_2 m_2 A_s \varphi_2^{(i)} [p_{2s} \exp(-E_{2s}/R T_1^{(i)}) - p^{(i)}]}{(2\pi R T_1^{(i)} m_2)^{0.5}}, \\ i &= 1, 2. \end{aligned} \quad (10)$$

Парциальное давление паров воды в слое ДМ $p^{(i)}$ в формуле (10) находится с использованием закона Дальтона [24], согласно которому $p^{(i)}/p_2 = y_2^{(i)}$. Тогда $p^{(i)} = p_i c_2^{(i)} (Y_i/m_2)$, где давление смеси газов p_i , $i = 1, 2$, определяется по четвертой формуле (9).

В статье используются следующие обозначения: a, c, b — продольный, поперечный размеры и высота частицы на рис. 1; A_s — коэффициент аккомодации; A_V — объемный коэффициент теплообмена между газовой и конденсированной фазами; c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; $c_j^{(i)}$, $j = 1, \dots, n_1$, — массовая концентрация компонентов; $G_{i,j}$, $i = 1, 2$, $j = 1, \dots, 6$, — грани параллелепипедов на рис. 1; g — ускорение свободного падения; d — расстояние между частицами; d_p — диаметр цилиндрических пор; D — коэффициент диффузии; E_i , $i = 1, 2, 3$, — энергия активации гомогенных реакций окисления (см. ниже формулы (20)); E_{is} , $i = 1, 2, 3$, — энергия активации реакций $R_{js}^{(i)}$, $i = 1, 2$, $j = 1, \dots, 4$, из (9); h_{x_i} , $i = 1, 2, 3$, — опорные шаги разностной схемы по пространственным координатам; k — постоянная Больцмана; k_i , $i = 1, 2, 3$, — предэкспоненциальный множитель реакций окисления (см. (20)); k_{is} , $i = 1, 3, 4$, — предэкспоненциальный множитель реакций $R_{js}^{(i)}$, $i = 1, 2$, $j = 1, 3, 4$; m_j , $j = 1, \dots, n_1$, — молекулярная масса компонента; l_1, l_2 — количество расчетных узлов на частице и элементах по направлению x_1 ; n_1 — количество компонентов в газовой фазе; n_2 — количество нагретых частиц в конструкции из древесины; N_1, M_j, L_j , $j = 1, 2, 3$, — длины сторон параллелепипедов на рис. 1; p_i — давление газа в порах; p_{2s} — предэкспоненциальный множитель в (10), определяемый экспериментально; q_i , $i = 1, 2, 3$, — тепловой эффект реакций окисления (см. (20)); Q_{is} , $i = 1, \dots, 4$, — тепловой эффект реакций $R_{js}^{(i)}$, $i = 1, 2$, $j = 1, \dots, 4$; r_1, r_2, r_3 — молярно-объемная скорость окисления оксида углерода, метана и водорода; R — универсальная газовая постоянная; $R_{1s}^{(i)}$, $i = 1, 2$, — массовая скорость разложения сухого реагента (древесины); $R_{2s}^{(i)}$, $i = 1, 2$, — массовая скорость испарения связанной воды в древесине; $R_{3s}^{(i)}$, $i = 1, 2$, — массовая скорость горения коксика; $R_{4s}^{(i)}$, $i = 1, 2$, — массовая скорость

образования золы; R_i , $i = 1, \dots, 6$, — массовая скорость образования и исчезновения компонентов газовой фазы в уравнении диффузии (6); s_2 — удельная поверхность испарения воды; s_3 — удельная поверхность реагирования углерода; t — время; $T_1^{(i)}$, $i = 1, 2$, — температура каркаса древесины; $T_2^{(i)}$, $i = 1, 2$, — температура газовой фазы в порах реагента; $T_{3,k}$, $k = 1, \dots, n_2$, — температура нагретых частиц; \mathbf{W} — вектор скорости фильтрации; $y_j^{(i)} = c_j^{(i)} Y_i/m_j$, $i = 1, 2$, $j = 1, \dots, n_1$, — молярная концентрация; $z_j^{(i)} = \rho_5^{(i)} c_j^{(i)}/m_j$, $i = 1, 2$, $j = 1, \dots, n_1$, — молярно-объемная концентрация; α_c — доля кокса в ходе реакции пиролиза древесины; $\alpha_4 = \nu_4'' m_{4s}/(\nu_3 m_{3s})$ — приведенный стехиометрический коэффициент [24], а правая часть третьего уравнения (8) характеризует массовую скорость образования и исчезновения кокса; $\Gamma_{1,j}$, $j = 1, \dots, 6$, — грани нагретой частицы; $\varepsilon_{j,\alpha}$ — потенциальная энергия взаимодействия молекул; η_i , $i = 1, \dots, 5$, — безразмерные параметры; λ — теплопроводность; $\mu_0(T_2^{(i)}/T_0)^{0.5}$, $i = 1, 2$, — динамическая вязкость смеси газов; $\xi_i = \xi_*(\varphi_5^{(i)})^3/(1 - \varphi_5^{(i)})^2$, $i = 1, 2$, — функция, описывающая влияние объемной доли газа на сопротивление; $\xi_* = d_p^2/120$ — характерная проницаемость; ρ — плотность; ρ_5 — плотность газовой фазы; $\varphi_j^{(i)}$, $i = 1, 2$, $j = 1, \dots, 4$, — безразмерная объемная доля; $\varphi_5^{(i)}$ — объемная доля газовой фазы, определяемая второй формулой из (9). Нижние индексы: 1 — каркас древесины; 2 — газовая фаза в пористом реагенте; 3 — частица; s (внизу и сверху) — конденсированная фаза; * — характерная величина; c — кокс; 0 — начальное значение; m — максимальная величина; $1, \dots, 7$ — соответствуют в газовой фазе оксиду углерода, парам воды, кислороду, диоксиду углерода, метану, водороду, азоту; $1s, \dots, 4s$ — древесина, связанная вода, кокс, пепел в конденсированной фазе; p — пора; n — нормализованная плотность древесины; φ_k , $k = 2$ — связанная вода, $k = 3$ — кокс, $k = 4$ — пепел.

Для решения системы уравнений (2)–(8) были использованы начальные условия:

$$T_1^{(i)} = T_0, \quad T_2^{(i)} = T_0, \quad T_{3,k} = T_{3*},$$

$$k = 1, \dots, n_2, \quad i = 1, 2, \quad (11)$$

$$c_j^{(i)} = c_{j,0}, \quad j = 1, \dots, n_1 - 1, \quad \varphi_j^{(i)} = \varphi_{j,0},$$

$$j = 1, \dots, 4, \quad i = 1, 2 \text{ при } t = 0.$$

Граничные условия:

условие идеального контакта и равенства температур между двумя элементами областей 1 и 2:

$$\begin{aligned} \varphi_5^{(1)} \lambda_5^{(1)} \frac{\partial T_2^{(1)}}{\partial x_3} \Big|_{G_{2,1}} &= \varphi_5^{(2)} \lambda_5^{(2)} \frac{\partial T_2^{(2)}}{\partial x_3} \Big|_{G_{2,1}}, \\ T_2^{(1)} \Big|_{G_{2,1}} &= T_2^{(2)} \Big|_{G_{2,1}}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$T_1^{(i)} \Big|_{G_{2,1}} = T_2^{(i)} \Big|_{G_{2,1}}, \quad i = 1, 2;$$

условие сопряжения между элементом 1 и частицами при $0 \leq x_1 \leq a$, кроме промежутков между частицами $a < x_1 \leq d + a$ по всей длине элемента 1 ($0 \leq x_1 \leq N_1$, $M_1 \leq x_2 \leq M_1 + c$):

$$\varphi_5^{(1)} \lambda_5^{(1)} \frac{\partial T_1^{(1)}}{\partial x_3} \Big|_{G_{1,4}} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x_3} \Big|_{G_{1,4}}, \quad (13)$$

$$T_1^{(1)} \Big|_{G_{1,4}} = T_3 \Big|_{G_{1,4}}, \quad T_1^{(1)} \Big|_{G_{1,4}} = T_2^{(1)} \Big|_{G_{1,4}};$$

условие сопряжения между элементом 2 и частицами при $0 \leq x_1 \leq a$, кроме промежутков между частицами $a < x_1 \leq d + a$ по всей длине элемента 2 ($0 \leq x_1 \leq N_1$, $L_1 \leq x_3 \leq L_1 + b$):

$$\varphi_5^{(2)} \lambda_5^{(2)} \frac{\partial T_1^{(2)}}{\partial x_2} \Big|_{G_{2,6}} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x_2} \Big|_{G_{2,6}}, \quad (14)$$

$$T_1^{(2)} \Big|_{G_{2,6}} = T_3 \Big|_{G_{2,6}}, \quad T_1^{(2)} \Big|_{G_{2,6}} = T_2^{(2)} \Big|_{G_{2,6}};$$

условие идеального контакта для диффузионных потоков и равенства концентраций компонентов между областями 1, 2:

$$\varphi_5^{(1)} \rho_5^{(1)} D_j^{(1)} \frac{\partial c_j^{(1)}}{\partial x_3} \Big|_{G_{2,1}} = \varphi_5^{(2)} \rho_5^{(2)} D_j^{(2)} \frac{\partial c_j^{(2)}}{\partial x_3} \Big|_{G_{2,1}},$$

$$c_j^{(1)} \Big|_{G_{2,1}} = c_j^{(2)} \Big|_{G_{2,1}}, \quad j = 1, \dots, n_1 - 1; \quad (15)$$

условие отсутствия выгорания концентраций компонентов на внешних гранях уголков из древесины из областей 1, 2, $G_{i,j}$, $i = 1, 2$, $j = 1, \dots, 6$, и на гранях частиц $\Gamma_{1,1}$, $\Gamma_{1,5}$:

$$\frac{\partial c_j^{(i)}}{\partial x_k} \Big|_{G_{i,j}} = 0,$$

$$i = 1, 2, \quad j = 1, \dots, 6, \quad k = 1, 2, 3,$$

$$\frac{\partial c_j^{(1)}}{\partial x_3} \Big|_{\Gamma_{1,1}} = 0, \quad j = 1, \dots, n_1 - 1,$$

$$\frac{\partial c_j^{(1)}}{\partial x_2} \Big|_{\Gamma_{1,5}} = 0, \quad j = 1, \dots, n_1 - 1; \quad (16)$$

условие тепловой изоляции для элемента 1 по всем внешним границам области 1, $G_{i,j}$, $i = 1, 2$, $j = 1, \dots, 6$, кроме областей, где элемент 1 контактирует с элементом 2 и частицами:

$$\frac{\partial T_i^{(1)}}{\partial x_k} \Big|_{G_{i,j}} = 0,$$

$$j = 1, \dots, 6, \quad k = 1, 2, 3, \quad i = 1, 2,$$

$$\frac{\partial T_i^{(1)}}{\partial x_k} \Big|_{\Gamma_{1,j}} = 0, \quad j = 2, 3, \quad k = 1, 2, 3; \quad (17)$$

условие тепловой изоляции для элемента 2 по всем внешним границам области 2, $G_{i,j}$, $i = 1, 2$, $j = 1, \dots, 6$, кроме областей, где элемент 2 контактирует с элементом 1 и частицами:

$$\frac{\partial T_i^{(2)}}{\partial x_k} \Big|_{G_{i,j}} = 0, \quad j = 2, \dots, 6, \quad k = 1, 2, 3,$$

$$\frac{\partial T_i^{(2)}}{\partial x_k} \Big|_{\Gamma_{1,j}} = 0, \quad (18)$$

$$j = 2, \dots, 6, \quad k = 2, 3, \quad i = 1, 2;$$

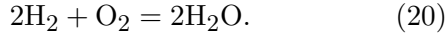
условие тепловой изоляции для частиц по всем внешним граням, кроме областей, где частицы контактируют с областями 1, 2:

$$\frac{\partial T_{3,i}}{\partial x_k} \Big|_{\Gamma_{1,j}} = 0, \quad (19)$$

$$j = 2, 3, 4, 6, \quad k = 1, 2, 3, \quad i = 1, \dots, n_2.$$

РЕАКЦИИ В КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЕ

Известно [7, 22], что итоговыми гомогенными химическими реакциями в проницаемом слое древесины являются следующие:



Состав продуктов пиролиза древесины (CO , CH_4 , H_2) был исследован в работе [22] с указанием на источник [16], где были обнаружены компоненты CO , H_2O , O_2 , CO_2 , CH_4 , H_2 , N_2 при пиролизе растительных материалов и в ходе реакций окисления (20).

Уравнения химической кинетики для реакций окисления оксида углерода, метана и водорода имеют вид [25]:

$$\begin{aligned} \frac{dz_1^{(i)}}{dt} &= -k_1 y_1^{(i)} (y_3^{(i)})^{0.25} (T_2^{(i)})^{-2.5} \times \\ &\times \exp\left(-\frac{E_1}{RT_2^{(i)}}\right) = -r_1^{(i)}, \\ \frac{dz_2^{(i)}}{dt} &= -k_2 (y_5^{(i)})^{-0.5} (y_3^{(i)})^{1.5} \frac{p_i}{T_2^{(i)}} \times \end{aligned} \quad (21)$$

$$\times \exp\left(-\frac{E_2}{RT_2^{(i)}}\right) = -r_2^{(i)},$$

$$\frac{dz_3^{(i)}}{dt} = -k_3 z_3^{(i)} (z_6^{(i)})^{1.5} \exp\left(-\frac{E_3}{RT_2^{(i)}}\right) = -r_3^{(i)},$$

$$i = 1, 2.$$

Выражения для $R_1^{(i)} - R_6^{(i)}$, α_c , $\eta_1 - \eta_5$, $i = 1, 2$, в уравнениях (2), (6), (9) записываются [9] в виде:

$$\begin{aligned} R_1^{(i)} &= \eta_1 R_{1s}^{(i)} - m_1 r_1^{(i)}, \\ R_2^{(i)} &= \eta_2 R_{1s}^{(i)} - R_{2s}^{(i)} + 2m_2 (r_2^{(i)} + r_3^{(i)}), \\ R_3^{(i)} &= -\eta_3 R_{3s}^{(i)} - m_3 (r_1^{(i)} + 2r_2^{(i)} + r_3^{(i)}), \\ R_4^{(i)} &= m_4 (2r_1^{(i)} + r_2^{(i)}), \\ R_5^{(i)} &= \eta_4 R_{1s}^{(i)} - m_5 r_2^{(i)}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$R_6^{(i)} = \eta_5 R_{1s}^{(i)} - 2m_6 r_3^{(i)}, \quad i = 1, 2,$$

$$\alpha_c = \frac{m_c}{m_0 - m_c}, \quad \eta_1 = \frac{m_1}{m_0}, \quad \eta_2 = \frac{m_2}{m_0},$$

$$\eta_3 = \frac{m_3}{m_c}, \quad \eta_4 = \frac{m_5}{m_0}, \quad \eta_5 = \frac{m_6}{m_0}.$$

Значения теплоемкости при постоянном давлении компонентов газовой фазы $c_{pj}^{(i)} = a_j + b_j T_2^{(i)} + c_j / (T_2^{(i)})^2$, $j = 1, \dots, 7$, $i = 1, 2$, в формуле (9) взяты из [26].

Эффективный коэффициент диффузии определяется по формуле Фристрона — Вестенберга [27]:

$$D_\alpha^{(i)} = (1 - c_\alpha^{(i)}) \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq \alpha}}^{n_1} \frac{y_j^{(i)}}{d_{\alpha,j}^{(i)}} \right)^{-1},$$

$$d_{\alpha,j}^{(i)} = 1.66 \cdot 10^{-7} \frac{[(m_\alpha + m_j)/(m_\alpha m_j)]^{0.5} (T_2^{(i)})^{1.5}}{p_i \sigma_{j,\alpha}^2 (\varepsilon_{j,\alpha} / k T_2^{(i)})^{0.17}},$$

$$i = 1, 2.$$

Для теплопроводности компонентов газовой фазы $\lambda_j^{(i)}$, $j = 1, 2, \dots, n_1$, $i = 1, 2$, используются формулы из [28]:

$$\begin{aligned} \lambda_5^{(i)} &= \sum_{j=1}^{n_1} \lambda_j^{(i)} c_j^{(i)}, \lambda_j^{(i)} = \\ &= \lambda_{j,0}^{(i)} \left(0.115 + 0.354 \frac{c_{pj}^{(i)}}{R} \right), \end{aligned} \quad (23)$$

$$\lambda_{j,0}^{(i)} = 8.32 \cdot 10^{-2} \frac{(T_2^{(i)} / m_j)^{0.5}}{\sigma_j^2 (\varepsilon_j / k T_2^{(i)})^{0.147}},$$

$$j = 1, 2, \dots, n_1, \quad i = 1, 2.$$

Сухая древесина представляет собой двухфазную систему [22], 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 древесного вещества. Удельная теплоемкость древесины не зависит от породы дерева и плотности и по данным [6] 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 %.

В формулах (9) теплопроводность сухой древесины в продольном направлении $\lambda_{1j}^{s,i}$, $j = 1, 2, 3$, $i = 1, 2$, как известно [6, 20, 29], в два раза выше, чем в поперечном, и в зависимости от плотности породы определяется в виде [29]

$$\lambda_{1j}^{s,i} = \lambda_{dr}^{s,i} K_\rho N, \quad i = 1, 2, \quad j = 1, 2, 3, \quad (24)$$

где $\lambda_{dr}^{s,i}$, $i = 1, 2$, — теплопроводность абсолютно сухой древесины, взятая из [29], K_ρ — коэффициент, учитывающий базисную (условную) плотность древесины, N — параметр, учитывающий направление теплового потока. Для тангенциального 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 пород (дуб) $N = 1.6$. Значения K_ρ и базисной плотности ρ_{bas} взяты из [6].

Так как в данной работе в качестве ДМ используется уголок из сосны, то $\rho_n = 500$ кг/м³, $\rho_{bas} = 400$ кг/м³, $K_\rho = 1.05$, $N = 2.2$ [6]. Начальная объемная доля связанной воды $\varphi_{2,0}^{(i)}$ вычисляется по формуле [22] $\varphi_{2,0}^{(i)} = (\rho_n - \rho_1^{(i)} \varphi_{1,0}^{(i)}) / \rho_2^{(i)}$, $i = 1, 2$. Теплофизические и термокинетические коэффициенты древесины, тепловые эффекты реакций (20) приведены в табл. 3 в [9], теплофизические коэффициенты стальных частиц в зависимости от температуры взяты из [30].

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Система уравнений (2)–(8) с краевыми условиями (11)–(19) решалась численно при помощи неявной разностной схемы и локально-одномерного метода расщепления [31]. Тестирование численного метода проведено для варианта породы сосна с параметрами $\varphi_{1,0}^{(i)} =$

0.307 , $\varphi_{2,0}^{(i)} = 0.178$, $\rho_1^{(i)} = 470$ кг/м³, $i = 1, 2$, при исходных данных из этого параграфа.

Использовалась последовательность сгущающихся сеток по пространству. Количество расчетных узлов в направлении x_1 фиксировано, $N_1 = 191$, и не менялось. По направлению a с числом расчетных узлов $l_1 = 11$ и по направлению d с числом узлов $l_2 = 11$ при количестве частиц $n_2 = 10$ имеем $N_1 = n_2 l_1 + (l_2 - 2)(n_2 - 1) = 191$ ($h_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ м).

Так как воспламенение исследуемой системы происходит в элементах 1 или 2, то сгущение разностной сетки было взято следующим: по направлению оси x_2 : в элементе 2 число разностных узлов на частице 11, а между частицами — 6, 21 — 11, 31 — 21, 41 — 31; по направлению оси x_3 : в элементе 1 число разностных узлов на частице 11, а между частицами — 6, 21 — 11, 31 — 21, 41 — 31. Начальные шаги по пространству x_2 : $h_{x_2 M_1} = 10^{-3}$ м, $h_{x_2 c} = 10^{-3}$ м, $h_{x_2 M_3} = 7 \cdot 10^{-3}$ м, а по пространству x_3 : $h_{x_2 L_1} = 10^{-3}$ м, $h_{x_2 b} = 10^{-3}$ м, $h_{x_2 L_3} = 7 \cdot 10^{-3}$ м, и при использовании соответствующих индексов b, c, M_1, M_3, L_1, L_3 принималось: $h_1 = 2h_{x_i}$, $h_2 = h_{x_i}$, $h_3 = h_{x_i}/2$, $h_4 = h_{x_i}/4$, $i = 2, 3$.

Фиксировались температуры каркаса и газа в различные моменты времени и время зажигания t_* . При этом шаг по времени был переменным и вырабатывался автоматически по заданной точности, одинаковой для всех сеток по пространству.

Погрешность по температуре

$$\varepsilon_i = \frac{|T_m(t_*, h_i) - T_m(t_*, h_{i+1})|}{T_m(t_*, h_{i+1})} \cdot 100 \%,$$

$$i = 1, 2, 3,$$

падала и в момент зажигания t_* образца ДМ составляла $\varepsilon_1 = 7.2$ %, $\varepsilon_2 = 3.5$ %, $\varepsilon_3 = 1.7$ %, $T_m(t_*, h_k) = \max_j T_j^{(i)}(t_*, h_k)$, $i, j = 1, 2, k = 1, 2, 3$. Ниже результаты расчета получены для шагов по пространству, соответствующих $h_3 = h_{x_i}/2$, $i = 2, 3$ и индексам b, c, M_1, M_3, L_1, L_3 .

Теплофизические и термокинетические параметры древесины взяты из работ [6–8, 14, 17, 18, 25–30]. Теплофизические характеристики воды и водяного пара взяты из [32], а для азота — из [33]. Приведенные ниже результаты получены при $T_0 = 300$ К, $T_{3*} = 700$ К, $\mu_0 =$

$1.81 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с), $A_V = 4 \cdot 10^4$ Вт/(м³·К), $m_0 = 130$ кг/кмоль, $m_c = 12$ кг/кмоль, $N_1 = 0.095$ м, $M_1 = 0.01$ м, $M_2 = 0.01$ м, $M_3 = 0.07$ м, $L_1 = 0.01$ м, $L_2 = 0.01$ м, $L_3 = 0.07$ м, $a = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $b = 10^{-2}$ м, $c = 10^{-2}$ м, $d = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $d_p = 10^{-6}$ м, $p_{2s} = 6 \cdot 10^5$ Н/м², $\rho_2^{(i)} = 2 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_3^{(i)} = \rho_4^{(i)} = 130$ кг/м³, $c_{p1}^{(i)} = 1.8 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), $c_{p2}^{(i)} = 2.09 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), $c_{p3}^{(i)} = c_{p4}^{(i)} = 1.02 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), $R = 8.314$ Дж/(моль·К), $\lambda_{\varphi_2}^{s,i} = 0.6$ Вт/(м·К), $\lambda_{\varphi_4}^{s,i} = \lambda_{\varphi_3}^{s,i} = 0.041$ Вт/(м·К), $A_s = 0.08$, $\varphi_{1,0}^{(i)} = 0.307$, $\varphi_{3,0}^{(i)} = 10^{-3}$, $\varphi_{4,0}^{(i)} = 10^{-5}$, $s_2 = 0.05$ м⁻¹, $s_3 = 0.2$ м⁻¹, $\alpha_c = 0.5$, $\alpha_4 = 0.7$, $c_{1,0}^{(i)} = 0.1$, $c_{2,0}^{(i)} = 5 \cdot 10^{-3}$, $c_{3,0}^{(i)} = 0.23$, $c_{4,0}^{(i)} = 10^{-3}$, $c_{5,0}^{(i)} = 10^{-2}$, $c_{6,0}^{(i)} = 10^{-3}$, $i = 1, 2$, $n_1 = 7$, $n_2 = 10$.

Здесь T_0 , T_{3*} — начальные условия для температур в формулах (11); A_V присутствует в формулах (4), (5); μ_0 — сомножитель в формуле для коэффициента динамической вязкости смеси газов $\mu_0(T_2^{(i)}/T_0)^{0.5}$, $i = 1, 2$; m_0 присутствует в выражении $\eta_i = m_i/m_0$, $i = 1, \dots, 5$, в формулах (22); m_c — молекулярная масса атомарного углерода; M_i , L_i ($i = 1, 2, 3$), a , b , c , d обозначены визуально на рис. 1; d_p присутствует в формуле для характерной проницаемости $\xi_* = d_p^2/120$; обозначения $\rho_j^{(i)}$, $\lambda_{\varphi_j}^{s,i}$, $j = 2, 3, 4$, $c_{pj}^{(i)}$, $j = 1, \dots, 4$, $i = 1, 2$, используются в уравнении (4) и в последней формуле из равенств (9); A_s , p_{2s} , s_2 — сомножители в формуле (10); $\varphi_{j,0}^{(i)}$, $j = 1, 3, 4$, $c_{j,0}^{(i)}$, $j = 1, \dots, 6$, $i = 1, 2$, — начальные условия в формулах (11); s_3 — сомножитель в правой части для $R_{3s}^{(i)}$, $i = 1, 2$, в формулах (9); α_4 — сомножитель в правой части для $R_{4s}^{(i)}$, $i = 1, 2$, в формулах (9); α_c находится в правой части для Z_i , $i = 1, 2$, в формулах (9); n_1 — количество компонентов в газовой фазе ДМ при пиролизе, присутствует в уравнении (6); n_2 — количество горячих частиц, присутствует в уравнении (7).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Временем зажигания (t_*) уголка из ДМ «нагретыми» частицами назовем величину t_* ,

когда температура реагента (элементов 1, 2) резко возрастает до $T_m = 1100$ К ($T_m = \max T_j^{(i)}(x_1, x_2, x_3)$, $i, j = 1, 2$) [9]. На рис. 2 представлено распределение температуры элемента 2 в сечении S_{2*} по поперечной переменной x_2 в моменты времени 24.05, 20, 10 с. Точка S_{2*} на рис. 1 (не показана) для сечения S_{2*} элемента 2 находится на пересечении координат $x_1 = 2a + 1.1d$ и $x_3 = L_1 + 0.99L_2$. Так как $a = d = 5 \cdot 10^{-3}$ м, то эта точка находится в области третьей частицы на глубине элемента 2 $x_{1*} = 1.6 \cdot 10^{-3}$ м и на высоте элемента 2 $x_{3*} = 0.0199$ м.

На рис. 3 приведены температуры газовой и конденсированной фаз элемента 1 в сечении $S_{1*} = \{x_1 = N_1/2, x_2 = M_1\}$ вдоль x_3 в те же моменты времени, что и на рис. 2. Из анализа рис. 2, 3 следует, что по мере прогрева ДМ «горячими» частицами увеличивается температура внутри реагентов и в сечении S_{2*} (в области третьей частицы) наблюдается резкий рост температуры газовой фазы ($T_2^{(2)}$)

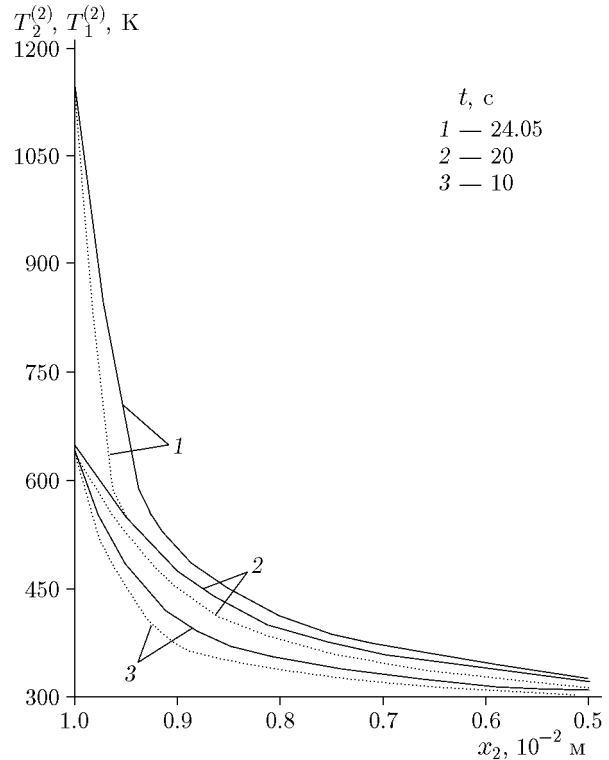


Рис. 2. Зависимость температуры газовой фазы $T_2^{(2)}$ (сплошные кривые) и каркаса $T_1^{(2)}$ (пунктирные кривые) элемента 2 от поперечной переменной x_2 в сечении S_{2*} в различные моменты времени

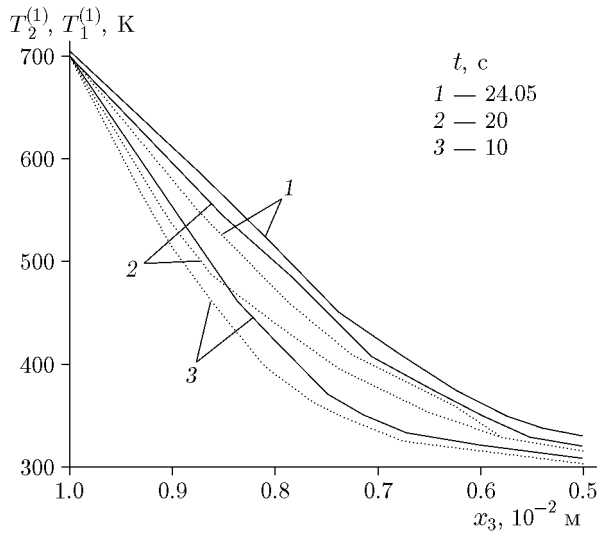


Рис. 3. Распределение температуры газовой фазы (сплошные линии) и каркаса (пунктирные линии) элемента 1 по координате x_3 в сечении S_{1*} в различные моменты времени

при $t = t_*$. Режиму зажигания соответствуют зависимости, имеющие максимум температуры на рис. 2 (кривая 1). Одномерные и двумерные картины распределения температур по пространству в других сечениях в элементах 1, 2 качественно похожи на профили температуры в сечении S_{1*} на рис. 3, а количественно максимальная температура в других сечениях не превышает $700 \div 750$ К.

На рис. 4 представлены поля концентраций компонентов оксидов углерода и кислорода в проницаемом реагенте (элемента 2) по координате x_2 , в сечении S_{2*} . На рис. 5 даны поля концентраций паров воды, метана и водорода в сечении S_{2*} по поперечной переменной x_2 в те же моменты времени, что и на рис. 2.

Как видно из рис. 4, 5, концентрация углекислого газа в сечении S_{2*} резко возрастает вблизи контакта в области третьей частицы в результате тепловыделения $\sum_{i=1}^3 q_i r_i^{(2)}$ от реакций (20). Концентрация кислорода начинает падать при $T_2^{(2)} > 550$ К ($c_3^{(2)} < 0.21$). При $T_2^{(2)} > 700$ К концентрация кислорода продолжает уменьшаться, $c_3^{(2)} < 0.18$, и к моменту зажигания $t = t_*$ стремится к нулю. Начальные значения всех концентраций $c_{j,0}^{(i)}$, $i = 1, 2$, $j = 1, \dots, 6$, приведены в предыдущем параграфе.

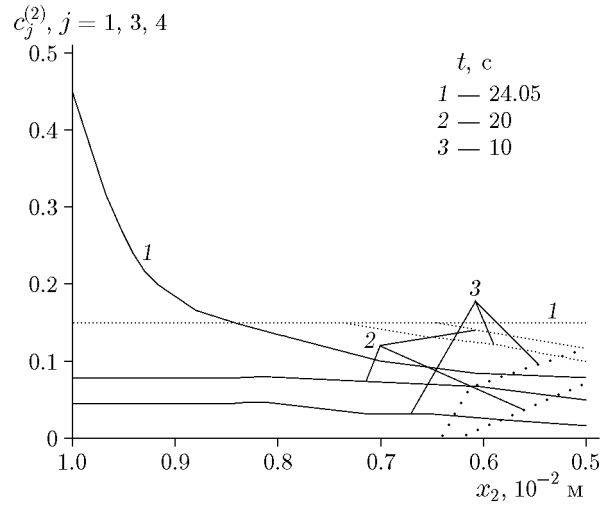


Рис. 4. Зависимость безразмерной концентрации компонентов диоксида углерода $c_4^{(2)}$ элемента 2 (сплошные кривые), монооксидов углерода $c_1^{(2)}$ (светлый пунктир) и кислорода $c_3^{(2)}$ (жирный пунктир) от координаты x_2 в сечении S_{2*} в различные моменты времени

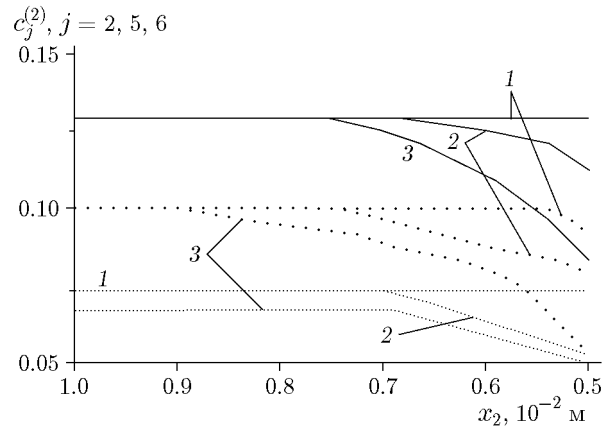


Рис. 5. Распределение концентраций компонентов $c_2^{(2)}$ (сплошные кривые), $c_5^{(2)}$ (светлый пунктир), $c_6^{(2)}$ (жирный пунктир) по координате x_2 в сечении S_{2*} в моменты времени $t = 24.05$ (1), 20 (2), 10 с (3)

Поведение концентраций CO , H_2O , CH_4 , H_2 в области невысоких температур $T_j^{(i)} < 600$ К, $i, j = 1, 2$, связано с небольшим по сравнению с начальным ($\varphi_{1,0}^{(i)} = 0.307$, $i = 1, 2$) разложением объемной доли сухой древесины $0.27 < \varphi_1^{(i)} < 0.29$ ($\varphi_1^{(i)} < \varphi_{1,0}^{(i)}$), $i = 1, 2$, источника $R_{1s}^{(i)}$, $i = 1, 2$, в формулах (9), (22) для $R_1^{(i)}$, $R_2^{(i)}$, $R_5^{(i)}$, $R_6^{(i)}$, $i = 1, 2$. При более низ-

ких температурах $T_j^{(i)} < 500$ К, $i, j = 1, 2$, где $\varphi_1^{(i)} \approx \varphi_{1,0}^{(i)}$, $i = 1, 2$, величина концентраций $c_1^{(i)}, c_2^{(i)}, c_5^{(i)}, c_6^{(i)}$, $i = 1, 2$, определяется температурами от источников $r_j^{(i)}$, $i = 1, 2, j = 1, 2, 3$ (см. (21)), в реакциях (20).

Надо сказать, что метан CH_4 (см. светлый пиксир на рис. 5) при $T_2^{(2)} < 720$ К практически не окисляется в ходе гомогенной реакции из (20) с образованием CO_2 и H_2O , так как концентрация CH_4 изменяется незначительно в силу низких температур реагирующей среды. Известно [25], что вторая газозная реакция окисления из (20) интенсивно начинается при $T_2^{(2)} > 1300$ К.

Представляют интерес результаты зажигания конструкции из ДМ при увеличении начальной объемной доли древесины $\varphi_{1,0}^{(i)}$, $i = 1, 2$. С увеличением $\varphi_{1,0}^{(i)}$, $i = 1, 2$, от 0.307, 0.35, 0.4 время зажигания уменьшается до $t_* = 24.05, 23.26, 21.19$ с соответственно, что качественно согласуется с результатами [9]. Это связано с уменьшением затрат тепловой энергии на испарение связанной воды в древесине при уменьшении начальной доли $\varphi_{2,0}^{(i)}$, $i = 1, 2$, от 0.178, 0.168, 0.156 в ДМ, падением пористости реагента $\varphi_{5,0} = 0.515, 0.482, 0.444$ и уменьшением доли азота $c_7^{(i)}$, $i = 1, 2$, в древесине. Так как теплопроводность азота низкая [33] при отмеченных невысоких температурах, то согласно первой формуле (23) теплопроводность уголка из ДМ уменьшается, что препятствует его прогреву и воспламенению.

По данным [9, 34] известно, что предварительно нагретые образцы древесины быстрее воспламенялись от нагретых источников. Оказалось, что время зажигания конструкции из ДМ, предварительно нагретого до температуры 453 К, уменьшилось до $t_* = 20.72$ с. Это обусловлено уменьшением затрат энергии на нагрев и испарение связанной воды в древесине.

Рассмотрим влияние температуры «нагретых» частиц на время зажигания конструкции из ДМ. При уменьшении $T_{3*} = 690$ К время зажигания ДМ увеличивалось до $t_* = 28.52$ с. Это обусловлено уменьшением тепловой энергии, запасенной в менее нагретых частицах, что в итоге приводит к увеличению времени прогрева до момента воспламенения ДМ.

При уменьшении числа «горячих» частиц с десяти до пяти расстояние между ними увеличивается в 3.5 раза ($d = 1.75 \cdot 10^{-2}$ м), при такой же длине частиц $a = 5 \cdot 10^{-3}$ м (см. рис. 1) и прочих одинаковых исходных данных зажигание конструкции из ДМ не происходит. Это связано с понижением во времени температуры ДМ при меньшем количестве «горячих» частиц из-за уменьшения запасенной тепловой энергии, необходимой для воспламенения. Этот результат находится в согласии с данными эксперимента [35].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена постановка задачи о воспламенении конструкции из ДМ несколькими горячими частицами с учетом процессов сушки, пиролиза, окисления газообразных и конденсированных продуктов. Методами численного моделирования трехмерных течений многокомпонентных двухфазных сред получены пространственные распределения температур и проанализированы условия зажигания.

Установлено, что время зажигания конструкции из ДМ (сосна), предварительно нагретого до температуры 453 К воздействием десяти частиц, уменьшилось до $t_* = 20.72$ с. При уменьшении начальной температуры частиц до $T_{3*} = 690$ К время зажигания конструкции из ДМ увеличивается до 28.52 с по сравнению с базовым значением $t_* = 24.05$ с ($T_{3*} = 700$ К). При уменьшении числа «горячих» частиц до пяти и меньше воспламенение конструкции из ДМ при $T_{3*} = 700$ К не обнаружено. Показано качественное согласование некоторых результатов расчета с известными данными [9, 34, 35].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-21-00068).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Г. В., Барановский Н. В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009.

2. **Пожарная** безопасность. Энциклопедия. — М.: ФГУ ВНИИ ПО МЧС России, ЗАО «Голден-Би», 2007.
3. **Manzello S. L., Suzuki S., Gollner M. J., Fernandez-Pello A. C.** Role of firebrand combustion in large outdoor fire spread // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2020. — V. 76. — 100801. — DOI: 10.1016/j.pecs.2019.100801.
4. **Caton S. E., Hakes R. S. P., Gorham D. J., Zhou A., Gollner M. J.** Review of pathways for building fire spread in the wildland urban interface. Part I: Exposure conditions // *Fire Technol.* — 2017. — V. 53. — P. 429–473. — DOI: 10.1007/s10694-016-0589-z.
5. **Харук Е. В.** Проницаемость древесины газами и жидкостями. — Новосибирск: Наука, 1976.
6. **Уголев Б. Н.** Древесиноведение с основами лесного товароведения. — М.: Лесн. пром-сть, 1986.
7. **Гришин А. М.** Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // *Успехи механики.* — 2002. — Т. 1, № 4. — С. 41–89.
8. **Лобода Е. Л., Якимов А. С.** Некоторые результаты математического моделирования процесса загорания торфа // *Теплофизика высоких температур.* — 2013. — Т. 51, № 6. — С. 923–930. — DOI: 10.7868/S0040364413060185. — EDN: REKCN.
9. **Гришин А. М., Якимов А. С.** Математическое моделирование процесса загорания древесины // *Теплофизика и аэромеханика.* — 2013. — Т. 20, № 4. — С. 473–486. — EDN: RBKATR.
10. **Кузнецов Г. В., Барановский Н. В.** Математическое моделирование загорания слоя лесных горючих материалов нагретой до высоких температур частицей // *Пожаровзрывобезопасность.* — 2006. — Т. 15, № 4. — С. 42–46. — EDN: HVBADR.
11. **Буркина Р. С., Микова Е. А.** Высокотемпературное загорание реакционноспособного вещества горячей инертной частицей с конечным запасом тепла // *Физика горения и взрыва.* — 2009. — Т. 45, № 2. — С. 40–47. — EDN: KBAUHL.
12. **Глушков О. О., Стрижак П. А.** Загорание полимерного материала одиночной, нагретой до высоких температур частицей // *Пожаровзрывобезопасность.* — 2011. — Т. 20, № 9. — С. 3–8. — EDN: OFXCSR.
13. **Grishin A. M., Filkov A. I., Loboda E. L., Reino V. V., Kozlov A. V., Kuznetsov V. T., Kasymov D. P., Andreyuk S. M., Ivanov A. I., Stolyarchuk N. D.** A field experiment on grass fire effects on wooden constructions and peat layer ignition // *Int. J. Wildland Fire.* — 2014. — V. 23, N 3. — P. 445–449. — DOI: 10.1071/WF12069.
14. **Демидов П. Г.** Горение веществ и способы тушения. — М.: Мин-во коммун. хоз-ва РСФСР, 1955.
15. **Козлов В. Н., Нимвицкий А. А.** Технология пирогенетической переработки древесины. — М.; Л.: Гослесбумиздат, 1954.
16. **Конев Э. В.** Физические основы горения растительных материалов. — Новосибирск: Наука, 1977.
17. **Богомолов В. Д., Соколов В. М., Чудинова А. С.** Кинетические параметры процесса щелочной делигнификации древесины // *Изв. вузов. Лесн. журн.* — 1976. — № 1. — С. 109–115.
18. **Гришин А. М., Якимов А. С., Миков В. Л.** Режимы воспламенения стеклопластиковой трубы с учётом смешанной конвекции окислителя // *Физика горения и взрыва.* — 1981. — Т. 17, № 2. — С. 13–22.
19. **Калинкевич Г. А., Миков В. Л., Морозова Т. П.** Исследование полиаминоамидного связующего методом комплексного термического анализа // *Изв. Тимирязевской с.-х. акад.* — 1981. — № 2. — С. 164–167.
20. **Глухарева М. И., Дроздов Н. П., Ермакова Л. А., Кислицин А. Н.** Справочник лесохимика. — М.: Лесн. пром-сть, 1974.
21. **Гришин А. М.** Общая физико-математическая модель загорания и горения древесины // *Вестн. Томск. гос. ун-та. Математика и механика.* — 2010. — № 2(10). — С. 60–70.
22. **Гришин А. М.** Математические модели лесных пожаров. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1981.
23. **Алексеев Б. В., Гришин А. М.** Физическая газодинамика реагирующих сред. — М.: Высш. шк., 1985.
24. **Гришин А. М., Фомин В. М.** Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. — Новосибирск: Наука, 1984.
25. **Щетинков Е. С.** Физика горения газов. — М.: Наука, 1965.
26. **Мищенко К. П., Равдель А. А.** Краткий справочник физико-химических величин. — Л.: Химия, 1972.
27. **Campbell E. S., Fristrom R. M.** Reaction kinetics, thermodynamics, and transport in the hydrogen-bromine system — A survey of properties for flame studies // *Chem. Rev.* — 1958. — V. 38, N 2. — P. 173–234. — DOI: 10.1021/cr50020a001.
28. **Померанцев В. В., Арефьев К. М., Ахмедов Д. Б.** Основы практической теории горения / под ред. В. В. Померанцева. — Л.: Энергия, 1973.
29. **Перелыгин Л. М., Уголев Б. Н.** Древесиноведение. — М.: Лесн. пром-сть, 1971.
30. **Ильичев М. В., Мордынский В. Б., Терешонок Д. В., Тюфтяев А. С., Чикунов С. Е.** Экспериментальное определение

- зависимости коэффициента теплопроводности стали от температуры // Теплофизика высоких температур. — 2015. — Т. 53, № 2. — С. 198–203. — DOI: 10.7868/S0040364415010093.
31. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. — М.: Наука, 1971.
32. Вукалович М. П., Ривкин С. А., Александров А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. — М.: Изд-во стандартов, 1969.
33. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: ФМГИ, 1963.
34. Кузнецов В. Т., Фильков А. И. Воспламенение различных видов древесины потоком лучистой энергии // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 1. — С. 74–79. — EDN: NRFVIZ.
35. Kasymov D. P., Tarakanova V. A., Martynov P. S., Agafontsev M. V. Studying firebrands interaction with flat surface of various wood construction materials in laboratory conditions // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019. — V. 1359. — 012092. — DOI: 10.1088/1742-6596/1359/1/012092.

Поступила в редакцию 21.12.2022.

После доработки 17.04.2023.

Принята к публикации 24.05.2023.
