

УДК 536.468

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ЧАСТИЦ ВЛАЖНОЙ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ В УСЛОВИЯХ КОНВЕКТИВНОЙ ДИФФУЗИИ ВОДЯНЫХ ПАРОВ В ПРИСТЕННОЙ ОБЛАСТИ

Г. В. Кузнецов¹, В. В. Саломатов², С. В. Сыродой¹¹Томский политехнический университет, 634050 Томск, ssyrodoy@yandex.ru²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

Представлены результаты экспериментального и теоретического исследования процессов тепло- и массопереноса, протекающих при воспламенении частиц влажной древесины в высокотемпературной газовой среде. Эксперименты проведены на установке, обеспечивающей условия, соответствующие топочным пространствам котельных агрегатов. Регистрировались основные параметры теплообмена — температура внешней среды, а также интегральные характеристики воспламенения — время задержки. Погрешность регистрации указанных параметров не превышала 18 %. Установлено, что конвективный перенос водяных паров, образующихся при испарении внутрипоровой влаги, и продуктов пиролиза не оказывает существенного влияния на характеристики и условия зажигания. По результатам экспериментов разработана математическая модель процесса воспламенения, которая описывает совместное протекание основных процессов термической подготовки в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и термохимических превращений (термическое разложение органической части топлива, термохимическое взаимодействие водяных паров и углерода кокса, воспламенение летучих) с учетом конвективной диффузии водяных паров и продуктов пиролиза в пристенной газовой области в период индукции. Полученное теоретически время задержки воспламенения удовлетворительно (в пределах доверительного интервала) согласуется с экспериментальным. Численная модель диффузионного пламени удовлетворительно (хорошее соответствие экспериментальных и теоретических значений времени задержки воспламенения) описывает процессы воспламенения частицы влажной древесины.

Ключевые слова: частица влажной древесины, испарение воды, вдув в пристенную область, воспламенение летучих, зажигание кокса.

DOI 10.15372/FGV20180309

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в мировой энергетике роль древесной биомассы в качестве основного топлива для тепловых электрических станций постоянно возрастает [1–3]. Наиболее динамично исследования в области биоэнергетики развиваются в странах Западной Европы (Германия, Дания) [4, 5] и Северной Америки (США, Канада) [6, 7].

Древесина имеет ряд несомненных преимуществ по сравнению с традиционными твердыми (уголь), жидкими (мазут) и газообразными (природный газ) видами энергоносителей. Основное из них заключается в том, что

древесина является практически единственным возобновляемым (в сравнительно короткий период) видом топлива. Так, лесные массивы Западной и Восточной Сибири, Южной Америки и Канады способны воспроизводить до 1 500 т биомассы с одного гектара [8]. Кроме того, основой для производства древесных гранул могут служить отходы деревоперерабатывающих предприятий [9], хранение которых вследствие их высокой пожарной опасности нецелесообразно [10].

Сжигание древесной биомассы, как правило, протекает при относительно низких температурах (900 ÷ 1 400 К) [11], соответственно формируется гораздо меньше оксидов азота по сравнению с пылеугольными или мазутными топочными устройствами [12]. В условиях усиления контроля за нарушением экологических норм выбросов тепловых электростанций [13]

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (проект НШ-7538-2016.8).

© Кузнецов Г. В., Саломатов В. В., Сыродой С. В., 2018.

последнее обстоятельство может существенно снизить себестоимость продукции (тепловая и электрическая энергия) для потребителя. Следует также отметить, что древесное топливо в силу малой зольности образует при сжигании незначительное количество золы и шлаков [14]. Гранулометрический и химический состав последних позволяет использовать их в качестве микронаполнителя строительных смесей (бетон) и материалов (бетоноблоки) [15].

На основании анализа публикаций последних лет [16–19] можно сделать вывод, что применение древесины в качестве базового топлива [16] для тепловых электрических станций или в качестве основы для производства биоэтанола [17], биоугля [18] или биогаза [19] является перспективным направлением в энергетике. Но технологии глубокой термической переработки древесины пока не доведены до промышленного применения по ряду объективных причин. Основная из них — высокая стоимость оборудования (реакторы, осушители, скрубберы и т. д.) технологического цикла [20].

Наиболее перспективный способ использования древесного топлива в энергетике — это прямое его сжигание в топочных устройствах котельных агрегатов [21]. Но пока не разработаны физическая и математическая теории, обеспечивающие достаточно высокий уровень моделирования процессов воспламенения не только влажных, но даже и сухих частиц древесины.

Экспериментальное исследование процессов воспламенения существенно затруднено необходимостью учета большого числа факторов (дисперсность; наличие внешней и связанной влаги; влияние возраста древесины, способа переработки; форма частиц и др.), объективно влияющих на условия зажигания одиночных частиц древесины. Древесина — существенно неоднородный [22] и анизотропный материал [23]. Очевидно, что характеристики теплопереноса в таких структурах и в монолитных веществах (например, металлах) будут значительно отличаться.

Необходимо также отметить недостаточную изученность кинетики процессов воспламенения древесины. Известно [24], что при термическом разложении древесины образуются газообразные продукты пиролиза. Их состав разнообразен и может включать в себя десятки соединений [25]. В силу многообразия видов и пород древесины, экспериментальные ис-

следования динамики термической подготовки и зажигания частиц требуют больших затрат. Поэтому представляется целесообразным заниматься разработкой аппарата математического моделирования процессов тепло- и массопереноса, протекающих совместно при воспламенении влажных (с содержанием влаги до 50 %) частиц древесной биомассы.

К настоящему времени опубликовано мало работ по теоретическому исследованию процессов зажигания древесины. Большинство из разработанных математических моделей [26–30] базируются на существенно упрощающих процесс моделирования допущениях. Например, в работе [26], где проводилось численное моделирование воспламенения слоя древесной биомассы, процессы термического разложения, сопровождающиеся выделением летучих, не рассматривались. В [27] приведена математическая модель, основанная на решении балансных (нульмерных) уравнений энергии с учетом термического разложения и химического реагирования продуктов пиролиза в газовой области, но в ней не учитывалась неоднородность температурного поля. В [28] зажигание слоя древесины исследовалось с учетом термического разложения и формирования слоя горючих газов, однако при этом была принята гипотеза об однородности температурного поля газовой (пристенной) области в целях упрощения моделирования. Наиболее подробно с математической точки зрения зажигание древесной частицы рассмотрено в [29, 30]. Эта модель учитывает теплопроводность в слое древесины, пиролиз топлива, выход летучих, испарение влаги и газофазное воспламенение продуктов пиролиза. Но при этом процесс обезвоживания слоя древесины рассмотрен в рамках представления об испарении воды как химической реакции. Такой подход позволяет упростить модель и учесть процесс испарения при решении формального уравнения химической кинетики, но не имеет физического обоснования, так как фазовые превращения протекают во фронте, а не в слое. Кроме того, модель [29, 30] не учитывает возможного вдува продуктов пиролиза и водяных паров (в случае зажигания высокообводненных топлив) в пристенную газовую область. Однако именно этот процесс, как известно из теории тепло- и массопереноса при работе теплозащитных материалов [31], строительных конструкций [32] и носовых обтекателей летательных аппаратов [33], приводит к существен-

ному охлаждению приповерхностных слоев нагреваемых материалов.

Обобщая вышеизложенное, можно сказать, что известные математические модели зажигания древесины [26–30] пока не в полной мере описывают весь комплекс процессов, протекающих совместно в период индукции в окружающей частицу высокотемпературном газе. Разработка физической модели и соответствующей ей математической теории газофазного зажигания частиц влажной древесины в условиях, аналогичных топочному пространству котельных агрегатов, остается актуальной и не решенной до настоящего времени задачей.

Цель работы — экспериментальное исследование и математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса, протекающих совместно при воспламенении частицы влажной древесины в условиях диффузии и конвекции смеси водяных паров и продуктов пиролиза в малой по толщине области газа вблизи поверхности частицы.

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводили на стенде, схема которого представлена на рис. 1. Частица древесины закреплялась на металлическом держателе и вводилась дистанционно-управляемым координатным устройством в полый керамический цилиндр, внутренняя поверхность которого нагревалась до высокой температуры. Процессы тепло- и массопереноса и воспламенения топливной частицы регистрировались высокоскоростной видеокамерой Photron FASTCAM SA4 5 (скорость видеосъемки до 20 000 кадр/с). Температура воздуха внутри цилиндра (T_g)

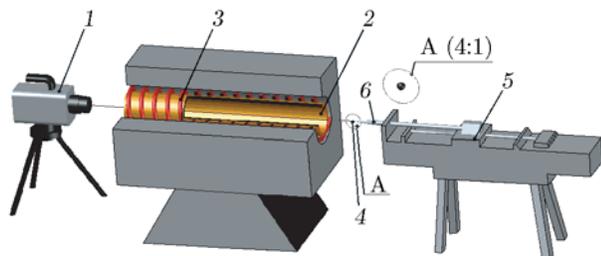


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — высокоскоростная видеокамера, 2 — керамическая труба, 3 — электрический нагреватель, 4 — частица древесины, 5 — дистанционно-управляемое координатное устройство, 6 — металлический держатель

варьировалась в достаточно широком диапазоне ($870 \div 1\,270$ К). Период задержки теплового воздействия (момент ввода частицы в полость цилиндра) до зажигания (появление пламени) считался временем задержки воспламенения (t_{ign}). Диаметр частиц варьировался в диапазоне $1 \leq d \leq 3$ мм. Систематическая погрешность определения основных измеряемых параметров (T_g , t_{ign}) составляла не более 5 %. Доверительный интервал определения t_{ign} при доверительной вероятности 0.95 не превышал 18 %.

Исследовались частицы древесины сибирской лиственницы. Ее теплофизические характеристики [34]: температура $T = 373$ К, теплопроводность $\lambda = 0.18$ Вт/(м·К), теплоемкость $c = 1\,246$ Дж/(кг·К), плотность $\rho = 499.56$ кг/м³. Частицы характерных размеров $d = 1$ и 3 мм вырезали из монолитного сухого фрагмента древесины больших размеров. Затем их взвешивали с целью определения сухой массы. На следующем этапе подготовки эксперимента частицы замачивали в воде и выдерживали в ней несколько часов. После выдержки частицы повторно взвешивали с целью определения влажности. В эксперименте использовались частицы влажностью ≈ 40 %.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2 приведены кадры типичной видеोगраммы процесса воспламенения частицы древесины характерного размера $d = 3$ мм. Температура воздуха (окислителя) $T_g = 1\,270$ К. Общее время от начала нагрева до момента воспламенения $t_{ign} \approx 2.54$ с. Анализ кадров показывает, что процесс термической подготовки древесины можно условно разделить на ряд последовательных стадий: инертный нагрев, испарение влаги, пиролиз, воспламенение летучих, зажигание кокса.

После введения частицы в высокотемпературную среду начинаются интенсивный нагрев топлива (рис. 2,а) и испарение воды. Заметно характерное увеличение яркости свечения поверхности частицы. Прогрев топлива приводит к термическому разложению материала (рис. 2,б). При большом увеличении кадра «б» обнаружено характерное потемнение поверхности частицы. Это обусловлено интенсивным пиролизом древесины с образованием газообразных (летучие) и твердых (кокс) продуктов. При $t = t_{ign}$ происходит воспламене-

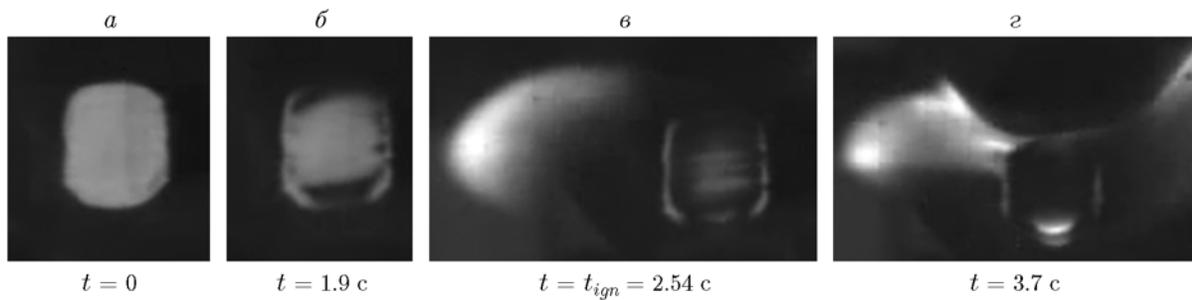


Рис. 2. Типичные кадры видеोगраммы процесса воспламенения частиц влажной древесины

ние (рис. 2,в) летучих. В результате формируется сфера пламени (рис. 2,г), размер которой в 2–3 раза превышает размер частицы. Соответственно, применение метода приведенной тонкой пленки [35] при моделировании процесса горения в этих условиях не имеет обоснований. По результатам экспериментов установлено, что задержка воспламенения частиц влажной древесины составляет $2 \div 25$ с в диапазоне $T_g = 870 \div 1270$ К.

По результатам анализа видеोगрамм сформулированы физическая и математическая модели, описывающие комплекс совместно протекающих процессов термической подготовки и зажигания частиц древесины диаметром $1.5 \div 3.0$ мм (передача тепла теплопроводностью, испарение воды, термическое разложение топлива, взаимодействие водяных паров с углеродом кокса, газофазное воспламенение продуктов пиролиза).

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

3.1. Физическая постановка

В начальный момент времени частица вводится в высокотемпературную среду. В результате интенсивного радиационно-конвективного нагрева инициируется процесс испарения воды. Фронт испарения движется от поверхностных слоев топлива в глубинные. В результате формируется существенно неоднородная гетерогенная структура, состоящая из влажной и сухой древесины. Прогрев сухой древесины приводит к термическому разложению с образованием газообразных (летучие) и твердых продуктов пиролиза (кокс). В условиях быстрого пиролиза происходит термическое разложение топливного слоя, сопровождающееся изменением плотности и пористости. Водяные пары, образующиеся при испарении, фильтруют-

ся сквозь слой сухого топлива, вступая в термохимическое взаимодействие с углеродом кокса. В результате формируются горючие продукты реакции (CO и H_2). Последние совместно с летучими и парами воды фильтруются к поверхности топлива. В малой окрестности частицы образуется парогазовая смесь, зажигающаяся при критических значениях температуры и концентрации. Период от начала нагрева до выделения теплоты в результате химических реакций горения и экспоненциального роста температуры считается временем задержки зажигания.

3.2. Математическая постановка задачи

Математическая постановка задачи воспламенения древесины, соответствующая сформулированной выше физической модели, включает в себя систему нестационарных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных.

Область решения задачи зажигания частицы древесины (для примера — сферической формы) приведена на рис. 3. Частицу в период индукции можно условно разделить на две зоны. Первая представляет собой исходное, еще насыщенное влагой топливо, вторая — сухое дерево. Распределение температуры в такой неоднородной гетерогенной системе описывает уравнение энергии, учитывающее испарение воды, термическое разложение топлива, термохимическое взаимодействие водяных паров и углерода, а также движение водяного пара и продуктов термического разложения сквозь пористый каркас:

$$\frac{\partial H_w}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda_w \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\sin \theta}{r} \lambda_w \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) -$$

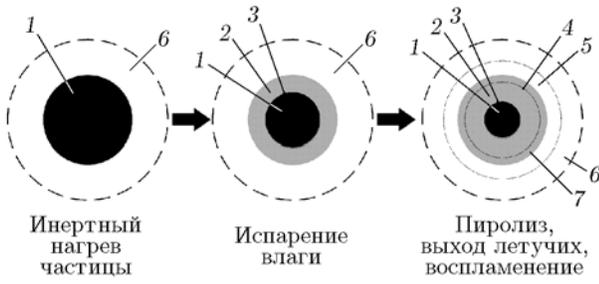


Рис. 3. Схема области решения задачи:

1 — частица влажной древесины, 2 — слой сухой древесины, 3 — граница раздела системы влажная древесина — слой сухого топлива, 4 — граница раздела системы слой сухого топлива — древесина при температуре, большей температуры начала термического разложения, 5 — область взаимодействия продуктов пиролиза и окислителя, 6 — высокотемпературный газ, 7 — древесина при температуре, большей температуры начала термического разложения

$$-\frac{Q_{eva}W_{eva}}{h_{spr}}\delta(r_{eva},\theta_{eva})-\sum_{i=1}^{i=2}Q_iW_i- \\ -c_s\rho_s\left(U_s\frac{\partial T}{\partial r}+V_s\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial\theta}\right)\times \\ \times\Phi(r-r_{eva},\theta-\theta_{eva}). \quad (1)$$

Здесь $\sum_{i=1}^{n=2}Q_iW_i=Q_{w\rightarrow vol}W_{w\rightarrow vol}+Q_{C+H_2O}\times \\ \times W_{C+H_2O}$, $H_w=c_w(r,\theta)\rho_w(r,\theta)T(r,\theta,t)$, H — энтальпия, r — радиус, t — время, W — массовая скорость, Q — тепловой эффект, U — скорость движения водяных паров в радиальном направлении, V — скорость движения водяных паров в азимутальном направлении, h_{spr} — параметр размазывания фронта испарения, δ — функция Дирака, Φ — функция Хевисайда. Индексами обозначены: w — древесина, s — пар, eva — граница раздела влажное топливо — сухой углеродистый каркас, $w\rightarrow vol$ — термическое разложение. Теплофизические характеристики (λ_w , c_w и ρ_w) рассчитывались с учетом положения фронта испарения. Массовая скорость испарения вычислялась по формуле [36]

$$W_{eva}=W_f\exp\left[\frac{Q_{wat}\mu(T(r_{eva},\theta_{eva})-T_f)}{RT_fT(r_{eva},\theta_{eva})}\right] \\ [\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})], \quad (2)$$

где μ — молярная масса воды, R — универсальная газовая постоянная, индексом wat обозначены параметры жидкой воды, f — состояние воды при температуре замерзания. Координата границы испарения находилась согласно выражению

$$r_{eva}=r_{out}-\int_0^t u_F dt, \quad (3)$$

где r_{out} — внешний радиус частицы, $u_F=W_{eva}/\rho_{wat}$ — линейная скорость движения фронта испарения, м/с.

При постановке задачи учитывалось, что водяные пары совместно с продуктами термического разложения движутся сквозь пористый древесный каркас. Распределение давления по радиусу частицы вычислялось при решении уравнения пьезопроводности:

$$\Pi\frac{\partial p}{\partial t}=\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{K_p}{\nu\beta}\frac{\partial p}{\partial r}\right)+ \\ +\frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\frac{\sin\theta}{r}\frac{K_p}{\nu\beta}\frac{\partial p}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{\rho\beta}\sum_{i=1}^{n=2}f_i. \quad (4)$$

Здесь $\sum_{i=1}^{n=2}f_i=\frac{1}{s}(W_{w\rightarrow vol}+W_{C+H_2O\rightarrow CO+H_2})$,

Π — пористость топлива, K_p — коэффициент проницаемости угля, ν — динамическая вязкость, β — степень сжимаемости водяных паров, s — характерный размер поры, f_i — функция, описывающая изменение массового расхода смеси паров воды и пиролизных газов в результате выхода летучих и поглощения водяного пара при его термохимическом взаимодействии с углеродом. Скорость фильтрации пара определялась из дифференциального выражения закона Дарси:

в радиальном направлении

$$U_s=-\frac{K_p}{\nu}\frac{\partial p}{\partial r}, \quad (5)$$

в азимутальном направлении

$$V_s=-\frac{K_p}{\nu}\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial\theta}. \quad (6)$$

Распределение температуры в слое газа вокруг частицы описывается уравнением энергии. Последнее учитывает экзотермические эффекты реакций окисления основных горючих компонентов воздухом:

$$c_g \rho_g \frac{\partial T}{\partial t} + c_g \rho_g \omega(r) \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda_g \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\sin \theta}{r} \lambda_g \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \sum_{i=1}^{i=3} Q_i W_i, \quad (7)$$

где $\sum_{i=1}^{n=3} Q_i W_i = Q_{\text{CH}_4+\text{O}_2} W_{\text{CH}_4+\text{O}_2} + Q_{\text{CO}+\text{O}_2} W_{\text{CO}+\text{O}_2} + Q_{\text{H}_2+\text{O}_2} W_{\text{H}_2+\text{O}_2}$,

$$\omega(r) = U_s(r_{out}, \theta, t) \frac{0.96}{0.07r/s + 0.29} \quad (8)$$

— скорость движения парогазовой смеси [37], м/с, индексом g обозначены параметры газа.

На границе раздела частица древесины — газовая среда принято граничное условие 4-го рода. При этом учитывались экзотермический эффект реакции углерода с кислородом воздуха (по аналогии с [38]) и тепловое излучение внешней среды [39]:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = K_\lambda \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\varepsilon \sigma (T_g^4 - T|_{r=r_0}^4) + Q_{\text{C}+\text{O}_2} W_{\text{C}+\text{O}_2}}{\lambda_w}, \quad (9)$$

$$T(r, \theta, t)|_{r=r_0+0} = T(r, \theta, t)|_{r=r_0-0}.$$

Здесь $K_\lambda = \lambda_g/\lambda_w$, ε — интегральная степень черноты, σ — постоянная Стефана — Больцмана. Скорость реакции $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + 18.67$ МДж/кг вычислялась с использованием закона Аррениуса:

$$W_i = k_{\text{C}+\text{O}_2} \left[1 - \sum_{i=1}^n C_i(r_{out}, \theta, t) \right] \times \eta(r_{out}, \theta, t) \rho_g \exp \left(-\frac{E_{\text{C}+\text{O}_2}}{RT} \right), \quad (10)$$

где k — предэкспонент, C_i — концентрация i -го компонента, η — степень пиролиза топлива, E — энергия. Полагалось, что водяной пар вступает в эндотермическое химическое взаимодействие с углеродом. Скорость реакции $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2 - 118.485$ МДж/кг вычислялась из выражения [40]

$$W_{\text{C}+\text{H}_2\text{O}} = k_{\text{C}+\text{H}_2\text{O}} C_{\text{H}_2\text{O}} \rho_s \exp \left(-\frac{E_{\text{C}+\text{H}_2\text{O}}}{RT} \right). \quad (11)$$

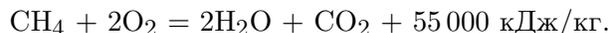
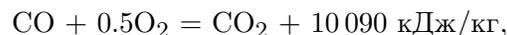
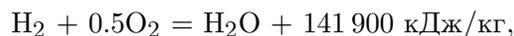
Принято, что разложение топлива с выделением летучих начинается при условии, что температура поверхности частицы достигает или превышает температуру начала термического разложения. Процесс термического разложения описывается уравнением химической кинетики:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = [1 - \eta] k_{w \rightarrow vol} \exp \left(-\frac{E_{w \rightarrow vol}}{RT} \right). \quad (12)$$

Скорость пиролиза рассчитывалась по формуле

$$W_i = V_0 [1 - \eta] k_{w \rightarrow vol} \rho_1 \exp \left(-\frac{E_{w \rightarrow vol}}{RT} \right). \quad (13)$$

Продукты термической деструкции и химического взаимодействия твердого остатка и водяных паров вдуваются в «пристенную» область. Формируется газовая смесь, воспламеняющаяся при достижении критических значений температуры и концентрации горючего [41]. Период времени от начала теплового воздействия на частицу до начала интенсивного химического взаимодействия парогазовой смеси с окислителем считается временем задержки воспламенения. В момент зажигания скорость выделения тепла за счет окисления горючего сравнивается со скоростью поступления тепла от источника нагрева (внешняя среда). В непосредственной близости от поверхности частицы учитывалось протекание трех наиболее значимых реакций [42]:



Их скорости вычислялись из закона Аррениуса:

$$W_i = k_i C_i(r, \theta, t) \left(1 - \sum_{i=1}^n C_i(r, \theta, t) \right) \times \rho_g \exp \left(-\frac{E_i}{RT} \right). \quad (14)$$

Концентрации компонентов парогазовой смеси (H_2 , CO , CH_4 , CO_2 и H_2O) в пристенной области рассчитывались при решении уравнений диффузии для соответствующего компонента реакции:

$$\rho_g \frac{\partial C_i}{\partial t} + \rho_g \omega(r) \frac{\partial C_i}{\partial r} = \rho_g \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 D_i \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) + \frac{\rho_g}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\sin \theta}{r} D_i \frac{\partial C_i}{\partial \theta} \right) - \sum_{i=1}^3 W_i, \quad (15)$$

где D — коэффициент диффузии.

Как известно [43], при термическом разложении древесины происходит деструкция, сопровождающаяся увеличением размера пор. В этих условиях при постановке задачи учитывалось изменение плотности и пористости древесины:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = (\rho - \rho_{e(w \rightarrow vol)}) k_{w \rightarrow vol} \times \exp \left(-\frac{E_{w \rightarrow vol}}{RT} \right), \quad (16)$$

$$\Pi_p = \Pi_0 \frac{\rho - \rho_0}{\rho_{e(w \rightarrow vol)} - \rho_0}, \quad (17)$$

индексом $e(w \rightarrow vol)$ обозначены параметры в конце термического разложения.

Система уравнений (1)–(17) решалась при следующих начальных:

$$t = 0:$$

$$T(r, \theta, 0) = T_0 = 298 \text{ К}, \quad p(r, \theta, 0) = p_{atm},$$

$$\rho(r, \theta, 0) = \rho_0, \quad \eta(r, \theta, 0) = 0$$

$$\text{при } 0 < r < r_{out}, 0 < \theta < \pi;$$

$$T(r, \theta, 0) = T_g, \quad C_i(r, \theta, 0) = 0$$

$$\text{при } r_{out} < r < r_g, 0 < \theta < \pi,$$

и граничных условиях:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\substack{r=0 \\ 0 < \theta < \pi}} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{\substack{0 < r < r_g \\ \theta=0 \\ \theta=\pi}} = 0,$$

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right|_{\substack{r=r_g \\ 0 < \theta < \pi}} = 0, \quad \left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{\substack{r=0 \\ 0 < \theta < \pi}} = 0,$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial \theta} \right|_{\substack{0 < r < r_{out} \\ \theta=0 \\ \theta=\pi}} = 0, \quad \left. p \right|_{\substack{r=r_{out} \\ 0 < \theta < \pi}} = p_{atm}, \quad (18)$$

$$\left. \frac{\partial C_i}{\partial r} \right|_{\substack{r=r_{out} \\ 0 < \theta < \pi}} = \frac{W_i}{\rho_g D_i},$$

$$\left. \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} \right|_{\substack{r=r_g \\ 0 < \theta < \pi}} = 0, \quad \left. \frac{\partial c}{\partial \theta} \right|_{\substack{0 < r < r_g \\ \theta=0 \\ \theta=\pi}} = 0,$$

где p_{atm} — давление внешней среды. Теплопроводность, теплоемкость и плотность влажной и «обезвоженной» частей древесины рассчитывались с учетом объемных долей компонентов:

$$\lambda_w = \begin{cases} \lambda_1, r \leq r_{eva}, \\ \lambda_2, r > r_{eva}, \end{cases}$$

$$c_w = \begin{cases} c_1, r \leq r_{eva}, \\ c_2, r > r_{eva}, \end{cases}$$

$$\rho_w = \begin{cases} \rho_1, r \leq r_{eva}, \\ \rho_2, r > r_{eva}, \end{cases}$$

$$\lambda_1 = \varphi_3 \lambda_3 + \varphi_4 \lambda_4, \quad \lambda_2 = \varphi_3 \lambda_3 + \varphi_5 \lambda_5, \quad (19)$$

$$c_1 = \varphi_3 c_3 + \varphi_4 c_4, \quad c_2 = \varphi_3 c_3 + \varphi_5 c_5, \quad (20)$$

$$\rho_1 = \varphi_3 \rho_3 + \varphi_4 \rho_4, \quad \rho_2 = \varphi_3 \rho_3 + \varphi_5 \rho_5, \quad (21)$$

где φ_i — объемная доля: $i = 3$ — воды, $i = 4$ — древесины, $i = 5$ — водяных паров. Теплофизические характеристики парогазовой смеси также рассчитывались с учетом объемных долей компонентов:

$$\lambda_g = \sum_{i=1}^n \varphi_i \lambda_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n \varphi_i \right) \lambda_g, \quad (22)$$

$$c_g = \sum_{i=1}^n \varphi_i c_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n \varphi_i \right) c_g, \quad (23)$$

$$\rho_g = \sum_{i=1}^n \varphi_i \rho_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n \varphi_i \right) \rho_g. \quad (24)$$

Объемные доли компонентов парогазовой смеси вычислялись из их массовых концентраций:

$$\varphi_i = \frac{C_i}{\rho_i} / \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\rho_i}. \quad (25)$$

Термохимические константы

Реакция	E_i , Дж/моль	k_i , c^{-1}
Термическое разложение $w \rightarrow vol$	$180.6 \cdot 10^3$	$2.98 \cdot 10^7$ [45]
$H_2O + C = CO + H_2$	$220 \cdot 10^3$	$2.07 \cdot 10^7$ [46, 47]
$CO + O_2 = CO_2$	$200.0 \cdot 10^3$	$2.50 \cdot 10^{12}$ [48]
$H_2 + 0.5 \cdot O_2 = H_2O$	$105.0 \cdot 10^3$	$1.13 \cdot 10^{17}$ [49]
$CH_4 + O_2 = CO_2 + 2 \cdot H_2O$	$35 \cdot 10^3$	$5.1 \cdot 10^{14}$ [50]

3.3. Исходные данные

При проведении численных расчетов процесса зажигания использовались те же значения теплофизических характеристик [34], что и в эксперименте (см. § 2): $T = 373$ К, $\lambda = 0.18$ Вт/(м·К), $c = 1246$ Дж/(кг·К), $\rho = 499.56$ кг/м³. Как было указано ранее, нагрев древесины протекал в условиях ее термического разложения, сопровождающегося выходом летучих. Состав последних для лиственницы взят из работы [44]: CO₂ — 59.4 %, CO — 36.2 %, CH₄ — 4.2 %, H₂ — 0.2 % (по массе). Термохимические константы [45–50] приведены в таблице. Численные исследования выполнены при следующих исходных данных: $T_0 = T(r, \theta, t) = 298$ К, $p_0 = 101325$ Па, $\eta_0 = 0$, $\mu = 0.018$ кг/моль, $K_p = 10^{-11}$ м².

3.4. Метод решения уравнений

Сформулированная задача математической физики решена методом конечных разностей [51, 52]. Аппроксимация уравнений проведена с использованием неявного четырехточечного разностного шаблона [53]. Например, уравнение (1) аппроксимировалось следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial t} = & \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \\ & + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\sin \theta}{r} \lambda \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) - \\ & - \frac{Q_{eva} W_{eva}}{h_{spr}} \delta(r_{eva}, \theta_{eva}) - \sum_{i=1}^{i=2} Q_i W_i - \\ & - c_s \rho_s \left(U_s \frac{\partial T}{\partial r} + V_s \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \Phi(r - r_{eva}, \theta - \theta_{eva}) \rightarrow \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow & \frac{H_{i,j}^{n+1/2} - H_{i,j}^n}{\tau} = \\ & = \frac{1}{r_{i,j}^2 h_r} \left(\lambda_{i+1/2,j} r_{i+1/2,j}^2 \frac{T_{i+1,j}^{n+1/2} - T_{i,j}^{n+1/2}}{h_r} - \right. \\ & \quad \left. - \lambda_{i-1/2,j} r_{i-1/2,j}^2 \frac{T_{i,j}^{n+1/2} - T_{i-1,j}^{n+1/2}}{h_r} \right) - \\ & \quad - \frac{Q_{eva} W_{eva}}{2 h_{spr}} \delta(r_{eva}, \theta_{eva}) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=2} Q_i W_i - \\ & \quad - \frac{c_s \rho_s U_s}{2} \frac{T_{i+1,j}^{n+1/2} - T_{i-1,j}^{n+1/2}}{2 h_r} \Phi(r_{eva}, \theta_{eva}) \rightarrow \\ \rightarrow & \frac{H_{i,j}^{n+1} - H_{i,j}^{n+1/2}}{\tau} = \frac{1}{r_{i,j} \sin \theta_{i,j} h_\theta} \times \\ & \quad \times \left(\lambda_{i,j+1/2} \frac{\sin \theta_{i,j+1/2}}{r_{i,j}} \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{h_\theta} - \right. \\ & \quad \left. - \lambda_{i,j-1/2} \frac{\sin \theta_{i,j-1/2}}{r_{i,j}} \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j-1}^{n+1}}{h_\theta} \right) - \\ & \quad - \frac{Q_{eva} W_{eva}}{2 h_{spr}} \delta(r_{eva}, \theta_{eva}) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=2} Q_i W_i - \\ & \quad - \frac{c_s \rho_s V_s}{2} \frac{T_{i,j+1}^{n+1/2} - T_{i,j-1}^{n+1/2}}{2 h_r} \Phi(r_{eva}, \theta_{eva}). \end{aligned}$$

Аппроксимация коэффициента теплопроводности λ проводилась по схеме $\lambda_{i+1/2} = 0.5 \cdot (\lambda_{i+1} + \lambda_i)$, $\lambda_{i-1/2} = 0.5 \cdot (\lambda_{i+1} - \lambda_i)$. По аналогии аппроксимировались $r_{i+1/2}$ и $r_{i-1/2}$.

Уравнения и краевые условия (2)–(25) аппроксимировались по аналогичной схеме. Необходимо отметить, что расчет процессов зажигания топлива при значительных фазовых превращениях (в частности, при испарении) является одним из самых сложных в теории горения. Связано это с тем, что испарение воды протекает в очень узкой области (фронт испарения), много меньшей линейного размера частицы. При этом, как правило, тепловые эффекты фазовых переходов очень высоки (до $2.5 \cdot 10^6$ Дж/кг). В результате во влажной частице возникает внутренний сток теплоты и формируется существенно неоднородная гетерогенная структура. Стоит отметить, что асимптотики процессов испарения и зажигания существенно отличаются. Непосредственно зажигание (химическая реакция) — процесс быстро протекающий, испарение — медленный. Такое соотношение характерных времен существенно усложняет теоретическое исследование процессов инициирования горения. Также необходимо отметить, что математическое моделирование фазовых переходов (испарение воды) в многомерной постановке (двух- или трехмерной) очень трудная операция. Это обусловлено тем, что при нагреве в теле формируется фронт фазового перехода, граница которого может принимать различные формы, зависящие от тепловых потоков в окрестности зоны фазового перехода. Такие задачи называются многофронтными задачами Стефана, и они являются одними из самых сложных в математической физике. По этой причине для решения поставленной задачи нами был разработан специальный алгоритм, основанный на применении метода неявного выделения фронта фазового перехода [54].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С целью верификации математической модели (1)–(25) проведен сравнительный анализ экспериментальных и рассчитанных численно значений времени задержки воспламенения древесных частиц.

На рис. 4 приведены теоретические (численное решение системы (1)–(25)) и экспериментальные зависимости времени задержки воспламенения частицы влажной ($\varphi \approx 40\%$) древесины от температуры внешней среды. Последняя, как видно из рисунка, оказывает существенное влияние на характеристики и условия воспламенения частиц влажной древесины.

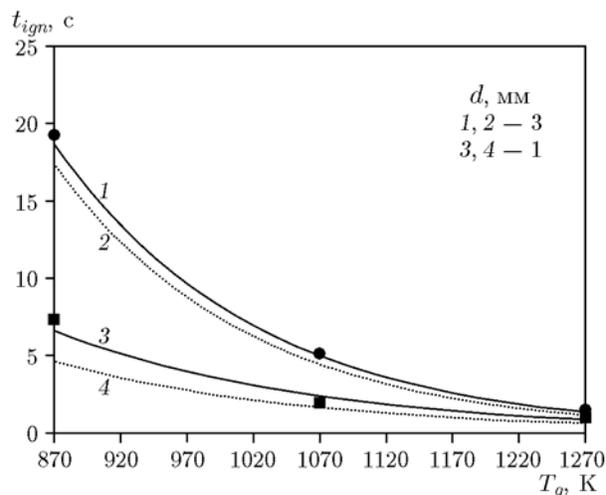


Рис. 4. Зависимость времени задержки воспламенения частиц влажной древесины различных форм и размеров от температуры среды:

1, 3 — эксперимент, 2, 4 — численное решение системы (1)–(25)

При этом зависимости $t_{ign}(T_g)$ имеют существенно нелинейный характер, что обусловлено влиянием процессов термической подготовки, протекающих в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и термохимических (термическое разложение, термохимическое взаимодействие водяных паров и углерода кокса) превращений. Характерный размер частицы также оказывает существенное влияние на характеристики и условия воспламенения. Так, изменение диаметра частицы с 3 до 1.5 мм приводит к снижению времени задержки зажигания в три раза (с 30 до 10 с).

После верификации математической модели проведено моделирование процессов воспламенения частиц влажной древесины.

На рис. 5 приведены результаты сравнительного анализа времен задержки воспламенения, полученных при численном моделировании в условиях диффузии и конвекции в пристенной области продуктов пиролиза и водяных паров и в условиях отсутствия конвективного переноса. Анализ зависимостей $t_{ign}(T_g)$ показал, что конвективный поток массы в малую окрестность топливной частицы оказывает влияние на характеристики и условия воспламенения, но это влияние незначительно. Так, при $T_g = 870$ К учет конвективной диффузии приводит к увеличению времени задержки воспламенения на 0.3 с ($\approx 5\%$). Последнее

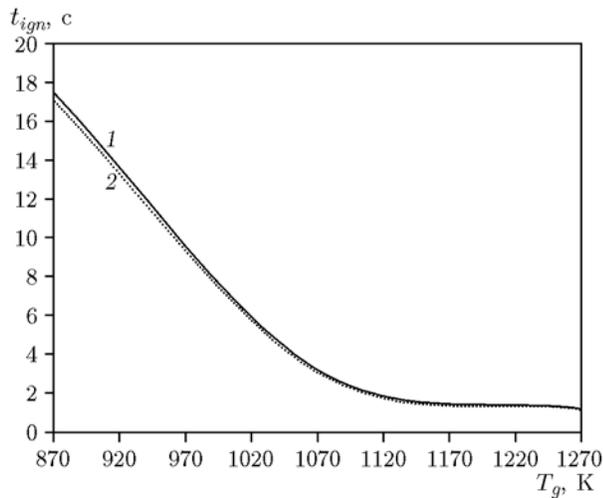


Рис. 5. Время задержки воспламенения частиц влажной древесины в условиях молекулярной (линия 2) и молекулярно-конвективной (линия 1) диффузии

обусловлено тем, что в условиях конвективной диффузии продукты пиролиза уносятся парами воды и необходимые (по концентрациям) условия зажигания достигаются при больших значениях времени теплового воздействия и всех других идентичных параметров.

На рис. 6 приведены распределения безразмерной температуры в системе древесная

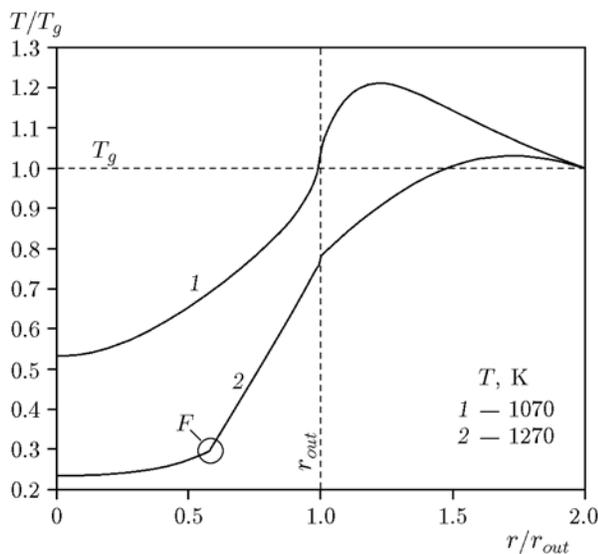


Рис. 6. Распределение температуры в системе древесная частица — газовая среда в момент воспламенения летучих ($d = 3$ мм) (F — температура фронта испарения)

частица — газовая среда в момент воспламенения летучих. Видно, что инициирование горения газообразных продуктов пиролиза происходит на некотором удалении (примерно в половину диаметра) от поверхности частицы. Соответственно, можно обоснованно предположить, что конвективная диффузия газообразных продуктов пиролиза во внешнюю газовую область играет несущественную роль в процессе зажигания частиц влажной древесины.

Анализ зависимостей $T(r, \theta, t)$ (см. рис. 6) показал также, что возможно зажигание и водонасыщенных частиц древесины. Очевидно, что динамика горения такого топлива в условиях продолжающегося испарения воды будет существенно отличаться от окисления сухой древесины. Скорее всего, интенсивный приток водяных паров в малую окрестность топливной частицы приведет к формированию «буферной» зоны, препятствующей диффузии окислителя к поверхности топлива. Установлено, что возможны два режима зажигания: высокотемпературный и низкотемпературный с условной границей разделения $T_g = 1070$ К. При $T_g < 1070$ К зажигание происходит в гетерогенном режиме (иницируется горение кокса), при $T_g > 1070$ К — в диффузионном режиме (воспламенение летучих). Последнее было обнаружено также и в эксперименте.

Анализ результатов [26–30] показал, что в настоящее время нет экспериментальных данных по зажиганию коксового остатка древесных частиц. Это обусловлено тем, что в условиях горения летучих практически невозможно на фоне пламени выделить момент зажигания кокса. Поэтому проведено только прогностическое моделирование воспламенения коксового остатка.

Зависимости времени задержки зажигания коксового остатка от температуры газа представлены на рис. 7. Кокс начинает гореть практически сразу после воспламенения летучих. Сравнительный анализ времен задержки воспламенения летучих и кокса показал, что интервал между моментами их зажигания не превышает 0.5 с при общем времени $t = 5.35$ с. Соответственно, можно сказать, что в период термической подготовки (нагрев, испарение влаги и термическое разложение) основной слой топлива прогревается до температур, близких к температуре зажигания коксового остатка. Поэтому сразу после воспламенения летучих в результате интенсивного воздей-

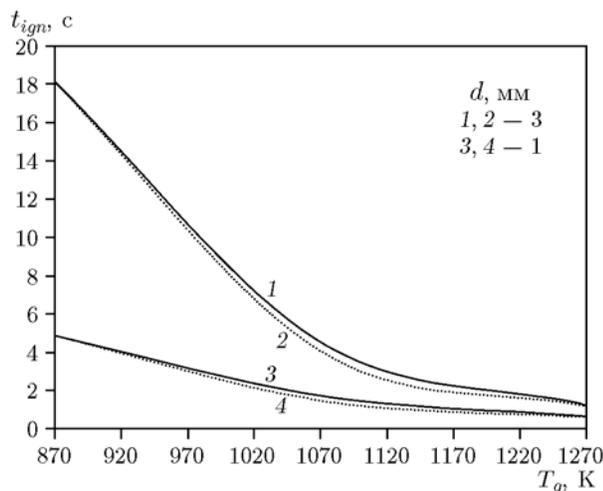


Рис. 7. Времена задержки зажигания летучих и коксового остатка частиц влажной древесины:

1, 3 — зажигание кокса, 2, 4 — воспламенение летучих

ствия пламени происходит зажигание твердых продуктов пиролиза (кокс).

На рис. 8 приведены распределения температуры в системе частица древесины — газовая среда в момент зажигания коксового остатка. Можно отметить, что в условиях высоких температур внешней среды ($T_g \geq 1270$ K) в частице формируются большие градиенты температуры. При этом зажигание кокса происходит до полного обезвоживания древесной

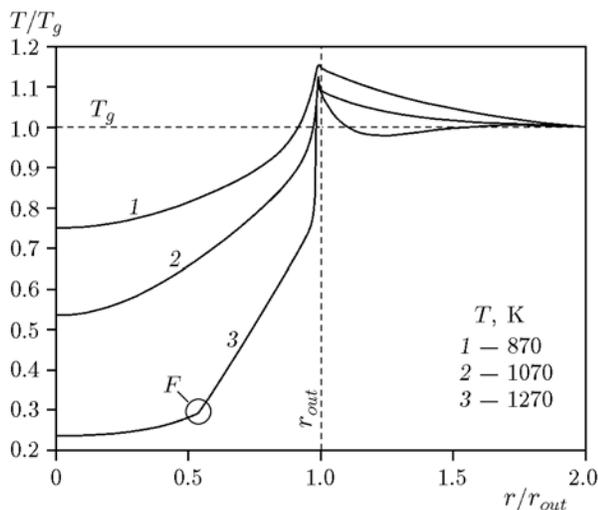


Рис. 8. Распределение температуры в системе древесная частица — газовая среда в момент зажигания коксового остатка ($d = 3$ мм)

частицы. Можно обоснованно предположить, что внутрипоровое давление водяных паров и сильные термические напряжения, возникающие вследствие перепадов температуры, создают в топливе зоны высоких напряжений, которые могут приводить к механическому разрушению структуры топлива. Анализ зависимостей $T(r, \theta, t)$ на рис. 8 показывает, что при относительно низких температурах внешней среды ($T_g \leq 1070$ K) зажигание возможно только после прогрева древесной частицы выше температуры парообразования.

На рис. 9 приведены распределения концентраций основных горючих компонентов в момент воспламенения. Видно, что в результате пиролиза формируются большие градиенты концентрации продуктов пиролиза. При этом для зажигания летучих достаточно небольшого их количества (не более 3 %). Последнее обусловлено тем, что диффузия газообразных продуктов пиролиза протекает при высоких температурах. Вследствие высокой реакционной способности основных компонентов летучих (CO , CH_4 , H_2), воспламенение может произойти при относительно малых концентрациях. Как показал анализ зависимостей, динамику воспламенения в первую очередь определяет концентрация монооксида углерода. Это обусловлено тем, что горючие газообразные продукты пиролиза в основном состоят из CO . Водород имеет наименьшую концентрацию среди всех компонентов летучих.

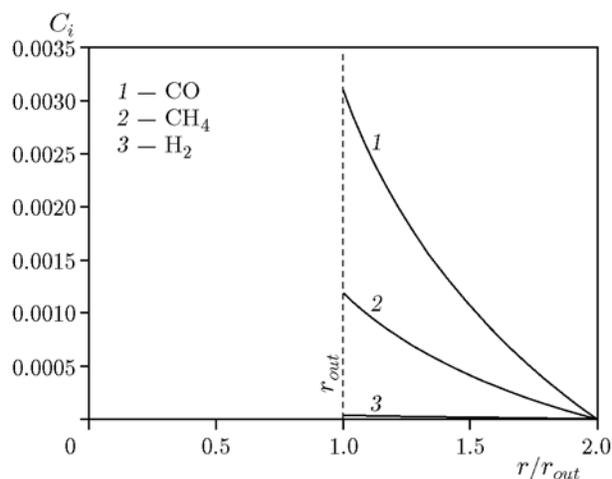


Рис. 9. Концентрации основных горючих компонентов топлива в момент воспламенения летучих

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований установлено, что конвекция водяных паров и продуктов пиролиза в пристенную область может оказывать влияние на характеристики и условия воспламенения частиц влажной древесины, но это влияние незначительно. Показано, что учет движения летучих в газовой области при моделировании процессов воспламенения приводит к несущественному увеличению индукционного периода (в пределах 5 %). При этом в условиях высокой температуры внешней среды топливная частица может воспламеняться еще до полного испарения влаги.

Сравнительный анализ времен задержки воспламенения, полученных экспериментально и теоретически, показал их хорошее согласие. Последнее свидетельствует о хорошем прогностическом потенциале разработанной математической модели процесса зажигания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Favero A., Massetti E. Trade of woody biomass for electricity generation under climate mitigation policy // *Resource and Energy Economics*. — 2014. — V. 36. — P. 166–190.
2. Dodder R. S., Kaplan P. O., Elobeid A., Tokgoz S., Secchi S., Kurkalova L. A. Impact of energy prices and cellulosic biomass supply on agriculture, energy, and the environment: An integrated modeling approach // *Energy Economics*. — 2015. — V. 51. — P. 77–87.
3. Boying L., Shumway R. C., Yoder J. K. Life-cycle economic analysis of biofuels: accounting for economic substitution in policy assessment // *Energy Economics*. — 2017. — V. 67. — P. 146–158.
4. Bertrand V. Carbon and energy prices under uncertainty: A theoretical analysis of fuel switching with heterogeneous power plants // *Resource and Energy Economics*. — 2014. — V. 38. — P. 198–220.
5. Voytenko Y., Peck P. Organisational frameworks for straw-based energy systems in Sweden and Denmark // *Biomass and Bioenergy*. — 2012. — V. 38. — P. 34–48.
6. Lixia He, English B. C., Menard R. J., Lambert D. M. Regional woody biomass supply and economic impacts from harvesting in the southern U. S. // *Energy Economics*. — 2016. — V. 60. — P. 151–161.
7. Johnston C. M. T., van Kooten G. C. Economics of co-firing coal and biomass: An application to Western Canada // *Energy Economics*. — 2015. — V. 48. — P. 7–17.
8. Sidorenkov V. M., Mikhaylovich N. M., Jafarov A. V., Nadilshina I. Yu. The potential for natural forest regeneration in the southern taiga zone of Siberia // *Forestry Eng. J.* — 2016. — V. 2. — P. 46–56.
9. Vassilev S. V., Baxter D., Andersen L. K., Vassileva C. G. An overview of the chemical composition of biomass // *Fuel*. — 2010. — V. 89. — P. 913–933.
10. Bhargava A., Dlugogorski B. Z., Kennedy E. M. Emission of polyaromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls and polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and furans from fires of wood chips // *Fire Saf. J.* — 2002. — V. 37. — P. 659–672.
11. Toledo M., Rosales C., Silvestre C., Caro S. Numerical simulation of the hybrid filtration combustion of biomass // *Intern. J. Hydrogen Energy*. — 2016. — V. 41. — P. 21131–21139.
12. Wielgosinski G., Lechtanska P., Namiecinska O. Emission of some pollutants from biomass combustion in comparison to hard coal combustion // *J. Energy Inst.* — 2017. — V. 90. — P. 787–796.
13. AlRafea K., Elkamel A., Abdul-Wahab S. A. Cost-analysis of health impacts associated with emissions from combined cycle power plant // *J. Cleaner Production*. — 2016. — V. 139. — P. 1408–1424.
14. Teixeira P., Lopes H., Gulyurtlu I., Lapa N., Abelha P. Evaluation of slagging and fouling tendency during biomass co-firing with coal in a fluidized bed // *Biomass and Bioenergy*. — 2012. — V. 39. — P. 192–203.
15. Matakah F., Soroushian P., Abideen S. U., Peyvandi A. Use of non-wood biomass combustion ash in development of alkali-activated concrete // *Construct. Build. Mater.* — 2016. — V. 121. — P. 491–500.
16. Saastamoinen J., Aho M., Moilanen A., Sørensen L. H., Clausen S., Berg M. Burnout of pulverized biomass particles in large scale boiler — Single particle model approach // *Biomass and Bioenergy*. — 2010. — V. 34. — P. 728–736.
17. Millingera M., Ponitkab J., Arendtb O., Thrän D. Competitiveness of advanced and conventional biofuels: Results from least-cost modelling of biofuel competition in Germany // *Energy Policy*. — 2017. — V. 107. — P. 394–402.
18. Asadullah M., Adi A. M., Suhada N., Hanina N. M., Saringat M. I., Azdarpour A. Optimization of palm kernel shell torrefaction to produce energy densified bio-coal // *Energy Convers. Manag.* — 2014. — V. 88. — P. 1086–1093.
19. Kadam R., Panwar N. L. Recent advancement in biogas enrichment and its applications // *Renew. Sustain. Energy Rev.* — 2017. — V. 73. — P. 892–903.
20. Ahmad A. A., Zawawi N. A., Kasim F. H., Inayat A., Khasri A. Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass

- gasification process conditions, optimization and economic evaluation // *Renew. Sustain. Energy Rev.* — 2016 — V. 53. — P. 1333–1347.
21. **Gebregeziabher T., Oyedunb A. O., Luk H. T., Lamb T. Y. G., Zhang Y., Hui C. W.** Design and optimization of biomass power plant // *Chem. Eng. Res. Design.* — 2014. — V. 92. — P. 1412–1427.
 22. **Nilssona T., Rowell R.** Historical wood — structure and properties // *J. Cultur. Heritage.* — 2012. — V. 13. — P. 5–9.
 23. **Erchiqui F., Annasabi Z., Souli M., Slaoui-Hasnaoui F.** 3D numerical analysis of the thermal effect and dielectric anisotropy on thawing frozen wood using microwave energy // *Intern. J. Therm. Sci.* — 2015. — V. 89. — P. 58–78.
 24. **Moreno A. I., Font R.** Pyrolysis of furniture wood waste: Decomposition and gases evolved // *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* — 2015. — V. 113. — P. 464–473.
 25. **Jiang S., Hu X., Shao X., Song Y., Xia D., Li C.-Z.** Effects of thermal pretreatment and ex-situ grinding on the pyrolysis of mallee wood cylinders // *Fuel Proces. Technol.* — 2017. — V. 159. — P. 211–221.
 26. **DiDomizio M.J., Mulherin P., Weckman E. J.** Ignition of wood under time-varying radiant exposures // *Fire Saf. J.* — 2016. — V. 82. — P. 131–144.
 27. **Blijderveen M. V., Bramer E. A., Brem G.** Modelling spontaneous ignition of wood, char and RDF in a lab-scale packed bed // *Fuel.* — 2013. — V. 108. — P. 190–196.
 28. **Zhou Y. Y., Walther D. C., Fernandez-Pello A. C.** Numerical analysis of piloted ignition of polymeric materials // *Combust. Flame.* — 2002. — V. 131. — P. 147–158.
 29. **Гришин А. М.** Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. — Новосибирск: Наука, 1992.
 30. **Гришин А. М., Долгов А. А., Зима В. П., Крючков Д. А., Рейно В. В., Субботин А. Н., Цвык Р. Ш.** Исследование зажигания слоя лесных горючих материалов // *Физика горения и взрыва.* — 1998. — Т. 34, № 6. — С. 14–22.
 31. **Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б.** Тепловая защита. — М.: Энергия, 1976.
 32. **Страхов В. Л., Гаращенко А. Н., Кузнецов Г. В., Рудзинский В. П.** Высокотемпературный теплообмен в слое влажосодержащего огнезащитного материала // *Теплофизика высоких температур.* — 2000. — Т. 38, № 6. — С. 958–962.
 33. **Формалев В. Ф.** Теплообмен в анизотропных телах // *Теплофизика высоких температур.* — 2001. — Т. 39, № 5. — С. 810–832.
 34. **Lagüela S., Bison P., Peron F., Romagnoni P.** Thermal conductivity measurements on wood materials with transient plane source technique // *Thermochim. Acta.* — 2015. — V. 600. — P. 45–51.
 35. **Хитрин Л. Н., Цуханова О. А.** Горение углерода // *Успехи физ. наук.* — 1950. — Т. XLI, № 3.
 36. **Хашченко А. А., Вечер О. В., Дискаева Е. И.** Исследование температурной зависимости скорости испарения жидкостей со свободной поверхности и скорости кипения жидкости на твердой поверхности нагрева // *Изв. Алт. гос. ун-та.* — 2016. — № 1. — С. 84–87.
 37. **Абрамович Г. Н.** Теория турбулентных струй. — М.: Физматгиз, 1960.
 38. **Pratono W., Zhang J., Cui J., Wang Y., Zhang L.** Influence of inherent moisture on the ignition and combustion of wet Victorian brown coal in air-firing and oxy-fuel modes: Part 1: The volatile ignition and flame propagation // *Fuel Proces. Technol.* — 2015. — V. 138. — P. 670–679.
 39. **Kuznetsov G. V., Kurilenko N. I., Maksimov V. I., Mamontov G. Ya., Nagornova T. A.** Heat transfer under heating of a local region of a large production area by gas infrared radiators // *J. Eng. Phys. Thermophys.* — 2013. — V. 86. — P. 519–524.
 40. **Гремячкин В. М., Мазанченко Е. П.** Взаимодействие пористой частицы углерода с водяным паром и диоксидом углерода // *Физика горения и взрыва.* — 2011. — Т. 47, № 4. — С. 76–81.
 41. **Франк-Каменецкий Д. А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987.
 42. **Syrodoy S. V., Kuznetsov G. V., Zhakharevich A. V., Gutareva N. Y., Salomatov V. V.** The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal-water fuel particles ignition in high temperature environment // *Combust. Flame.* — 2017. — V. 180. — P. 196–206.
 43. **Poletto M., Zattera A. J., Santana R. M. C.** Thermal decomposition of wood: Kinetics and degradation mechanisms // *Bioresour. Technol.* — 2012. — V. 126. — P. 7–12.
 44. **Park H. J., Dong J.-I., Jeon J.-K., Park Y.-K., Yoo K.-S., Kim S.-S., Kime J., Kim S.** Effects of the operating parameters on the production of bio-oil in the fast pyrolysis of Japanese larch // *Chem. Eng. J.* — 2008. — V. 143. — P. 124–132.
 45. **Rollinson A. N., Karmakar M. K.** On the reactivity of various biomass species with CO₂ using a standardised methodology for fixed-bed gasification // *Chem. Eng. Sci.* — 2015. — V. 128. — P. 82–91.
 46. **Watanabe H., Ashizawa H. M., Otaka M., Hara S., Inumaru A.** Development on numerical simulation technology of heavy oil gasifier // *CRIEPI Rep. W01023.* — 2002. — [in Japanese].

47. **Umeki K., Yamamoto K., Namioka T., Yoshikawa K.** High temperature steam-only gasification of woody biomass // Appl. Energy. — 2010. — V. 87. — P. 791–798.
48. **Mantzaras J.** Catalytic combustion of syngas // Combust. Sci. Technol. — 2008. — V. 180. — P. 1137–1168.
49. **Jian C. W., Jennifer W., Xiang S. L., Jin G.** Single-step chemistry model and transport coefficient model for hydrogen combustion // Sci. China Technol. — 2012. — V. 55. — P. 2163–2168.
50. **Zhang X., Wang T., Xu J., Zheng S., Hou X.** Study on flame-vortex interaction in a spark ignition engine fueled with methane/carbon dioxide gases // J. Energy Inst. — 2017. — DOI org/10.1016/j.joei.2016.09.005.
51. **Roache J.** Computational Fluid Dynamics. — Albuquerque: Hermosa, 1976.
52. **Самарский А. А.** Однородные разностные схемы для нелинейных уравнений параболического типа // Журн. вычисл. математики и матем. физики. — 1962. — Т. 2, № 1. — С. 25–56.
53. **Кузнецов Г. В., Мамонтов Г. Я., Таратушкина Г. В.** Численное моделирование зажигания конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40. — С. 70–76.
54. **Самарский А. А., Моисеенко Б. Д.** Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журн. вычисл. математики и матем. физики. — 1965. — Т. 5, № 5. — С. 816–827.

Поступила в редакцию 1/IX 2017 г.
