

# 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 натурных 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

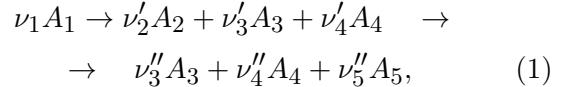
Будем считать, что зажигание и горение древесного материала (ДМ) происходит в результате кондуктивного взаимодействия с «нагретыми» инертными металлическими частицами. Фрагмент области взаимодействия представлен на рис. 1.

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:  $T_{1*} = 550$  К [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]:  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{N}_2$ , 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

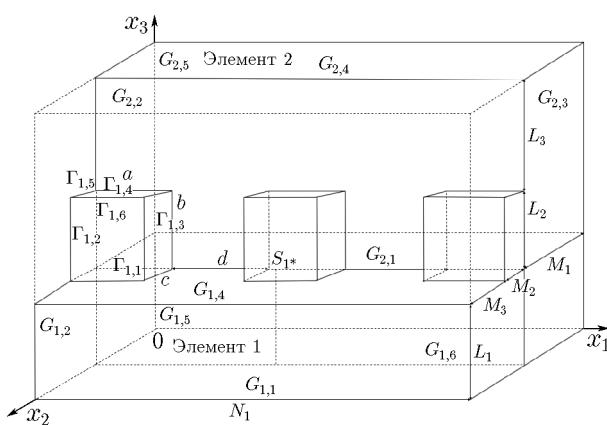


Рис. 1. Схема теплообмена образца древесного материала с «горячими» частицами

газообразных и конденсированных продуктов пиролиза высущенной 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]:

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

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

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

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

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

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

Уравнение теплопроводности для нагретых частиц

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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);  $h_{xi}$ ,  $i = 1, 2, 3$ , — 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 коксики;  $R_{4s}^{(i)}$ ,  $i = 1, 2$ , — 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;  $\alpha_c$  — 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;  $\eta_i$ ,  $i = 1, \dots, 5$ , — безразмерные параметры;  $\lambda$  — 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;  $\rho$  — плотность;  $\rho_5$  — 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 вверху) — 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;  $\varphi_k$ ,  $k = 2$  — связанная вода,  $k = 3$  — кокс,  $k = 4$  — пепел.

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

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

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

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

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

Границные условия:

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

$$\begin{aligned} \varphi_5^{(1)} \lambda_5^{(1)} \frac{\partial T_2^{(1)}}{\partial x_3} \Big|_{G_{2,1}} &= \varphi_5^{(2)} \lambda_5^{(2)} \frac{\partial T_2^{(2)}}{\partial x_3} \Big|_{G_{2,1}}, \\ T_2^{(1)} \Big|_{G_{2,1}} &= T_2^{(2)} \Big|_{G_{2,1}}, \\ T_1^{(i)} \Big|_{G_{2,1}} &= T_2^{(i)} \Big|_{G_{2,1}}, \quad i = 1, 2; \end{aligned} \quad (12)$$

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 ( $0 \leq x_1 \leq N_1$ ,  $M_1 \leq x_2 \leq M_1 + c$ ):

$$\begin{aligned} \varphi_5^{(1)} \lambda_5^{(1)} \frac{\partial T_1^{(1)}}{\partial x_3} \Big|_{G_{1,4}} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x_3} \Big|_{G_{1,4}}, \\ T_1^{(1)} \Big|_{G_{1,4}} &= T_3 \Big|_{G_{1,4}}, \quad T_1^{(1)} \Big|_{G_{1,4}} = T_2^{(1)} \Big|_{G_{1,4}}; \end{aligned} \quad (13)$$

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 ( $0 \leq x_1 \leq N_1$ ,  $L_1 \leq x_3 \leq L_1 + b$ ):

$$\begin{aligned} \varphi_5^{(2)} \lambda_5^{(2)} \frac{\partial T_1^{(2)}}{\partial x_2} \Big|_{G_{2,6}} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x_2} \Big|_{G_{2,6}}, \\ T_1^{(2)} \Big|_{G_{2,6}} &= T_3 \Big|_{G_{2,6}}, \quad T_1^{(2)} \Big|_{G_{2,6}} = T_2^{(2)} \Big|_{G_{2,6}}; \end{aligned} \quad (14)$$

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  $\Gamma_{1,1}$ ,  $\Gamma_{1,5}$ :

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

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

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

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:

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

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

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:

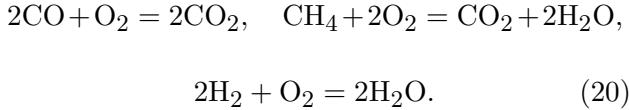
$$\begin{aligned} \frac{\partial T_i^{(2)}}{\partial x_k} \Big|_{G_{i,j}} &= 0, \quad j = 2, \dots, 6, \quad k = 1, 2, 3, \\ \frac{\partial T_i^{(2)}}{\partial x_k} \Big|_{\Gamma_{1,j}} &= 0, \\ j = 2, \dots, 6, \quad k = 2, 3, \quad i = 1, 2; \end{aligned} \quad (18)$$

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

$$\frac{\partial T_{3,i}}{\partial x_k} \Big|_{\Gamma_{1,j}} = 0, \quad j = 2, 3, 4, 6, \quad k = 1, 2, 3, \quad i = 1, \dots, n_2. \quad (19)$$

## РЕАКЦИИ В КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЕ

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



Состав продуктов пиролиза древесины ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ) был исследован в работе [22] с указанием на источник [16], где были обнаружены компоненты  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$  при пиролизе растительных материалов и в ходе реакций окисления (20).

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

$$\begin{aligned} \frac{dz_1^{(i)}}{dt} &= -k_1 y_1^{(i)} (y_3^{(i)})^{0.25} (T_2^{(i)})^{-2.5} \times \\ &\times \exp\left(-\frac{E_1}{RT_2^{(i)}}\right) = -r_1^{(i)}, \\ \frac{dz_2^{(i)}}{dt} &= -k_2 (y_5^{(i)})^{-0.5} (y_3^{(i)})^{1.5} \frac{p_i}{T_2^{(i)}} \times \quad (21) \\ &\times \exp\left(-\frac{E_2}{RT_2^{(i)}}\right) = -r_2^{(i)}, \\ \frac{dz_3^{(i)}}{dt} &= -k_3 z_3^{(i)} (z_6^{(i)})^{1.5} \exp\left(-\frac{E_3}{RT_2^{(i)}}\right) = -r_3^{(i)}, \\ i &= 1, 2. \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned} R_6^{(i)} &= \eta_5 R_{1s}^{(i)} - 2m_6 r_3^{(i)}, \quad i = 1, 2, \\ \alpha_c &= \frac{m_c}{m_0 - m_c}, \quad \eta_1 = \frac{m_1}{m_0}, \quad \eta_2 = \frac{m_2}{m_0}, \\ \eta_3 &= \frac{m_3}{m_c}, \quad \eta_4 = \frac{m_5}{m_0}, \quad \eta_5 = \frac{m_6}{m_0}. \end{aligned}$$

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 Фристрома — 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]:

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

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

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

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],  $K_\rho$  — 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 (береска, лиственница, тополь, сосна, ель, кедр)  $N = 2.2$ , для кольцесосудистых пород (дуб)  $N = 1.6$ . Значения  $K_\rho$  и базисной плотности  $\rho_{bas}$  взяты из [6].

Так как в данной работе в качестве ДМ используется уголок из сосны, то  $\rho_n = 500$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{bas} = 400$  кг/м<sup>3</sup>,  $K_\rho = 1.05$ ,  $N = 2.2$  [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/м<sup>3</sup>,  $i = 1, 2$ , 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

$$\varepsilon_i = \frac{|T_m(t_*, h_i) - T_m(t_*, h_{i+1})| \cdot 100 \%}{T_m(t_*, h_{i+1})}, \quad i = 1, 2, 3,$$

падала и в момент зажигания  $t_*$  образца ДМ составляла  $\varepsilon_1 = 7.2 \%$ ,  $\varepsilon_2 = 3.5 \%$ ,  $\varepsilon_3 = 1.7 \%$ ,  $T_m(t_*, h_k) = \max T_j^{(i)}(t_*, h_k)$ ,  $i, j = 1, 2, k = 1, 2, 3$ . 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/(м<sup>3</sup>·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/м<sup>2</sup>,  $\rho_2^{(i)} = 2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_3^{(i)} = \rho_4^{(i)} = 130$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_{p1}^{(i)} = 1.8 \cdot 10^3$  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<sup>-1</sup>,  $s_3 = 0.2$  м<sup>-1</sup>,  $\alpha_c = 0.5$ ,  $\alpha_4 = 0.7$ ,  $c_{1,0}^{(i)} = 0.1$ ,  $c_{2,0}^{(i)} = 5 \cdot 10^{-3}$ ,  $c_{3,0}^{(i)} = 0.23$ ,  $c_{4,0}^{(i)} = 10^{-3}$ ,  $c_{5,0}^{(i)} = 10^{-2}$ ,  $c_{6,0}^{(i)} = 10^{-3}$ ,  $i = 1, 2$ ,  $n_1 = 7$ ,  $n_2 = 10$ .

Здесь  $T_0$ ,  $T_{3*}$  — начальные условия для температур в формулах (11);  $A_V$  присутствует в формулах (4), (5);  $\mu_0$  — 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);  $\alpha_4$  — сомножитель в правой части для  $R_{4s}^{(i)}$ ,  $i = 1, 2$ , в формулах (9);  $\alpha_c$  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 ( $T_2^{(2)}$ )

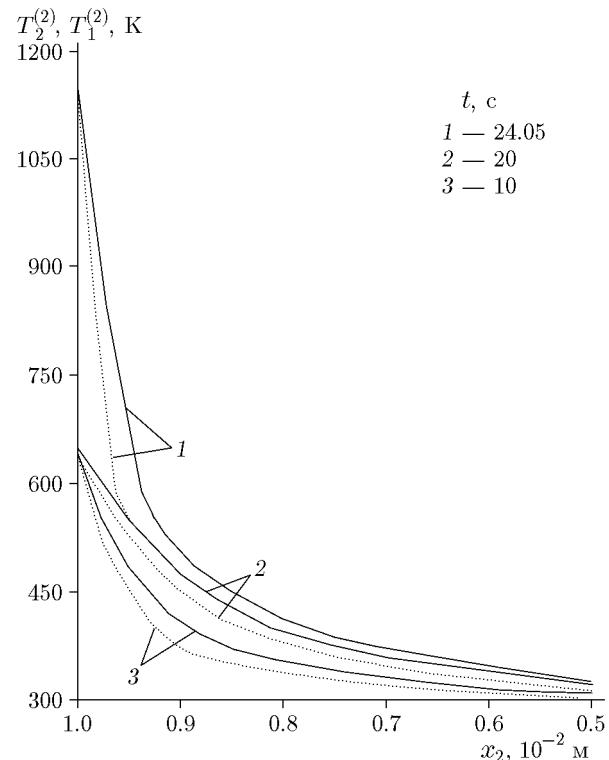


Рис. 2. Зависимость температуры газовой фазы  $T_2^{(2)}$  (сплошные кривые) и каркаса  $T_1^{(2)}$  (пунктирные кривые) элемента 2 от поперечной переменной  $x_2$  в сечении  $S_{2*}$  в различные моменты времени

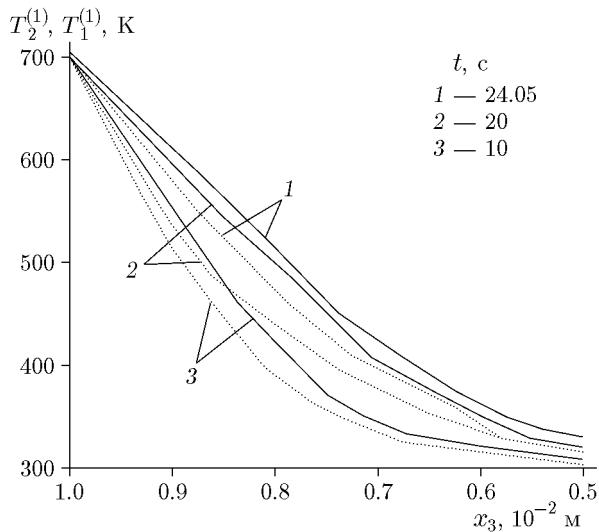


Рис. 3. Распределение температуры газовой фазы (сплошные линии) и каркаса (пунктирные линии) элемента 1 по координате  $x_3$  в сечении  $S_{1*}$  в различные моменты времени

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.

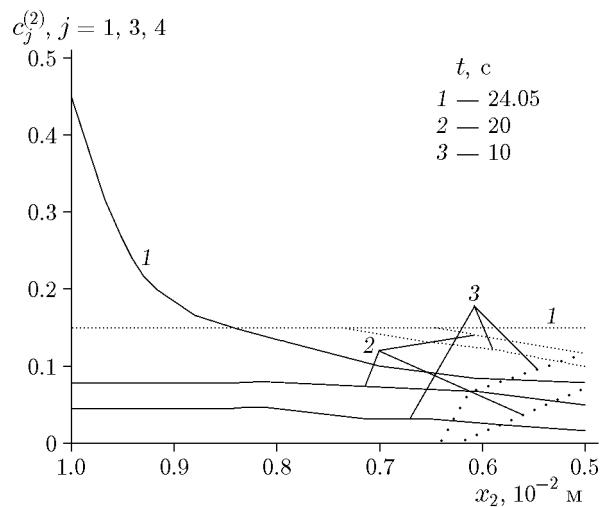


Рис. 4. Зависимость безразмерной концентрации компонентов диоксида углерода  $c_4^{(2)}$  элемента 2 (сплошные кривые),monoоксидов углерода  $c_1^{(2)}$  (светлый пунктир) и кислорода  $c_3^{(2)}$  (жирный пунктир) от координаты  $x_2$  в сечении  $S_{2*}$  в различные моменты времени

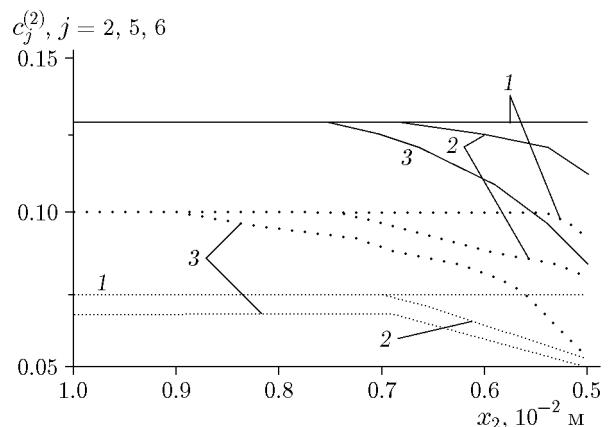


Рис. 5. Распределение концентраций компонентов  $c_2^{(2)}$  (сплошные кривые),  $c_5^{(2)}$  (светлый пунктир),  $c_6^{(2)}$  (жирный пунктир) по координате  $x_2$  в сечении  $S_{2*}$  в моменты времени  $t = 24.05$  (1),  $20$  (2),  $10$  с (3)

Поведение концентраций  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  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  $\text{CH}_4$  (см. светлый пунктир на рис. 5) при  $T_2^{(2)} < 720$  К практически не окисляется в ходе гомогенной реакции из (20) с образованием  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , так как концентрация  $\text{CH}_4$  изменяется незначительно в силу низких температур реагирующей среды. Известно [25], что вторая газофазная 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 зажигания торфа // Термофизика высоких температур. — 2013. — Т. 51, № 6. — С. 923–930. — DOI: 10.7868/S0040364413060185. — EDN: REKCXN.
9. Гришин А. М., Якимов А. С. Математическое моделирование процесса зажигания древесины // Термофизика и аэромеханика. — 2013. — Т. 20, № 4. — С. 473–486. — EDN: RBKATR.
10. Кузнецов Г. В., Барановский Н. В. Математическое моделирование зажигания 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 зажигание 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. Зажигание 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., Andreuk 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.: 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 зажигания 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.: Вышш. шк., 1985.
24. Гришин А. М., Фомин В. М. Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. — Новосибирск: Наука, 1984.
25. Шетников 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.*