

УДК 536.4

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДАВЛЕНИЯ ПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Д. В. Антонов, А. О. Жданова, Г. В. Кузнецов

Томский политехнический университет, 634050 Томск, zhdanovaao@tpu.ru

Предложен подход к математическому моделированию процесса подавления термического разложения и пламенного горения лесных горючих материалов (ЛГМ), отличающийся от известных представлением слоя пиролизующегося ЛГМ гетерогенной структурой с высокой пористостью и описанием теплофизических характеристик этого слоя в рамках аддитивных математических моделей теплопроводности, теплоемкости и плотности. Выполнены экспериментальные исследования основных теплофизических характеристик (теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность) типичных ЛГМ. Проведено математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в рассматриваемых условиях, определены характеристики процесса подавления реакции деструкции типичного ЛГМ при использовании установленных в проведенных экспериментах значений теплофизических характеристик. Выделены диапазоны изменения интегральных характеристик подавления горения ЛГМ при варьировании в допустимых пределах теплофизических характеристик ЛГМ.

Ключевые слова: пламенное горение, термическое разложение, подавление, лесной горючий материал, теплофизические свойства, пористость.

DOI 10.15372/FGV20200207

### ВВЕДЕНИЕ

Частота возникновения лесных пожаров увеличивается с каждым годом [1, 2]. Так, например, в 2016 г. на территорию Дальневосточного, Сибирского и Уральского федеральных округов России пришлось около 11 000 возгораний бореального массива [1, 2]. На территории РФ и США типичным лесным горючим материалом (ЛГМ) является хвоя сосны [3–5]. Листья и сосновые иглы [6] средиземноморских видов становятся легковоспламеняющимися, когда содержание влаги уменьшается ниже предельных значений.

Для подавления горения ЛГМ, как правило, применяют авиацию [7–9]. Экспериментально и теоретически установлены удельные характеристики распределения необходимой для подавления пожара воды при ее поступлении (сбросе) с борта воздушного судна в зависимости от параметров полета последнего [10, 11]. Также экспериментально и численно установлены [12, 13] макроскопические закономерности подавления реакции термического разложения

типичных ЛГМ парокапельным водяным потоком. Изучение определяющих факторов и механизмов физико-химических процессов при разложении ЛГМ и при тушении лесных пожаров актуально для развития моделей горения, возникновения и распространения лесных пожаров [13, 14].

Анализ опубликованных в период с 1981 по 2013 г. результатов экспериментального определения теплофизических и термокинетических характеристик достаточной группы ЛГМ [14, 15] показал, что эти характеристики одной породы ЛГМ заметно отличаются. При математическом моделировании процессов термического разложения и горения ЛГМ в рамках любых постановок (например, [16]) все характеристики этих процессов будут существенно зависеть от теплофизических и термокинетических характеристик ЛГМ и, соответственно, от надежности (достоверности) их определения.

При постановках задач возникновения и распространения лесных пожаров (например, [14]) материал, как правило, рассматривался как однородная сплошная среда с эффективными теплофизическими характеристиками. При этом характеристики определялись экспериментально на образцах, представляю-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-38-00025 мол.а).

© Антонов Д. В., Жданова А. О., Кузнецов Г. В., 2020.

щих собой [14] таблетки прессованного сухого материала, т. е. устанавливались характеристики материала (хвоя, листья) каркаса ЛГМ. В действительности же в нормальных условиях (без специального уплотнения под давлением) ЛГМ в приповерхностном слое представляет собой высокопористую (пористость, как правило, достигает значений  $0.7 \div 0.8$ ) среду, теплопроводность которой, если ориентироваться на современные представления [14, 15], существенно ниже теплопроводности материала каркаса как на стадии инертного нагрева, так и при интенсивном термическом разложении. Так, например, по данным [14] объемная доля микропор хвои сосны составляет  $0.367 \div 0.794$ , листьев березы —  $0.503 \div 0.787$ .

При определении времени подавления пламенного горения и реакции термического разложения ЛГМ особую значимость приобретают теплофизические характеристики пористой структуры ЛГМ. Экспериментальное определение этих параметров в условиях горения и термического разложения представляет самостоятельную достаточно сложную и часто неразрешимую задачу. Поэтому такого рода эксперименты трудоемки и продолжительны. Соответственно, математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса при подавлении термического разложения в условиях подачи распределенной воды в область горения является основным методом прогностического анализа характеристик и условий прекращения пиролиза типичных ЛГМ.

В работах [17–19] приведены выражения для расчета теплопроводности двухкомпонентных сред. К таким средам можно отнести и ЛГМ, если представлять их структуру в виде твердого каркаса (хвоинки и листья) и газов (воздух в начальный период времени и газообразные продукты пиролиза ЛГМ после начала интенсивной деструкции материала каркаса). Широкое практическое применение получили модели теплопроводности, сформулированные в предположении описания теплофизических характеристик многокомпонентных сред (в том числе и двухкомпонентных) аддитивными математическими моделями [20–22]:

$$\lambda_e = \lambda_c \mu_c + \lambda_d \mu_d \quad (1)$$

или

$$\lambda_e = \lambda_c \varphi_c + \lambda_d \varphi_d. \quad (2)$$

Не менее часто используется выражение [23]

$$\frac{1}{\lambda_e} = \frac{\varphi_c}{\lambda_c} + \frac{\varphi_d}{\lambda_d}. \quad (3)$$

Здесь  $\mu$ ,  $\varphi$  — массовая и объемная концентрация, индексы  $e$ ,  $c$ ,  $d$  — среда, твердый каркас, воздух.

По этим причинам при математическом моделировании процессов сложного теплопереноса в слое ЛГМ неоднородность структуры последнего может играть важную роль при вычислении характеристик его термического разложения и горения.

На основании анализа современного состояния рассматриваемой проблемы с использованием достаточно представительной выборки источников [1–8] сформулирована базовая для проводимых исследований гипотеза: эффективные теплофизические характеристики структурно-неоднородного слоя ЛГМ существенно отличаются от соответствующих характеристик материала каркаса этого слоя. Поэтому при математическом моделировании с использованием этих двух отличающихся наборов характеристик возможны значительные отклонения результатов моделирования процессов термического разложения и горения ЛГМ.

Для проверки этой гипотезы целесообразны экспериментальные исследования с целью определения теплофизических характеристик группы типичных и распространенных ЛГМ и последующее моделирование термического разложения последних в условиях, соответствующих подавлению горения ЛГМ с использованием капельных потоков воды.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использовался опад хвоинок сосны обыкновенной и листьев березы бореальной зоны Томской области [14]. Материал предварительно подсушивался при температуре  $\approx 300$  К в течение  $3 \div 5$  дней. Влажность ЛГМ непосредственно перед опытами определялась методом термической сушки [14]. Исследуемый образец ЛГМ взвешивался на весах до начала сушки, затем помещался в сушильную печь на  $2 \div 3$  ч при температуре около  $370 \div 375$  К, вынимался из печи, охлаждался, после чего вторично взвешивался на тех же весах. Влажность образца ЛГМ определялась по формуле  $\gamma_f = (m_{fw} - m_{fd})/m_{fw} \cdot 100$  %, где  $m_{fw}$  и  $m_{fd}$  — масса образца ЛГМ соответственно до и после

сушки, г. Для листьев березы  $\gamma_f = 5 \div 8 \%$ , для хвой сосны  $\gamma_f = 7 \div 10 \%$ .

Первый этап экспериментальных исследований заключался в определении теплофизических характеристик (ТФХ) измельченных и затем спрессованных материалов каркаса ЛГМ (хвоинки и листья). Для измельчения использовалась быстроходная роторная мельница Pulverisette 14 (скорость вращения ротора  $6\,000 \div 20\,000$  об/мин). Средний размер частиц измельченного ЛГМ около 200 мкм. Выбор размера частиц обусловлен в первую очередь природой навесок (ЛГМ представляют класс мягких веществ). Измельчение хвой сосны сопровождалось образованием смолы на сите, и после каждого помола сито подвергали термической обработке. Это ограничивало возможность применения сит с более мелким размером ячеек для получения частиц меньшего размера. Использовалось кольцо-сито с трапециевидными отверстиями, которые обеспечивают дополнительное измельчение благодаря повышенной срезающей нагрузке. Рис. 1 иллюстрирует поэтапную подготовку образцов ЛГМ.

Для определения теплофизических характеристик ЛГМ использовалась система DLA-1200 TA Instruments (рис. 2), принцип

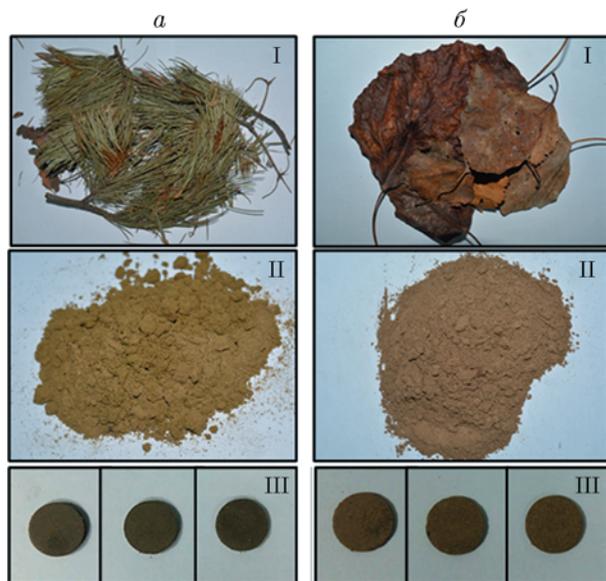


Рис. 1. Поэтапная подготовка образцов ЛГМ:

I — предварительная подготовка, II — измельчение (средний размер частиц 200 мкм), III — прессование в образцы цилиндрической формы; а — опад хвой сосны обыкновенной, б — листья березы

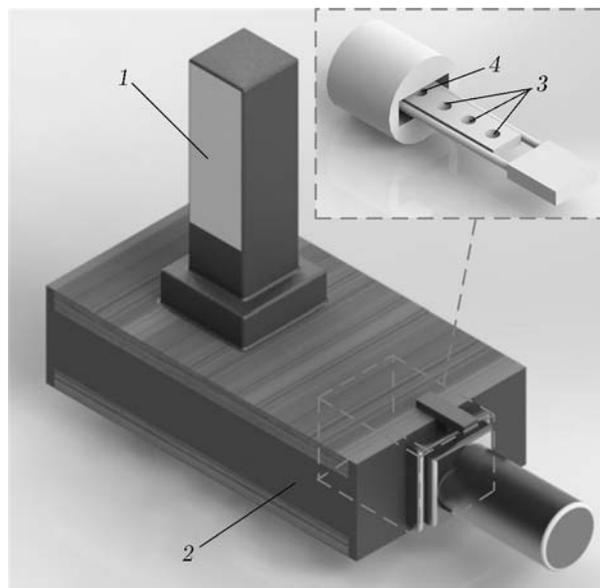


Рис. 2. Схема установки для определения теплофизических характеристик веществ:

1 — блок генерации лазерного импульса, 2 — блок термостата, 3 — исследуемые образцы ЛГМ, 4 — калибровочный (эталонный) образец

действия которой основан на оценке скорости распространения импульса тепла в тонком образце-диске. Систематическая погрешность определения температуропроводности по методике [24] не превышала  $\pm 2.3 \%$ , теплоемкости  $\pm 4 \%$ , теплопроводности  $\pm 5 \%$ .

Система DLA-1200 TA Instruments состоит из двух основных блоков: термостата и блока генерации лазерного импульса. Излучатель на неодимовом стекле подает импульсы коллимированного монохроматического излучения длительностью 450 пс. Система позволяет проводить измерения при температуре в термостате до 1373 К. Подготавливалась навеска порошков исследуемых материалов массой  $0.20 \div 0.25$  г. При помощи гидравлического пресса из навесок прессовались образцы в форме диска (часто используют термин «таблетка»). Размеры образцов соответствовали требованиям, предъявляемым используемой измерительной системой (диаметр диска 12.5 мм, толщина не более 3 мм). Для максимального поглощения энергии импульса лазера и, соответственно, повышения точности измерений на поверхность образцов аэрозольным распылением наносился ультратонкий слой графита. Образцы при помощи держателя и специализированной тележки помещались в термостат.

Рабочий объем термостата заполнялся инертным газом (азотом). В системе DLA-1200 TA Instruments используется бесконтактная система контроля температуры образца на основе инфракрасного детектора  $\text{LN}_2$  InSb.

Для проведения измерений по методике [24] обязательно наличие калибровочного образца, загружаемого в модуль термостата одновременно с образцами исследуемых материалов. В качестве калибровочных образцов использовались материалы с известными теплофизическими характеристиками (Pyrex7740, POCO Graphite). Система DLA-1200 TA Instruments позволяет одновременно загружать в термостат один калибровочный и три исследуемых образца. Значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности, удельной теплоемкости определяются при помощи программного обеспечения системы DLA-1200 TA Instruments по данным о скорости распространения теплового импульса лазерного излучателя в образце. Для каждого образца проводилось пять измерений, затем результаты осреднялись. Толщина и диаметр таблеток измерялись микрометром, систематическая погрешность измерений 0.005 мм. Масса образцов определялась на аналитических весах Pioneer PA114, систематическая погрешность измерений 0.00005 г. Оценка достоверности определения геометрических характеристик и массы исследуемых таблеток проведена по критерию Романовского. В экспериментах грубых ошибок не выявлено. Рассчитанные погрешности учитывались при вычислениях, выполняемых системой DLA-1200 TA Instruments.

Второй этап экспериментальных исследований заключался в определении условий и характеристик подавления пламенного горения и реакции термического разложения ЛГМ при воздействии парокапельной смеси. Схема использовавшегося экспериментального стенда, аналогичного описанному в [25], приведена на рис. 3. Стенд оснащен техническими средствами измерения температуры и высокоскоростной видеорегистрации, а также программно-аппаратным комплексом для реализации измерений панорамными оптическими методами диагностики многофазных сред.

Исходная масса навесок хвои сосны и листьев березы выбиралась таким образом, чтобы насыпная плотность материала изменялась в узком диапазоне: листья березы —  $\rho = 25 \div 30 \text{ кг/м}^3$ , хвоя ели —  $\rho = 30 \div 35 \text{ кг/м}^3$

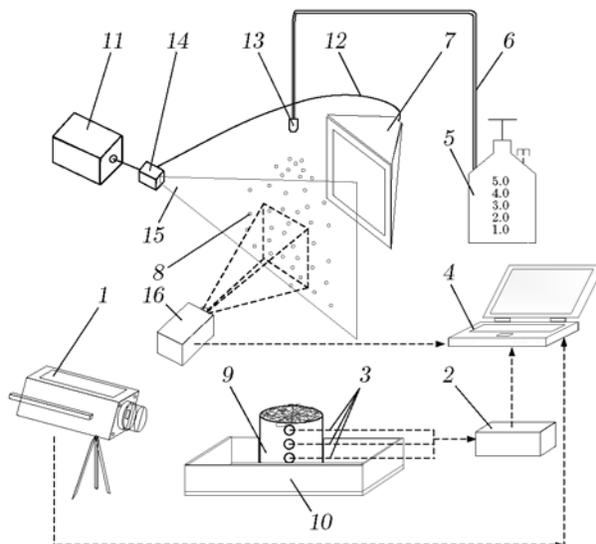


Рис. 3. Схема экспериментального стенда [25]:

1 — высокоскоростная видеокамера, 2 — высокоскоростной модуль аналогового ввода, 3 — термопары, 4 — рабочая станция (компьютер), 5 — баллон с водой, 6 — канал подачи воды, 7 — диффузный экран, 8 — жидкостный аэрозоль, 9 — цилиндр с навеской ЛГМ, 10 — металлический поддон, 11 — двойной твердотельный импульсный лазер, 12 — оптический световод, 13 — распылительная форсунка, 14 — делитель лазерного луча, 15 — световой нож лазера, 16 — кросскорреляционная видеокамера

[14, 15]. При таких значениях  $\rho$  удалось обеспечить сопоставимые режимы термического разложения всех исследованных ЛГМ (без медленного тления или быстрого выгорания). Модельные очаги низового лесного пожара — навески ЛГМ — размещались в полых цилиндрах из гофрированного алюминия высотой  $h_f$  и диаметром  $d_f$ . Эти параметры варьировались:  $d_f = 20 \div 150 \text{ мм}$ ,  $h_f = 40 \div 100 \text{ мм}$ . В трех точках по высоте на оси симметрии цилиндра (аналогично методике [25]) с навеской ЛГМ ( $h_f$ ) размещались игольчатые хромель-алюмелевые термопары (диапазон измеряемых температур  $223 \div 1473 \text{ К}$ , систематическая погрешность  $\pm 3 \text{ К}$ , тепловая инерционность не более 1 с) для контроля температуры в зоне термического разложения ЛГМ.

В первой серии экспериментов по этой методике регистрировалось время полного выгорания навесок ЛГМ без использования воды ( $t_b$ ). Зажигание модельного очага проводилось равномерно по всей площади открытой поверхности ЛГМ с одновременным применением трех пьезоэлектрических газовых мини-

горелок. Считалось, что термическое разложение реализуется при температуре ЛГМ выше 370 К хотя бы в точке размещения одной из трех термопар, закрепленных на разных расстояниях от поверхности слоя ЛГМ. Во второй серии экспериментов для прекращения термического разложения ЛГМ над его поверхностью размещалась форсунка (аналогично [25]), которая генерировала аэрозольный поток. Эксперименты проведены при радиусах капель  $R_d = 0.01 \div 0.12$  мм, начальной скорости движения  $u_d \approx 2$  м/с, расходе  $\eta_d \approx 0.00035$  л/с, плотности орошения в единицу времени  $\xi_e \approx 0.018$  л/(м<sup>2</sup>·с) и концентрации капель в воздухе  $\approx 3.8 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Контроль значений  $\xi_e$  выполнялся по аналогии с методикой, описанной в ГОСТ 51043-2002. Время подавления термического разложения  $t_e$  регистрировалось по факту уменьшения температуры в зоне реагирования (по показаниям всех трех термопар) ниже 370 К. Время подавления реакции термического разложения ЛГМ фиксировалось при выполнении условия  $t_e \ll t_b$ . В ходе экспериментов контролировался также объем израсходованной воды, достаточный для прекращения термического разложения ЛГМ ( $V_e$ ).

Систематические погрешности определения размеров капель  $R_d$  составили  $7 \cdot 10^{-6}$  м, скорости их движения  $u_d$  — 0.01 м/с, времен  $t_e$  и  $t_b$  — 0.5 с, расхода  $\eta_d$  — 0.00002 л/с, объема  $V_e$  —  $5 \cdot 10^{-4}$  л [25]. Максимальные случайные погрешности определения температуры в процессе термического разложения не превышали 30 К. Для каждого модельного очага горения соответствующего ЛГМ проводилось не менее 20 экспериментов.

На рис. 4 приведены установленные в выполненных экспериментах значения теплоемкости и теплопроводности исследованных ЛГМ. Полученные результаты иллюстрируют зависимость ТФХ исследовавшихся типичных ЛГМ от температуры, а также диапазоны изменения ТФХ в типичном для практики диапазоне. Проведено сравнение этих численных значений в основных диапазонах температуры с известными данными других исследователей [14, 26]. Установленные отличия экспериментальных значений теплоемкости и теплопроводности, полученных в настоящей работе и другими исследователями [14, 26], можно считать значительными: они достигают 68 %. Различия обусловлены в основном соответствующими специфическими свойствами однотишных

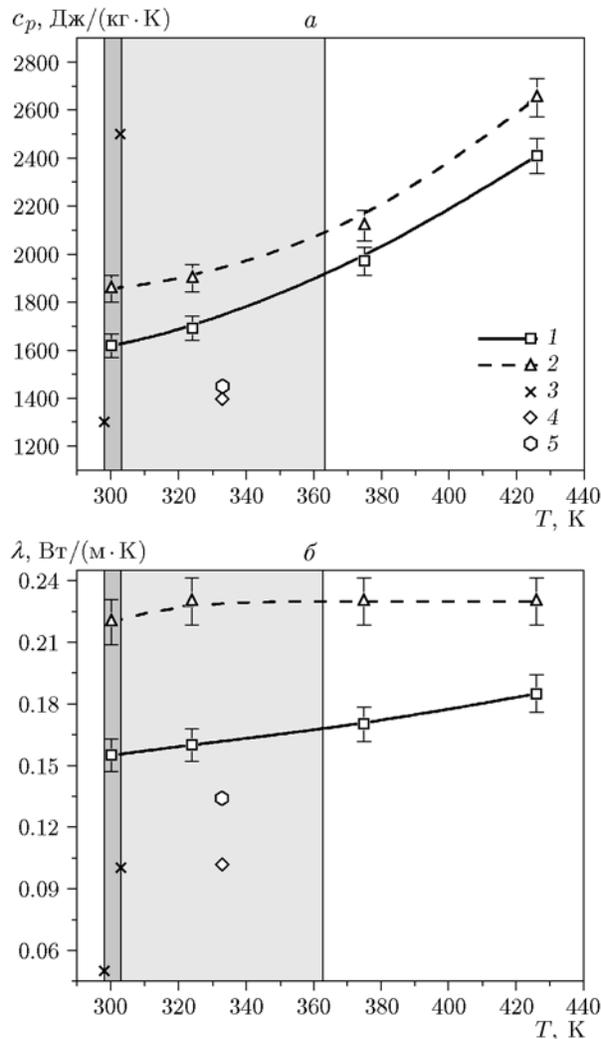


Рис. 4. Сравнение установленных и известных значений теплофизических характеристик ЛГМ:

$a$  — теплоемкость,  $b$  — теплопроводность; 1 — хвоя сосны, 2 — листья березы, 3 — опад хвои,  $\gamma_f = 10 \div 50$  % [26], 4 — опад хвои,  $\gamma_f = 0$  [14], 5 — опад листьев осины,  $\gamma_f = 0$  [14]

ЛГМ из разных регионов и могут значительно повлиять на определяемые при математическом моделировании времена прогрева, сушки, термического разложения и выгорания ЛГМ, а также на характеристики процесса локализации и подавления пиролиза.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

При постановке задачи тепло- и массопереноса в условиях подавления термического разложения ЛГМ при воздействии воды аналогич-

но постановке [13] предполагалось, что «водяной снаряд» полностью испарился при движении через пламя и над поверхностью ЛГМ сформировалась парогазовая смесь с известной температурой 350 К. В малой окрестности следа типичного «водяного снаряда» концентрации окислителя и продуктов сгорания близки к нулю [13] за счет достаточно интенсивного вдува водяных паров. Поэтому при постановке задачи (по аналогии с моделью [13]) принято, что в начальный момент времени парогазовая смесь над поверхностью ЛГМ содержит только водяные пары. Как следствие, при моделировании процессов тепло- и массопереноса в парогазовой смеси над ЛГМ не учитывались возможные реакции окисления продуктов его пиролиза. В этой области учитывались наиболее типичные для рассматриваемых условий процессы, обусловленные кондуктивно-конвективным теплопереносом и диффузионно-конвективным массопереносом. Целью численного исследования было определение интервала времени, в течение которого температура в приповерхностном слое ЛГМ становится меньше температуры начала термического разложения 370 К. Это время считалось временем подавления (прекращения) реакции термического разложения ЛГМ  $t_e$ .

Принятая математическая модель включает в себя следующую систему нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных ( $0 < t < t_d$ ) для области решения, представленной на рис. 5.

Уравнения неразрывности, движения, энергии и диффузии для парогазовой смеси ( $0 < x < H$ ,  $Y_1 < y < L$ ):

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \\ = \nu_1 \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) + \beta g \frac{\partial T_1}{\partial y}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho_1 c_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial t} + u \frac{\partial T_1}{\partial x} + v \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) = \\ = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\rho_{11} \left( \frac{\partial C_v}{\partial t} + u \frac{\partial C_v}{\partial x} + v \frac{\partial C_v}{\partial y} \right) =$$

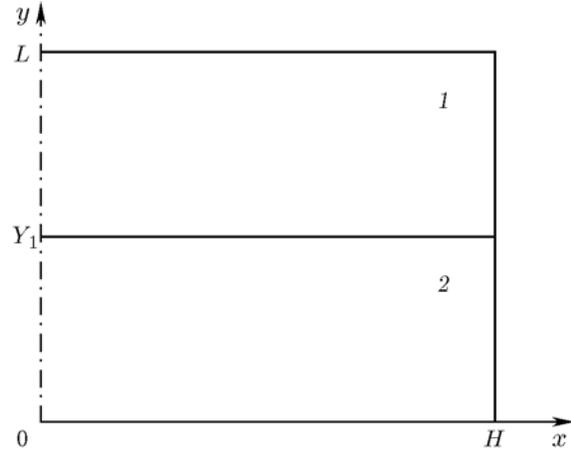


Рис. 5. Схема области решения задачи в соответствии с моделью [13]:

1 — след «водяного снаряда», 2 — ЛГМ

$$= \rho_{11} D_{11} \left( \frac{\partial^2 C_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2} \right), \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \rho_{12} \left( \frac{\partial C_g}{\partial t} + u \frac{\partial C_g}{\partial x} + v \frac{\partial C_g}{\partial y} \right) = \\ = \rho_{12} D_{12} \left( \frac{\partial^2 C_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_g}{\partial y^2} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнение энергии (с учетом процесса пиролиза) для ЛГМ ( $0 < x < H$ ,  $0 < y < Y_1$ ):

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right) + Q_2 W_2. \quad (9)$$

Массовая скорость термического разложения ЛГМ:

$$W_2 = \int_0^{Y_1} \varphi_2 \rho_2 k_2^0 \exp \left( -\frac{E_2}{RT_2} \right) dy, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = (1 - \varphi_2) k_2^0 \exp \left( -\frac{E_2}{RT_2} \right). \quad (11)$$

Начальные условия ( $t = 0$ ):

$$0 < x < H, \quad 0 < y < Y_1:$$

$$T_2 = T_0(x, y), \quad \varphi_2 = \varphi_0(x, y); \quad (12)$$

$$0 < x < H, \quad Y_1 < y < L:$$

$$T_1 = T_m, \quad C_g = 0, \quad C_v = 1, \quad \psi = 0, \quad \omega = 0. \quad (13)$$

Граничные условия ( $0 < t \leq t_d$ ):

$$x = 0, x = H, 0 < y < Y_1: \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0; \quad (14)$$

$$x = 0, Y_1 < y < L: \frac{\partial T_1}{\partial x} = 0, \frac{\partial C_g}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial C_v}{\partial x} = 0, \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0; \quad (15)$$

$$x = H, Y_1 < y < L: \lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) = 0, \frac{\partial C_g}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial C_v}{\partial x} = 0, \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0; \quad (16)$$

$$y = 0, 0 < x < H: \frac{\partial T_2}{\partial y} = 0;$$

$$y = Y_1, 0 < x < H:$$

$$-\lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial y} \right) - Q_2 W_2 = -\lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial y} \right),$$

$$T_2 = T_1, \rho_{12} D_{12} \left( \frac{\partial C_g}{\partial y} \right) = -W_2, \frac{\partial C_v}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \frac{\partial \psi}{\partial x} = -\frac{W_2}{\rho_{12}}; \quad (17)$$

$$y = L, 0 < x < H: \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} = 0, \frac{\partial^2 C_g}{\partial y^2} = 0,$$

$$\frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2} = 0, \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0. \quad (18)$$

Здесь  $\omega$  — вихрь скорости,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\psi$  — функция тока,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $u, v$  — компоненты скорости парогазовой смеси вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\nu$  — кинематическая вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\beta$  — коэффициент термического расширения,  $\text{К}^{-1}$ ;  $t$  — время,  $\text{с}$ ;  $T$  — температура,  $\text{К}$ ;  $T_0(x, y)$ ,  $\varphi_0(x, y)$  — начальные распределения температуры ( $\text{К}$ ) и относительной доли способного к химическому реагированию вещества;  $T_m$  — начальная температура парогазовой смеси,  $\text{К}$ ;  $c$  — теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $C_g, C_v$  — безразмерная концентрация газообразных продуктов термического разложения ЛГМ и паров воды;  $D$  — коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $E_2$  — энергия активации,  $\text{Дж}/\text{моль}$ ;  $H, L$  — размеры области решения,  $\text{м}$ ;  $W_2$  — массовая скорость химического реагирования,

$\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ ;  $Q_2$  — тепловой эффект термического разложения,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ;  $k_2^0$  — предэкспонент химической реакции,  $\text{с}^{-1}$ . Индексы: 0 — газы (воздух в начальный период времени и газообразные продукты пиролиза ЛГМ после начала интенсивной деструкции материала каркаса), 1 — парогазовая смесь, 2 — ЛГМ, 11 — пары воды, 12 — газообразные продукты пиролиза, 21 — доля способного к химическому реагированию вещества в материале, 22 — твердый каркас ЛГМ.

При проведении численных исследований условий и характеристик подавления реакции термического разложения ЛГМ основная задача состояла в установлении влияния гетерогенности ЛГМ на время подавления реакции пиролиза последнего. Анализ выполнен в два этапа: на первом этапе гетерогенная структура ЛГМ интерпретировалась как однородная среда с эффективными значениями ТФХ. Теплофизические характеристики ЛГМ на первом этапе принимались средними по объему (массе) по данным [13, 14], а также использовались средние эффективные значения ТФХ, установленные в настоящей работе. Теплофизические характеристики каркаса ЛГМ вычислялись с учетом их изменения в процессе пиролиза:

$$\lambda_2 = \lambda_{21}\varphi_2 + \lambda_{12}(1 - \varphi_2), \\ c_2 = c_{21}\varphi_2 + c_{12}(1 - \varphi_2), \quad (19) \\ \rho_2 = \rho_{21}\varphi_2 + \rho_{12}(1 - \varphi_2).$$

На втором этапе математического моделирования учитывались реальная неоднородность ЛГМ, обусловленная его пористостью, и влияние температуры на ТФХ материала. На этом этапе численного моделирования ЛГМ рассматривался как двухкомпонентная пористая среда, ТФХ которой вычислялись с учетом объемных концентраций компонентов каркаса и газообразных продуктов пиролиза по формулам (2) и (3):

$$\frac{1}{\rho_2} = \frac{\varphi_{22}}{\rho_{22}} + \frac{\varphi_0}{\rho_0}, \\ c_2 = c_{22}\varphi_{22} + c_0\varphi_0, \quad (20)$$

$$\lambda_2 = \lambda_{22}\varphi_{22} + \lambda_0\varphi_0,$$

$$\varphi_{22} + \varphi_0 = 1.$$

Теплоемкость и теплопроводность ЛГМ задавалась в виде функции от температуры, установленной экспериментально в настоящем исследовании:

$$c_2 = 0.052T^2 - 32.137T + 6740.79$$

при  $300 < T < 430$  К (листья березы);

$$\lambda_2 = -1.481 \cdot 10^{-6}T^2 + 0.001T + 0.012$$

при  $300 < T < 430$  К (листья березы);

$$c_2 = 0.031T^2 - 16.312T + 3702.09$$

при  $300 < T < 430$  К (хвоя сосны);

$$\lambda_2 = 6.501 \cdot 10^{-7}T^2 - 2.399 \cdot 10^{-4}T + 0.167$$

при  $300 < T < 430$  К (хвоя сосны).

Скорости движения компонентов парогазовой смеси определялись с использованием выражений

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad \omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}. \quad (21)$$

При задании граничных условий для уравнения движения (5) использовалась формула Вудса второго порядка:

$$\omega_{0,j} = \frac{-8\psi_{1,j} + \psi_{2,j} - 7\psi_{0,j}}{2h_x^2} - \frac{3}{h_x} \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (22)$$

$$\omega_{i,0} = \frac{-8\psi_{i,1} + \psi_{i,2} - 7\psi_{i,0}}{2h_y^2} - \frac{3}{h_y} \frac{\partial \psi}{\partial y}.$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 6 представлены зависимости характерного времени подавления реакции термического разложения ЛГМ от толщины слоя последнего, полученные при численном моделировании (в постановке (1)–(22) с использованием теплофизических характеристик ЛГМ, определенных в настоящей работе) и в экспериментальных исследованиях. Следует отметить нелинейный характер изменения времени в зависимости от толщины слоя ЛГМ. Это обусловлено нелинейной зависимостью скорости термического разложения в приповерхностном слое ЛГМ. Рост температуры нагрева приводит к изменению скоростей процессов теплопереноса. Термическое разложение ЛГМ ведет

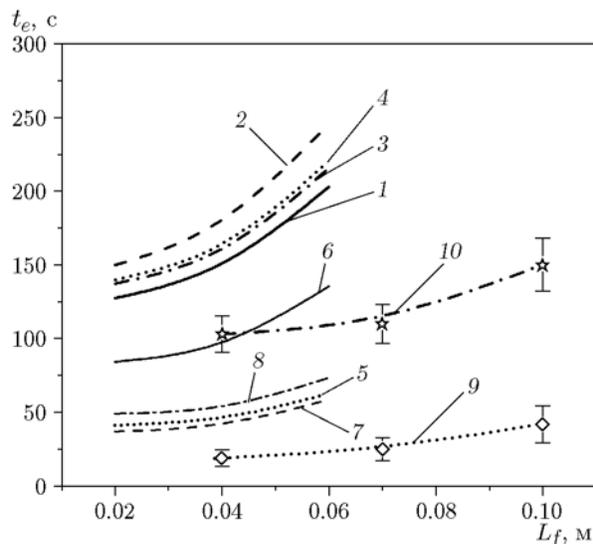


Рис. 6. Зависимость времени прекращения реакции термического разложения ЛГМ от толщины прогретого слоя:

1, 3, 5, 7, 9 — хвоя сосны; 2, 4, 6, 8, 10 — листья березы; 1, 2 — результаты моделирования [13]; 3, 4 — результаты моделирования с установленными в экспериментах средними значениями теплофизических и термокинетических характеристик ЛГМ; 5–8 — результаты моделирования с нелинейными значениями теплофизических и термокинетических характеристик ЛГМ и с учетом минимальных значений (5, 6) пористости (для хвои — 0.367, для листьев березы — 0.503) и максимальных ее значений (7, 8) (для хвои — 0.794, для листьев березы — 0.787); 9, 10 — результаты экспериментов [25]

к уменьшению концентрации органической части при неизменном объеме материала, вследствие снижения влияния каркаса ЛГМ. Отклонения  $t_e$  (кривые 5–8), установленные на втором этапе математического моделирования при учете пористой структуры ЛГМ, относительно соответствующих зависимостей (кривые 1–4), полученных при осредненных по объему ТФХ, составляют  $45 \div 71$  %. Это позволяет сделать вывод, что при учете реальной структуры слоя ЛГМ в явном виде при математическом моделировании процессов подавления реакции термического разложения в условиях воздействия паров воды на материал достигается удовлетворительная корреляция результатов численных и экспериментальных исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление результатов математического моделирования характерного времени подавления пиролиза ЛГМ при использовании

теплофизических характеристик материалов, рассчитанных с учетом реальной пористой структуры материала, и зависимости теплофизических характеристик от температуры с установленными экспериментальными значениями таких времен показало их лучшее соответствие по сравнению с результатами моделирования в предположении, что значения теплофизических характеристик ЛГМ равны теплопроводности и теплоемкости материала каркаса (хвоя и листья). Это позволяет сделать вывод, что при учете гетерогенности структуры слоя ЛГМ при математическом моделировании тепло- и массопереноса процесса термического разложения в условиях соответствующих реальным (каркас ЛГМ занимает не более 50 % объема — пористость укладки сухой хвои  $0.367 \div 0.794$ , сухих листьев  $0.503 \div 0.787$ ), достигается удовлетворительная корреляция результатов численных и экспериментальных исследований. По результатам выполненного моделирования получены аппроксимационные выражения для теплопроводности и теплоемкости типичных ЛГМ, которые можно использовать при прогнозе необходимых и достаточных условий локализации лесных пожаров.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории моделирования процессов тепло- и массопереноса Национального исследовательского Томского политехнического университета (<http://hmtslab.tpu.ru>) за помощь в проведении экспериментальных и численных исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий РФ от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2016 году». — М.: МЧС России, ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2017.
2. Атлас риска пожаров на территории Российской Федерации. — М.: Дизайн. Информация. Картография, 2010.
3. Korobeinichev O. P., Tereshchenko A. G., Paletsky A. A., Shmakov A. G., Gonchikzhapov M. B., Chernov A. A., Kataeva L. Yu., Maslennikov D. A., Liu N. The velocity and structure of the flame front at spread of fire across the pine needle bed depending on the wind velocity // *Fire Sci. Technol.* — 2015. — P. 771–779.
4. Korobeinichev O. P., Tereshchenko A. G., Paletsky A. A., Shmakov A. G., Chernov A. A., Gonchikzhapov M. B., Bezmaternykh D. D., Kataeva L. Yu., Maslennikov D. A., Liu N. The velocity and structure flame front at spread of fire across the pine needle bed: experiment // *Proc. of VII Int. Conf. on Forest Fire Research, Coimbra, Portugal.* — 2014. — P. 451–458.
5. Bottero A., D'Amato A. W., Palik B. J., Kern C. C., Bradford J. B., Scherer S. S. Influence of repeated prescribed fire on tree growth and mortality in pinus resinosa forests, northern Minnesota // *Forest Sci.* — 2017. — V. 63. — P. 94–100.
6. Della Rocca G., Hernando C., Madrigal J., Danti R., Moya J., Guijarro M., Pecchioli A., Moya B. Possible land management uses of common cypress to reduce wildfire initiation risk: A laboratory study // *J. Environ. Manag.* — 2015. — V. 159. — P. 68–77.
7. Korobeinichev O. P., Shmakov A. G., Shvartsberg V. M., Chernov A. A., Yakimov S. A., Koutsenogii K. P., Makarov V. I. Fire suppression by low-volatile chemically active fire suppressants using aerosol technology // *Fire Safety J.* — 2012. — V. 51. — P. 102–109.
8. Копылов Н. П., Хасанов И. Р., Кузнецов А. Е., Федоткин Д. В., Москвиллин Е. А., Стрижак П. А., Карпов В. Н. Параметры сброса воды авиационными средствами при тушении лесных пожаров // *Пожар. безопасность.* — 2015. — № 2. — С. 49–55.
9. Коробейничев О. П., Шмаков А. Г., Чернов А. А., Большова Т. А., Шварцберг В. М., Куценогий К. П., Макаров В. И. Тушение пожаров с помощью аэрозолей растворов солей // *Физика горения и взрыва.* — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 20–25.
10. Tsach S., Peled A., Penn D., Keshales B., Guedj R. Development trends for next generation UAV systems // *Collection of Techn. Papers. 2007 AIAA InfoTech at Aerospace Conf.* — 2007. — V. 1. — P. 490–503.
11. Calkin D. E., Stonesifer C. S., Thompson M. P., McHugh C. W. Large airtanker use and outcomes in suppressing wildland fires in the United States // *Int. J. Wildland Fire.* — 2014. — V. 23. — P. 259–271.
12. Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А., Хасанов И. Р., Федоткин Д. В. О возможности тушения лесных и торфяных пожаров полидисперсными водяными потоками // *Пожаровзрывобезопасность.* — 2015. — № 2. — С. 49–66.
13. Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Подавление реакции термического разложения лесного горючего материала следом «водяного снаряда» // *Хим. физика и мезоскопия.* — 2014. — Т. 16, № 2. — С. 215–225.
14. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1981.

15. **Korobeinichev O. P., Paletsky A. A., Gonchikzhapov M. B., Shundrina I. K., Chen H., Liu N.** Combustion chemistry and decomposition kinetics of forest fuels // *Procedia Eng.* — 2013. — V. 62. — P. 182–193.
16. **Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Legros J. C., Strizhak P. A.** Thermal conditions for stopping pyrolysis of forest combustible material and applications to firefighting // *Thermal Sci.* — 2017. — V. 21. — P. 2565–2577.
17. **Чудновский А. Ф.** Теплофизические характеристики дисперсных материалов. — М.: Физматгиз, 1962.
18. **Шашков А. Г., Волхов Г. М., Абраменков Т. Н., Козлов В. П.** Методы определения теплопроводности и температуропроводности. — М.: Энергия, 1973.
19. **Кац Г. С., Милевски Д. В.** Наполнители для полимерных композиционных материалов: пер. с англ. / под ред. П. Г. Бабаевского. — М.: Химия, 1981.
20. **King J. A., Tucker K. W., Meyers J. D., Weber E. H., Clingerman M. L., Ambrosius K. R.** Factorial design approach applied to electrically and thermally conductive nylon 6,6 // *Polym. Compos.* — 2001. — V. 22, N 1. — P. 142–154.
21. **Progelhof R. C., Throne J. L., Ruetsch R. R.** Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: A review // *Polym. Eng. Sci.* — 1976. — V. 16, N 9. — P. 615–625.
22. **Bigg D. M.** Thermal conductivity of heterophase polymer compositions // *Adv. Polym. Sci.* — 1995. — V. 119. — P. 1–30.
23. **Миснар А.** Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. — М.: Мир, 1968.
24. **Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C. P., Abbott G. L.** Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity // *J. Appl. Phys.* — 1961. — V. 32. — P. 1679–1684.
25. **Volkov R. S., Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.** Determination of the volume of water for suppressing the thermal decomposition of forest combustibles // *J. Eng. Phys. Thermophys.* — 2017. — V. 90. — P. 789–796.
26. **Палецкий А. А., Гончикжапов М. Б., Коробейничев О. П.** Исследование пиролиза лесных горючих материалов методом зондовой молекулярно-пучковой масс-спектрометрии // *Сиббезопасность-Спасиб.* — 2011. — № 1. — С. 97–98.

*Поступила в редакцию 12.02.2019.*

*После доработки 28.03.2019.*

*Принята к публикации 17.04.2019.*

---