

01

Математическое моделирование возникновения и распространения верховых лесных пожаров в осредненной постановке

© В.А. Перминов

Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: perminov@tpu.ru

(Поступило в Редакцию 30 апреля 2014 г.)

Проведено теоретическое исследование процессов возникновения и распространения верховых лесных пожаров. Лес рассмотрен как многофазная многокомпонентная пористая реагирующая среда. Численно решены уравнения Рейнольдса для турбулентного течения с учетом химических реакций. Для получения дискретного аналога использован метод контрольного объема. В результате численных расчетов получены распределения полей скорости, температуры, концентраций кислорода, летучих продуктов пиролиза и горения и объемных долей конденсированной фазы в различные моменты времени. Модель позволила в динамике получать контуры распространения верховых лесных пожаров, которые зависят от свойств и состояния полога леса: запаса и вида лесных горючих материалов, влагосодержания, неоднородностей в лесном массиве, скорости и направления ветра и т.д.

Введение

Лесные пожары являются чрезвычайно сложными и разрушительными природными явлениями, интенсивность тепло- и массовыделения которых зависит от вида и количества лесных горючих материалов (ЛГМ), метеорологических и других условий. Верховые пожары являются наиболее опасными из всех других видов. Как правило, лесные пожары изучаются с помощью методов физического и математического моделирования. Анализ характеристик лесных пожаров показывает их зависимость от конкретных условий, в которых проводились экспериментальные исследования. В реальных условиях практически невозможно контролировать метеорологическую ситуацию и однородность слоя лесных горючих материалов. По этой причине физическое моделирование лесных пожаров должно сочетаться с математическим, т.е. с использованием численных методов и компьютерных расчетов. Объектом исследования в этом случае является не природа, а математическая модель лесных пожаров, которая, как правило, состоит из набора уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями. Результаты экспериментальных исследований могут быть использованы для проверки адекватности математической модели изучаемому явлению. Математическое моделирование обладает рядом преимуществ по сравнению с физическим экспериментом, например экологической безопасностью и большей экономической эффективностью. Одной из задач этих исследований является улучшение знаний о фундаментальных физических механизмах, которые описывают возникновение и развитие процесса горения при лесных пожарах. Одни из первых теоретических объяснений процессов инициирования и развития лесных пожаров предложены в работах [1–3]. Также методы математического моделирования применялись в работах [4–8]. Подробное изучение проблем

математического и физического моделирования лесных пожаров проводилось в Томском университете под руководством А.М. Гришина [9,10]. В частности, общая математическая модель лесных пожаров была предложена А.М. Гришиным [9], которая разработана на основе анализа известных и оригинальных экспериментальных данных с использованием понятий и методов механики реагирующих сред. Дальнейшее развитие данного подхода представлено в работах [11,12]. В настоящее время представляет интерес проведение исследований возникновения и развития лесных пожаров, воздействующих на здания и сооружения, расположенные вблизи лесных массивов, а также влияние крупномасштабных очагов лесных пожаров на состояние приземного слоя атмосферы и негативное влияние задымленности на экологическую обстановку в населенных пунктах. В настоящей работе представлена математическая модель возникновения и распространения верховых лесных пожаров. Это первая часть исследований, направленная на решение представленных выше проблем. Результаты, полученные по данной модели, могут быть использованы для прогнозирования распространения верховых лесных пожаров и решения последующих задач, связанных с изучением негативных последствий лесных пожаров.

1. Физическая и математическая постановка

Основные допущения, принятые при выводе системы уравнений и граничных, и начальных условий: 1) лес представляет многофазную, многокомпонентную пространственно неоднородную среду; 2) в зоне пожара лес считается пористо-дисперсной, двухтемпературной (различаются температуры газовой и конденсированной фаз), односкоростной, реагирующей средой; 3) полог леса предполагается недеформируемой средой (стволы,

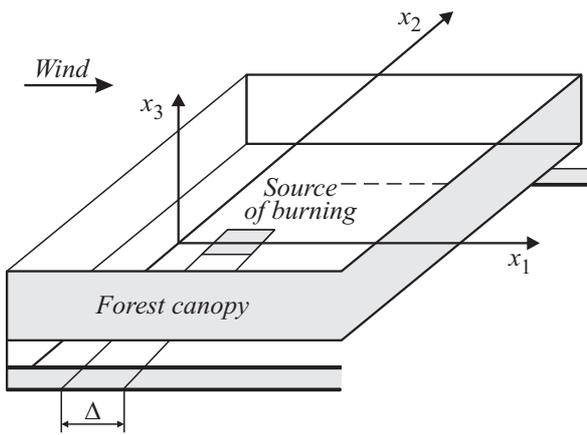


Рис. 1. Схема зоны пожара.

крупные и мелкие веточки, иголки), сила сопротивления полого леса представлена в уравнении сохранения импульса в газовой фазе, т.е. среда предполагается квазитвердая (почти не деформируется во время порывов ветра); 4) рассматривается так называемый „вентилируемый“ лесной массив, в котором объемной долей конденсированной фазы, состоящей из сухого органического вещества, воды в жидко-капельном состоянии, твердых продуктов пиролиза и золы, можно пренебречь по сравнению с объемной долей газовой фазы (компонент воздуха и газообразных продуктов пиролиза); 5) течение в рассматриваемой области имеет развитый турбулентный характер и молекулярный перенос не учитывается; 6) плотность газообразной фазы не зависит от давления из-за низкой скорости потока по сравнению со скоростью звука. Пусть начало декартовой системы координат расположено в центре источника горения на высоте уровня шероховатости, ось Ox_1 направлена параллельно поверхности Земли направо в направлении невозмущенной скорости ветра, ось Ox_2 расположена в горизонтальной плоскости и направлена перпендикулярно оси Ox_1 , а ось Ox_3 направлена вверх (рис. 1).

В связи с тем что горизонтальные размеры лесного массива значительно превышают вертикальные (высота леса), система уравнений общей математической модели лесных пожаров [9] была интегрирована в пределах от высоты уровня шероховатости — 0 — до верхней границы полого леса. Сформулированная выше задача сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j) = \dot{m} - (\dot{c}^- + \dot{c}^+)/h, \quad j = 1, 2, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho v'_j v'_i) - \rho s c_d v_i |\mathbf{v}| - \rho g_i - \dot{m} v_i + (\tau_i^- - \tau_i^+)/h, \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho c_p v'_j \bar{T}') + q_5 R_s - \alpha_v (T - T_s) + (q_T^- - q_T^+)/h + k_g (c U_R - 4\sigma T^4), \quad (3)$$

$$\rho \frac{dc_\alpha}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho v'_j c'_\alpha) + R_{5\alpha} - \dot{m} c_\alpha + (J_\alpha^- - J_\alpha^+)/h, \quad \alpha = 1, 5, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_j} \right) - kc U_R + 4k_s \sigma T_s^4 + 4k_g \sigma T^4 + (q_R^- - q_R^+)/h = 0, \quad k = k_g + k_s, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i c_{pi} \Phi_i \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s (c U_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_v (T - T_s), \quad (6)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \quad \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_C}{M_1} R_5, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0, \quad (7)$$

$$\sum_{\alpha=1}^5 c_\alpha = 1, \quad p_e = \rho RT \sum_{\alpha=1}^5 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \quad \mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3), \quad \mathbf{g} = (0, 0, g).$$

Начальные и граничные условия для системы уравнений имеют следующий вид:

$$t = 0: \quad v_1 = 0, \quad v_2 = 0, \quad v_3 = 0, \quad T = T_e, \quad c_\alpha = c_{ae}, \quad T_s = T_e, \quad \varphi_1 = \varphi_{ie}, \quad (8)$$

$$x_1 = -x_{1e}: \quad v_1 = V_e, \quad v_2 = 0, \quad v_3 = 0, \quad T = T_e, \quad c_\alpha = c_{ae}, \quad -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + \frac{c U_R}{2} = 0, \quad (9)$$

$$x_1 = x_{1e}: \quad \frac{\partial v_1}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial v_2}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial v_3}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + \frac{c U_R}{2} = 0, \quad (10)$$

$$x_2 = -x_{2e}: \quad \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \quad -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} + \frac{c U_R}{2} = 0, \quad (11)$$

$$x_2 = x_{2e}: \quad \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} + \frac{c U_R}{2} = 0. \quad (12)$$

Значения функций в источнике зажигания задавались следующим образом:

$$T = T_s = \begin{cases} T_e + \frac{t}{t_0} (T_0 - T_e), & t \leq t_0, \\ T_e + (T_0 - T_e) \exp(-k_0(t/t_0 - 1)), & t > t_0, \end{cases} \quad \rho v_3 = h_0 \dot{m}, \quad |x_1| \leq \Delta_x, \quad |x_2| \leq \Delta_y. \quad (13)$$

В представленной выше системе уравнений, начальных и граничных условиях используются следующие

обозначения: $R_1 - R_5$, $R_{5\alpha}$ — массовые скорости пиролиза лесных горючих материалов, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза, образования сажи и пепла и образования α -компонентов газодисперсной фазы; t_0 — время формирования очага горения, c_{pi} , ρ_i , φ_i — удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные доли i -й фазы (1 — сухое органическое вещество, 2 — вода в жидко-капельном состоянии, 3 — конденсированные продукты пиролиза, 4 — минеральная часть, 5 — газовая фаза); T , T_s — температуры газовой и конденсированной фаз; c_α — массовые концентрации ($\alpha = 1$ — кислород, 2 — горючие продукты пиролиза, 3 — сажа, 4 — пепел, 5 — инертные компоненты воздуха); p — давление; U_R — плотность энергии излучения; σ — постоянная Стефана-Больцмана; k — коэффициент ослабления излучения; k_g , k_s — коэффициенты поглощения для газодисперсной и конденсированной фаз; α_V — коэффициент обмена фаз, q_i , E_i , k_i — тепловые эффекты, энергии активации и предэкспоненты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза; s_σ — удельная поверхность элемента лесных горючих материалов; M_α , M_c , M — молекулярные веса индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси; s , c_d — удельная поверхность фитомассы и эмпирический коэффициент сопротивления полого леса; c — скорость света; v_i — проекции скорости на оси x_i ; α_c , ν — коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза; \dot{m} — массовая скорость образования газодисперсной фазы; v_{3*} — характерная скорость вдува из очага лесного пожара; g — ускорение свободного падения. Индексы „0“ и „e“ относятся к значениям функций в очаге горения и на большом расстоянии от зоны пожара соответственно. Верхний индекс „“ относится к пульсационной составляющей данной величины. Термодинамические, теплофизические и структурные характеристики соответствуют лесным горючим материалам соснового леса и приведены в [9]; символом $\frac{d}{dt}$ обозначена полная производная:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial}{\partial x_2}.$$

Турбулентные потоки тепла массы и количества движения записываются через градиенты осредненного течения

$$\begin{aligned} -\overline{\rho v'_i v'_j} &= \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} K \delta_{ij}, \\ -\overline{\rho v'_j c'_p T'} &= \lambda_t \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad -\overline{\rho v'_j c'_\alpha} = D_t \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\lambda_t = \mu_t c_p / \text{Pr}_t, \quad \rho D_t = \mu_t / \text{Sc}_t, \quad \mu_t = c_\mu \rho K^2 / \varepsilon,$$

где μ_t , λ_t , D_t — коэффициенты турбулентной вязкости, теплопроводности и диффузии соответственно, Pr_t , Sc_t — турбулентные числа Прандтля и Шмидта полагаются равными единице. Значение μ_t определялось на

основе локально-равновесной модели турбулентности [9]

$$\begin{aligned} \mu_t &= \rho l^2 \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_2}{\partial x_2} \right)^2 \right] \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_1} \right)^2 - \frac{2}{3} \left[\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} \right]^2 \right\}^{1/2}. \end{aligned} \quad (15)$$

В системе (1)–(7) величины \dot{c} , τ_i , J_α , q_T характеризуют обмен импульсом, массой α -компонента и энергией как с приземным слоем атмосферы, так и с нижним ярусом леса и определяются соответствующими граничными условиями. Таким образом, совокупности уравнений (1)–(7) являются балансовыми соотношениями массы, энергии и количества движения, представляющие собой постановку сопряженной задачи, решение которой позволяет определить характеристики сложного взаимосвязанного процесса распространения лесного пожара. Решение сформулированной выше задачи представляет значительные математические трудности. Упомянутые в нем величины \dot{c} , τ_i , J_α , q_T , вообще говоря, должны определяться в процессе решения сопряженной задачи. Предполагаем, что тепло- и массообмен фронта пожара со слоем атмосферы описывается законом Ньютона и соответствующие величины в (1)–(7) определяются подобным образом, как и в [9]. Значения коэффициентов ослабления излучения для конденсированной и газодисперсной фаз определяются с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} k_s &= \alpha_s \varphi_s / d_s, \quad k_g = \alpha_0 \varphi_0 / d_0 + \alpha_z \varphi_z / d_z, \\ \varphi_s &= \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4. \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь α_s — коэффициент поглощения элемента ЛГМ, d_s , d_0 , d_z — диаметры элемента ЛГМ, частиц сажи и дыма (в виде сферы), α_0 , α_z — коэффициенты поглощения отдельных частиц сажи и дыма.

Коэффициент межфазного (газ и конденсированная фаза) теплообмена определяется $\alpha_V = \alpha S - \gamma C_p \dot{m}$, $S = 4\varphi_s / d_s$. Здесь $\alpha = Nu \lambda / d_s$ — коэффициент теплообмена для элемента ЛГМ (например, хвоинки), Nu — число Нуссельта для цилиндра, λ — коэффициент теплопроводности для хвоинки, γ — параметр, характеризующий отношение между молекулярной массой окружающих и вдуваемых газов [9]. Чтобы определить источниковые члены, которые характеризуют приток (отток массы) в единицу объема газовой-дисперсионной фазы, были использованы следующие формулы: для скорости образования газодисперсной фазы \dot{m} , расхода кислорода R_{51} и изменения концентрации оксида углерода R_{52} , образования сажи и пепла $R_{53} - R_{54}$

$$\dot{m} = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3, \quad R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5,$$

$$R_{52} = v_g (1 - \alpha_c) R_1 - R_5, \quad R_{53} = \alpha_4 R_1,$$

$$R_{54} = \frac{\alpha_5 v_3}{v_3 + v_{3*}} R_3, \quad R_{55} = 0,$$

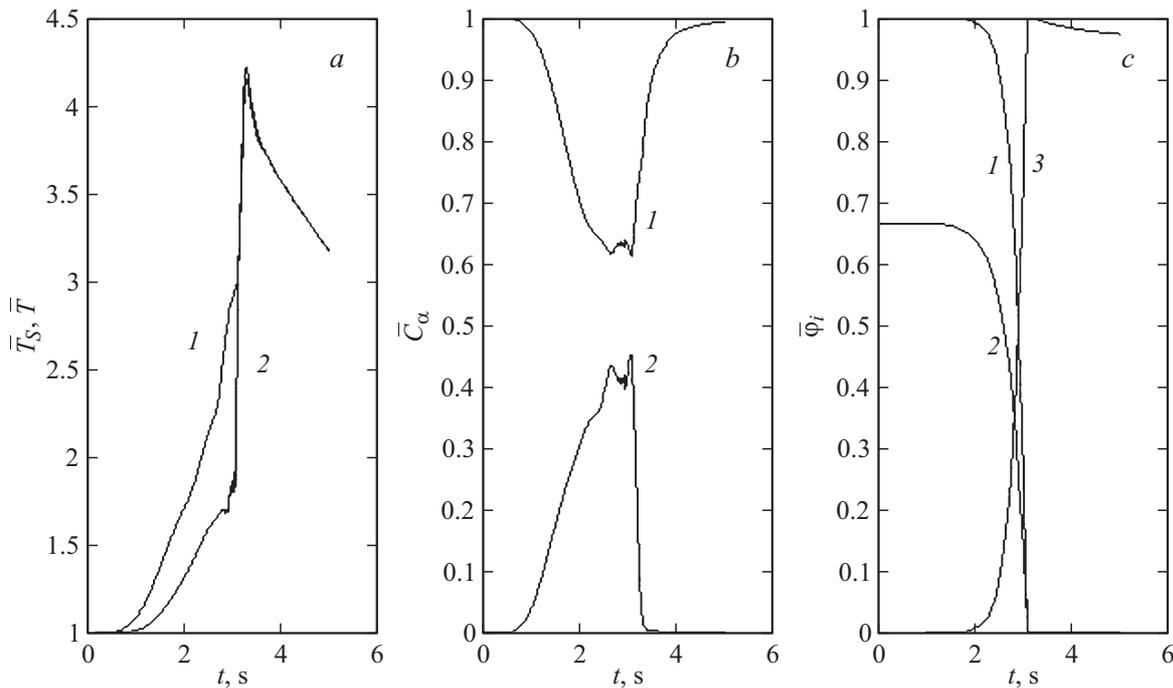


Рис. 2. Распределение с течением времени температур газовой и конденсированной фаз, концентрации кислорода и продуктов пиролиза и объемных долей фаз: *a* — 1 — $\bar{T} = T/T_e$, 2 — $\bar{T}_s = T_s/T_e$, $T_e = 300$ К, *b* — 1 — $\bar{C}_1 = C_1/C_{1e}$, 2 — $\bar{C}_2 = C_2/C_{1e}$, $C_{1e} = 0.23$, *c* — 1 — $\bar{\varphi}_1 = \varphi_1/\varphi_{1e}$, 2 — $\bar{\varphi}_2 = \varphi_2/\varphi_{1e}$, 3 — $\bar{\varphi}_3 = \varphi_3/\varphi_{3e}$.

где ν_g — массовая доля горючих продуктов в газообразных продуктах пиролиза, α_4 и α_5 — эмпирические константы. Скорости реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза записываются с помощью закона Аррениуса

$$R_1 = k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right),$$

$$R_2 = k_2 \rho_2 \varphi_2 T_s^{-0.5} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_s}\right),$$

$$R_3 = k_3 \rho \varphi_3 s_\sigma c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_s}\right),$$

$$R_5 = k_5 M_2 \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0.25} \frac{c_2 M}{M_2} T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right).$$

Предполагается, что оптические свойства среды не зависят от длины волны излучения (в предположении, что среда является „серой“). Для математического описания переноса излучения используется также так называемое диффузионное приближение.

2. Метод решения и анализ полученных результатов

Система уравнений (1)–(7) с начальными и граничными условиями (8)–(13) для численного интегрирования редуцирована к дискретной форме с помощью метода

контрольного объема Патанкара–Сполдинга [13]. Сеточные уравнения, возникающие в процессе дискретизации, разрешались с помощью метода SIP [13,14]. Алгоритм решения приведенной задачи включает в себя расщепление по физическим процессам, т.е. вначале рассчитывалась гидродинамическая картина, а затем решались уравнения химической кинетики и учитывались химические источники для скалярных функций [14]. При этом шаг по времени для интегрирования системы обыкновенных уравнений выбирался автоматически. Согласование по-

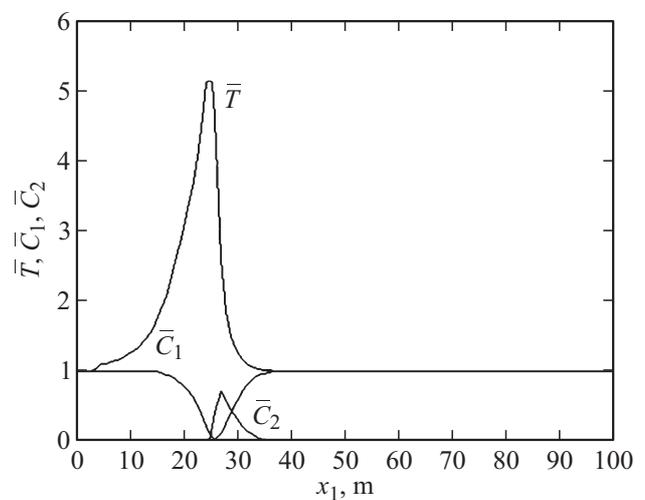


Рис. 3. Распределение температуры \bar{T} ($\bar{T} = T/T_e$, $T_e = 300$ К), концентраций горючих продуктов пиролиза \bar{c}_2 ($\bar{c}_2 = c_2/c_{1e}$, $c_{1e} = 0.23$) и кислорода \bar{c}_1 ($\bar{c}_1 = c_1/c_{1e}$) во фронте пожара.

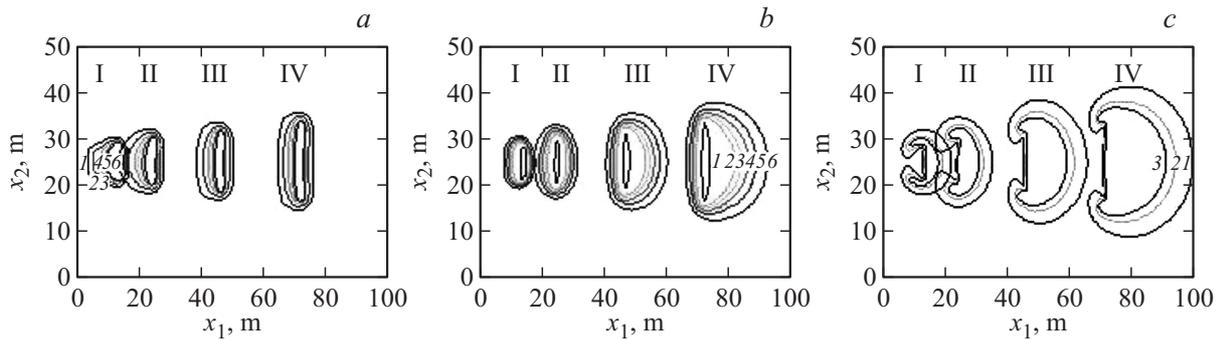


Рис. 4. Распределения температуры газовой фазы (а), концентрации кислорода (b) и летучих продуктов пиролиза (с); $V_e = 5$ m/s, в моменты времени t, s : I — 3, II — 6, III — 12, IV — 20.

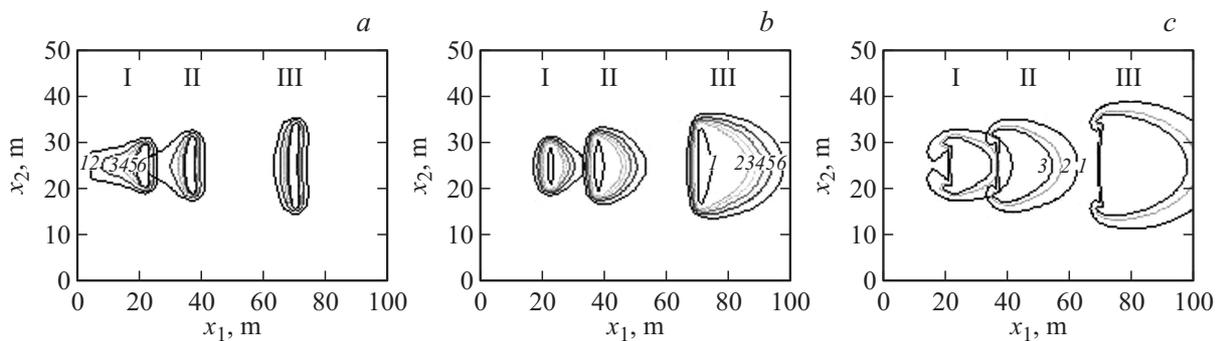


Рис. 5. Распределения температуры газовой фазы (а), концентрации кислорода (b) и летучих продуктов пиролиза (с); $V_e = 10$ m/s, в моменты времени t, s : I — 3, II — 6, III — 12.

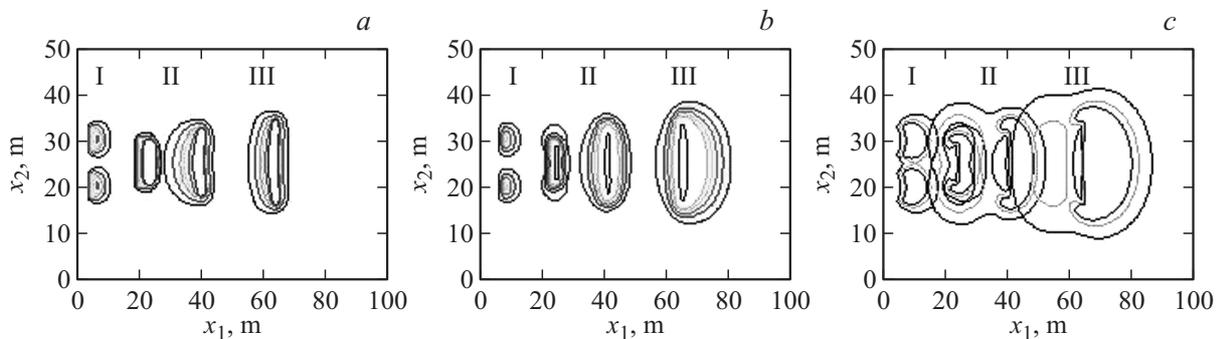


Рис. 6. Распределения температуры газовой фазы, концентраций кислорода и летучих горючих продуктов пиролиза для двух очагов горения соответственно.

лей скорости и давления осуществлялось итерационным образом в рамках алгоритма SIMPLE [13].

На основе изложенной математической постановки (1)–(13) проводились численные расчеты по определению картины процесса возникновения верхового лесного пожара в результате зажигания полога леса от заданного очага горения. В результате численного интегрирования получены поля массовых концентраций компонент газовой фазы, температур, объемных долей компонент твердой фазы. На рис. 2 представлены изменения с течением времени температур газовой и твердой фаз, массовых концентраций кислорода и горючих продуктов пиролиза и объемных долей фаз в

пологе леса вблизи очага горения. Из анализа кривых на рис. 2 следует, что в результате воздействия очага повышенной температуры в его окрестности происходит прогрев полога леса (рис. 2, а), испарение влаги (рис. 2, с, кривая 2), разложение сухого ЛГМ (рис. 2, с, кривая 1). В результате этого в пологе леса выделяются летучие горючие продукты пиролиза (рис. 2, b, кривая 2).

Во все время процесса температура газовой фазы выше температуры твердой фазы (рис. 2, а). Газообразные продукты пиролиза, выделившиеся в результате разложения ЛГМ, воспламеняются приблизительно в момент времени 2.5 s. При этом также происходит уменьшение концентрации кислорода. Начиная с момента зажигания,

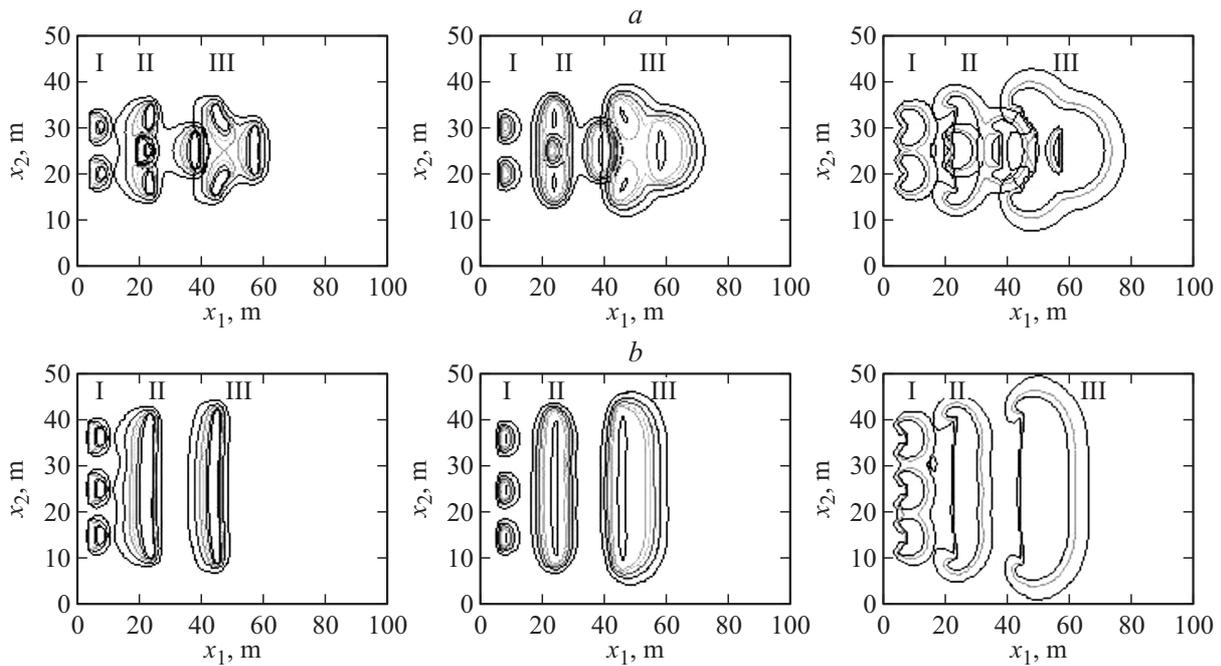


Рис. 7. Распределения температуры газовой фазы, концентраций кислорода и летучих горючих продуктов пиролиза для трех очагов горения.

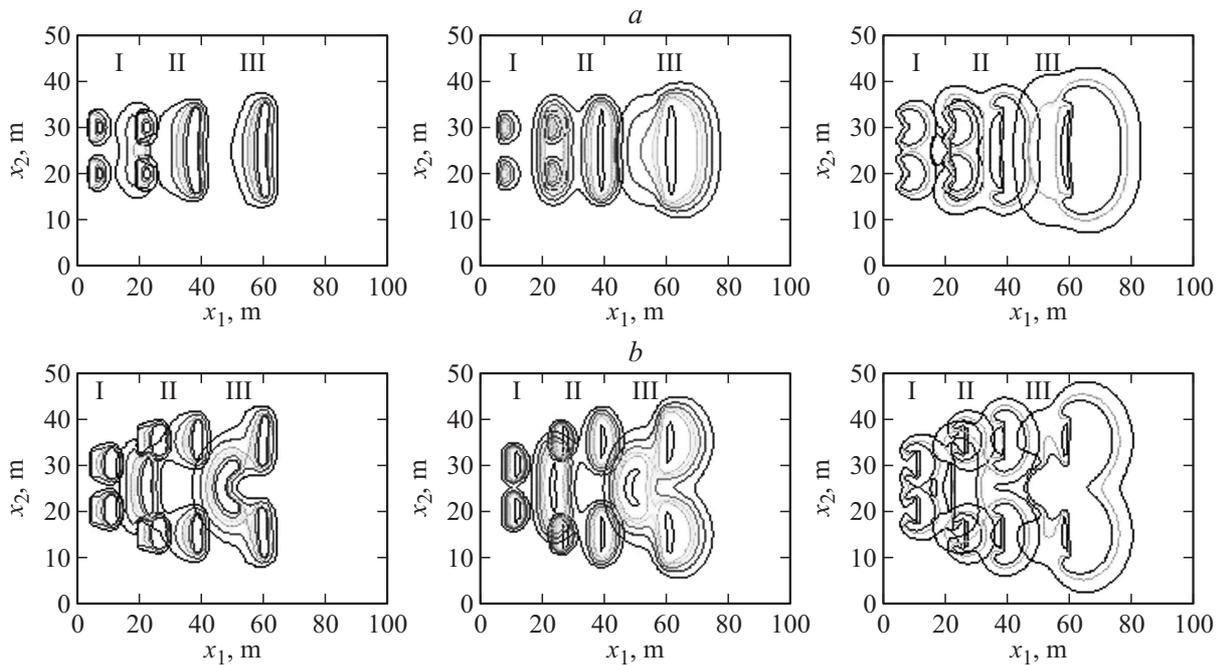


Рис. 8. Распределения температуры газовой фазы, концентраций кислорода и летучих горючих продуктов пиролиза для четырех очагов горения.

температуры газовой и конденсированной фаз становятся одинаковыми (рис. 2, *a*). Таким образом, под воздействием очага повышенной температуры происходит воспламенение полога леса. Затем формируется фронт пожара, который под воздействием ветра продвигается по пологу леса. Распределения температуры, концентрации газообразных продуктов пиролиза и кислорода

в фронте лесного пожара представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что волна горения выглядит как солитон. Концентрация кислорода падает почти до нуля перед фронтом пожара, так как он расходится при горении продуктов пиролиза, концентрация которых достигает максимума перед достижением максимальной температуры.

Дальнейшее продвижение фронта верхового лесного пожара в глубь полога леса по направлению ветра представлено в виде распределений изолиний температуры и концентраций кислорода и летучих продуктов пиролиза в различные моменты времени. На рис. 4, 5 представлены распределения изолиний для температуры (I — 1.5, 2 — 2°, 3 — 2.6, 4 — 3, 5 — 3.5, 6 — 4) газовой фазы, концентраций кислорода (I — 0.1, 2 — 0.5, 3 — 0.6, 4 — 0.7, 5 — 0.8, 6 — 0.9) и летучих горючих продуктов пиролиза (I — 1°, 2 — 0.1, 3 — 0.05, 4 — 0.01) ($c_a = c_a/c_{1e}$, $c_{1e} = 0.23$) для скорости ветра $V_e = 5$ м/с (рис. 4) и $V_e = 10$ м/с (рис. 5) для высоты деревьев $h = 10$ м.

По изменению расположения изотерм для температуры горения можно отслеживать перемещение фронта лесного пожара с течением времени. Например, из рис. 4 следует, что с увеличением скорости ветра до 10 м/с скорость распространения пожара увеличивается до 5 м/с. При верховых лесных пожарах, особенно при наличии сильного ветра, имеет место перенос горящих частиц на значительные расстояния перед фронтом горения. В связи с этим возможно возникновение крупномасштабных очагов лесных пожаров в результате объединения таких множественных очагов горения (пятнистых пожаров). Образование пятнистых пожаров включает в себя несколько стадий: генерация горящих частиц, перенос их на значительные расстояния, появление новых очагов горения в результате зажигания лесных горючих материалов горящими частицами. Настоящая математическая модель и результаты расчетов могут быть использованы для иллюстрации картины формирования крупных пожаров путем объединения нескольких источников горения, возникших в результате зажигания горящими частицами. Результаты математического моделирования данного процесса представлены на рис. 6–8, на которых изображены распределения линий равных уровней (температуры газовой фазы, концентраций кислорода и летучих горючих продуктов пиролиза соответственно) в различные моменты времени (t , с: I — 3, II — 6, III — 12) для тех же значений изолиний, что и на рис. 4, 5.

Для двух очагов зажигания, расположенных рядом, процесс объединения и формирования единого фронта верхового лесного пожара показан на рис. 6. Расчеты показывают, что для объединения трех очагов горения потребуется больше времени, если источники зажигания расположены в вершинах треугольника (рис. 7, а). Если же первоначальные очаги горения расположены на одной линии, то формирование единого фронта горения происходит быстрее (рис. 7, б), чем в предыдущем случае. Более сложная картина формирования единого фронта верхового лесного пожара реализуется для четырех источников горения (рис. 8), расположенных в углах прямоугольника (рис. 8, а) и трапеции (рис. 8, б).

Представленная в настоящей работе модель может стать составной частью математической модели по описанию возникновения крупномасштабных лесных пожаров и их влиянию на приземный слой атмосферы, а также зажиганию зданий и сооружений, расположенных вблизи лесных массивов.

Заключение

С помощью представленной модели на основе численного решения получена подробная картина изменения температуры и полей концентрации компонент с течением времени при распространении верховых лесных пожаров, а также образования крупномасштабных очагов пожаров в результате объединения множественных очагов горения. Результаты расчета скорости распространения верховых лесных пожаров согласуются с законами физики и экспериментальными данными [1,9]. Использование представленной в работе математической модели дает возможность описать различные условия распространения лесных пожаров с учетом метеорологических условий и состояния лесных горючих материалов, что позволяет применять данную модель для профилактических мероприятий по борьбе с лесными пожарами.

Работа выполнена за счет средств субсидии в рамках реализации Программы повышения конкурентоспособности ТПУ.

Список литературы

- [1] *Конеv Э.В.* Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977. 239 с.
- [2] *Van Wagner C.E.* // Can. J. Forest Re. 1977. Vol. 7. P. 23–34.
- [3] *Albini F.A.* et al. // Int. J. Wildland Fire. 1995. Vol. 5. N 2. P. 81–91.
- [4] *Alexander V.E.* Crown fire thresholds in exotic pine plantations of Australasia. Ph.D. Thesis. Department of Forestry; Australian National University, 1998.
- [5] *Cruz M.G.* et al. // Proc. of IV Internat. Conf. on Forest Fire Research. Luso-Coimbra. Portugal, 2002.
- [6] *Rothermel R.C.* // Proc. of the 11th Int. Conf. on Fire and Forest Meteorology. Missoula. USA, 1991.
- [7] *Scott J.H.* et al. // USDA Forest Service. Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. Fort Collins: RMRS-RP-29. Colorado. USA, 2001.
- [8] *Xanthopoulos G.* Development of a wildland crown fire initiation model. Ph.D. Thesis University of Montana. 1990.
- [9] *Гришин А.М.* Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.
- [10] *Grishin A.M., Perminov V.A.* // Combust. Explo. Shock. 1998. N 34. P. 378–386.
- [11] *Morvan D., Dupuy J.L.* // Combust. Flame. 2001. Vol. 127. P. 1981–1994.
- [12] *Morvan D., Dupuy J.L.* // Combust. Flame. 2004. Vol. 138. P. 199–210.
- [13] *Patankar S.V.* Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. NY: Hemisphere Publishing Corporation, 1981. 197 p.
- [14] Автореф. канд. дис. *Перминов В.А.* Математическое моделирование возникновения массовых и верховых лесных пожаров с учетом радиационно-конвективного теплопереноса и двухтемпературности среды. Томск: ТГУ, 1995. 188 с.