

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛОСКОГО ФРОНТА ЛЕСНОГО ПОЖАРА

В. А. ПЕРМИНОВ

Беловский филиал

Кемеровского государственного университета, Россия

e-mail: p_valer@mail.ru

We propose a mathematical formulation of the problem of the forest fire initiation and propagation based on the averaged three dimensional non-stationary mathematical model of forest fire. A method of control volume is used to obtain the discrete analogies. The boundary-value problem is solved numerically. The results of mathematical modeling allow investigation of the initiation and spreading dynamics of the forest fire.

В результате лесных пожаров ежегодно в Российской Федерации гибнет около 1 млн гектаров леса [1–3]. Наиболее опасны верховые пожары. На их долю приходится до 70 % выгоревшей площади. Тушение этого вида пожаров требует больших затрат сил и средств и в подавляющем большинстве случаев малоэффективно или невозможно. Поэтому изучение данного явления поможет разработать профилактические меры по предотвращению и определению возможности возникновения верховых лесных пожаров. Как правило, возгорание в лесах происходит в нижнем ярусе леса — в напочвенном покрове (опавшая хвоя, мхи, лишайники, отмершая трава и т. д.), а затем огнем охватывается полог леса, т. е. верховой лесной пожар возникает в результате перехода низового лесного пожара в верховой [3–5]. Поскольку экспериментальные методы изучения лесных пожаров дорогостоящи и не позволяют проводить полное физическое моделирование данного явления, представляют интерес теоретические методы исследования. Так, метод математического моделирования позволяет адекватно описывать состояние лесного биогеоценоза и приземного слоя атмосферы при лесных пожарах. Например, на основе численного анализа можно исследовать процесс возникновения и распространения верхового лесного пожара.

В данной работе приводятся результаты расчетов возникновения и распространения верхового лесного пожара в упрощенной постановке, полученной на основе общей математической модели пожаров [1]. Для ее вывода используется метод осреднения, предложенный в [2]. В отличие от одномерной постановки, использованной в [2], в настоящей работе предложена постановка задачи и получены результаты расчетов в двумерном случае для горизонтальных координат в плане. Кроме того, в представленной задаче при расчете полей скорости и давления учитываются в полной постановке уравнения Рейнольдса.

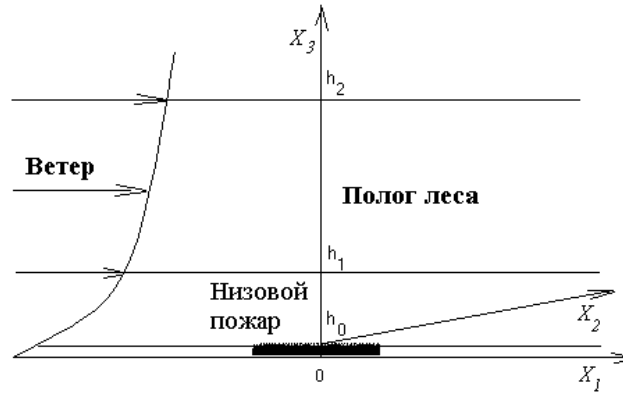


Рис. 1. Схема расчетной области.

Пусть начало системы координат $x_1, x_2, x_3 = 0$ связано с центром источника возникновения лесного пожара, ось $0x_3$ направлена вверх, а оси $0x_1$ и $0x_2$ — параллельно поверхности земли, ось x_1 совпадает с направлением ветра (рис. 1).

Так как горизонтальные размеры лесного массива много больше вертикального размера — высоты лесного массива, общая система дифференциальных уравнений, описывающая процессы в лесном массиве, может быть проинтегрирована по вертикальной координате x_3 . Осреднение исходных характеристик по высоте полога леса произведено с целью укрупнения информации. Приводя основную систему уравнений к дивергентному виду, проинтегрируем ее по высоте от напочвенного покрова до уровня верхней границы полога леса. Через h обозначим высоту, по которой проводится осреднение. Кроме того, будем считать, что

$$\int_0^h \phi dx_3 = \bar{\phi} h.$$

Здесь $\bar{\phi}$ — некоторое среднее значение величины ϕ .

Считается, что течение носит развитый турбулентный характер, и молекулярным переносом пренебрегаем по сравнению с турбулентным. Плотность газовой фазы не зависит от давления из-за малости скорости течения по сравнению со скоростью звука. Среда находится в локально-термодинамическом равновесии. Известна скорость ветра над напочвенным покровом в невозмущенных условиях. Газодисперсная смесь бинарна и состоит из частиц конденсированной фазы, а также газовой фазы — компонентов кислорода, газообразных горючих и инертных компонентов. Характерные размеры лесного массива в горизонтальном направлении превышают высоту полога леса. Сформулированная выше задача сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j) = \dot{m}, \quad j = 1, 2, \quad i = 1, 2; \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{v}'_i \bar{v}'_j) - \rho s c_d v_i |v| - \rho g_i - \dot{m} v_i; \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho c_p v'_j \bar{T}') + q_5 R_5 - \alpha_V (T - T_s) + (q_T^- - q_T^+)/h + k_g (cU_R - 4\sigma T^4); \quad (3)$$

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

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

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i c_{pi} \varphi_i \frac{\partial T_S}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s (cU_R - 4\sigma T_S^4) + \alpha_V (T - T_S); \quad (6)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \quad \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_C R_1 - \frac{M_C}{M_1} R_3, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0; \quad (7)$$

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

$$\dot{m} = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_C}{M_1} R_3 + R_{54} + R_{55},$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5, \quad R_{52} = \nu(1 - \alpha_c) R_1 - R_5, \quad R_{53} = 0, \quad R_{54} = \alpha_4 R_1, \quad R_{55} = \frac{\alpha_5 v_3}{v_3 + v_{3*}} R_3.$$

Для определения скоростей реакций пиролиза, испарения влаги, горения кокса и летучих продуктов пиролиза используются формулы

$$R_1 = k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right), \quad R_2 = k_2 \rho_2 \varphi_2 T_s^{-0.5} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_s}\right),$$

$$R_3 = k_3 \rho \varphi_3 s_\sigma c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_s}\right), \quad R_5 = k_5 M_2 \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0.25} \frac{c_2 M}{M_2} T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right).$$

Начальные и граничные условия имеют следующий вид:

$$t = 0 : v_1 = 0, \quad v_2 = 0, \quad T = T_e, \quad c_\alpha = c_{\alpha e}, \quad T_s = T_e, \quad \varphi_i = \varphi_{ie}; \quad (8)$$

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

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

$$x_2 = x_{20} : \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \quad -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} + \frac{c}{2} U_R = 0; \quad (11)$$

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

Значения функций в очаге зажигания на напочвенном покрове ($|x_1| \leq \Delta_x, |x_2| \leq \Delta_y$) задаются в зависимости от времени:

$$\rho v_3 = h_0 \dot{m}, \quad T = T_s = \begin{cases} T_e + \frac{t}{t_0} (T_0 - T_e), & t \leq t_0, \\ T_e + (T_0 - T_e) \exp\left[-k \left(\frac{t}{t_0} - 1\right)\right], & t > t_0. \end{cases}$$

В приведенных уравнениях $R_1 - R_5$, $R_{5\alpha}$ — массовые скорости пиролиза лесных горючих материалов, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза и образования α -компонентов газодисперсной фазы; t_0 — время зажигания; c_{pi} , ρ_i , φ_i — удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные доли i -й фазы (1 — сухое органическое вещество, 2 — вода в жидкокапельном 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 — инертные компоненты воздуха, 4 — сажа, 5 — пепел); 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 — удельная поверхность элемента лесных горючих материалов; M_α , M_c , M — молекулярные веса индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси; s_d — удельная поверхность фитомассы и эмпирический коэффициент сопротивления полога 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; α_4 , α_5 — эмпирические константы; g — ускорение свободного падения. Индексы “0” и “e” относятся к значениям функций в очаге горения и на большом расстоянии от зоны пожара соответственно. Штрих относится к пульсационной составляющей данной величины. Термодинамические, теплофизические и структурные характеристики соответствуют лесным горючим материалам соснового леса и приведены в [2]. Турбулентные потоки тепла массы и количества движения записываются через градиенты среднего течения на основе подхода, предложенного в [2]. 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, совокупность уравнений (1)–(7) является балансовыми соотношениями массы, энергии и количества движения и представляет собой постановку сопряженной задачи, решение которой позволяет определить характеристики сложного процесса распространения лесного пожара. Решение сформулированной выше задачи связано со значительными математическими трудностями. Упомянутые в нем величины \dot{c} , τ_i , J_α , q_T , вообще говоря, должны определяться в процессе решения сопряженной задачи. Предполагается, что тепло- и массообмен фронта пожара со слоем атмосферы описывается законом Ньютона, и соответствующие величины в (1)–(7) определяются подобным образом, как и в [2].

Значения коэффициентов ослабления излучения для конденсированной и газодисперсной фаз определяются с помощью следующих выражений [1, 3]:

$$k_S = \alpha_S \varphi_S / d_S, \quad k_g = \alpha_0 \varphi_0 / d_0 + \alpha_Z \varphi_Z / d_Z, \quad \varphi_S = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4.$$

Здесь α_S — коэффициент поглощения элемента лесных горючих материалов (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 как $\alpha_V = \alpha S - \gamma C_P \dot{m}$, $S = 4\varphi_S / d_S$. Здесь $\alpha = \text{Nu} \lambda / d_S$ — 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.

Система уравнений (1)–(7) с начальными и граничными условиями (8)–(12) для численного интегрирования редуцирована к дискретной форме с помощью метода контрольного объема Патанкара — Сполдинга [6]. При получении дискретного аналога использовалась так называемая шахматная сетка, т. е. компоненты скорости рассчитывались в точках, расположенных на гранях, а скалярные функции — в центрах контрольных объемов. В этом случае только физические поля скорости могут удовлетворять уравнению неразрывности. Другое важное преимущество шахматной сетки заключается в том, что разность давлений между двумя соседними узловыми точками определяет составляющую скорости в точке, расположенной между этими узловыми точками [6].

Для решения поставленной задачи использовалась такая последовательность. На первом этапе задавались приближения для всех искомых функций. Далее алгоритм решения приведенной задачи включает в себя расщепление по физическим процессам, т. е. вначале рассчитывались гидродинамическая картина течения и распределения остальных скалярных функций без учета химических источников, а затем решались уравнения химической кинетики и учитывались химические реакции для скалярных функций. При этом шаг по времени для интегрирования системы обыкновенных уравнений выбирался автоматически. Согласование скорости и давления осуществлялось итерационным методом в рамках алгоритма SIMPLE [3]. Сеточные уравнения, возникающие в процессе дискретизации, решались с помощью метода SIP [3].

Практическая проверка устойчивости и сходимости проводилась изменением размеров контрольных объемов и шага по времени. Точность используемого метода дискретизации и правильность работы программы оценивали с помощью метода априори задаваемых аналитических решений, состоящего в том, что в используемые уравнения подставлялись аналитические выражения искомых функций, вычислялась невязка уравнений, которая затем трактовалась как фиктивный источник в каждом уравнении. Затем с помощью описанного выше алгоритма значения функций восстанавливались. Точность восстановления функций не превышала 1 %.

На основе изложенной математической постановки (1)–(12) проводились численные расчеты по определению картины процесса возникновения верхового лесного пожара в результате зажигания полога леса от заданного очага горения. Иницирование горения осуществлялось с помощью задания в прямоугольной области температуры горения в зависимости от времени, которая характерна для фронта горения. Данный очаг существовал некоторое время до момента зажигания полога леса, а затем отключался. В результате численного интегрирования получены поля массовых концентраций компонентов газовой фазы, температур, объемных долей компонентов твердой фазы.

На рис. 2 изображены характеристики процесса зажигания от очага горения, представлено изменение 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. Видно, что в результате воздействия очага повышенной температуры в его окрестности происходит прогрев полога леса (рис. 2, а), наблюдается испарение влаги (рис. 2, в, кривая 2), разложение сухого ЛГМ (рис. 2, в, кривая 1). В результате этого в пологе леса выделяются летучие горючие продукты пиролиза (рис. 2, б, кривая 2). Во все время процесса температура газовой фазы выше температуры твердой фазы (рис. 2, а). Газообразные продукты пиролиза, выделившиеся в результате разложения ЛГМ, воспла-

меняются в пространстве между пологом леса и напочвенным покровом (приблизительно в момент времени 2.5 с). При этом также происходит уменьшение концентрации кислорода. Начиная с момента зажигания температуры газовой и конденсированной фаз становятся одинаковыми (рис. 2, а).

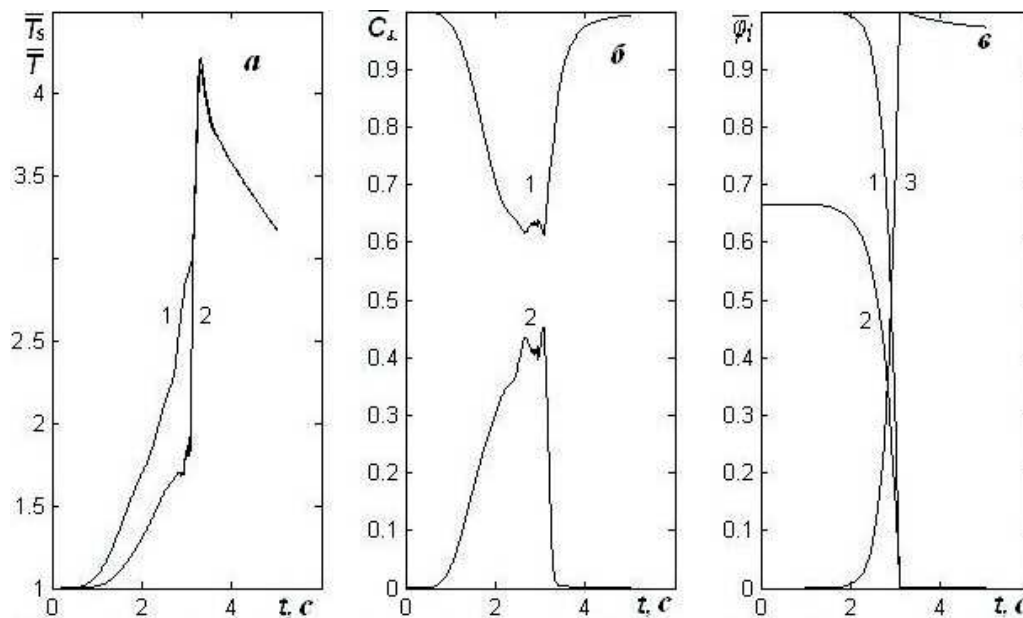


Рис. 2. Распределение с течением времени температур газовой и конденсированной фаз, концентрации кислорода и продуктов пиролиза и объемных долей фаз: а — кривая 1 — $\bar{T} = T/T_e$, кривая 2 — $\bar{T}_s = T_s/T_e$, $T_e = 300$ К; б — кривая 1 — \bar{c}_1 , кривая 2 — \bar{c}_2 , $\bar{c}_\alpha = c_\alpha/c_{1e}$; в — кривая 1 — $\bar{\varphi}_1 = \varphi_1/\varphi_{1e}$, кривая 2 — $\bar{\varphi}_2 = \rho_2\varphi_2/\rho_c$, кривая 3 — $\bar{\varphi}_3 = \rho_3\varphi_3/\alpha_c\rho_1\varphi_{1e}$.

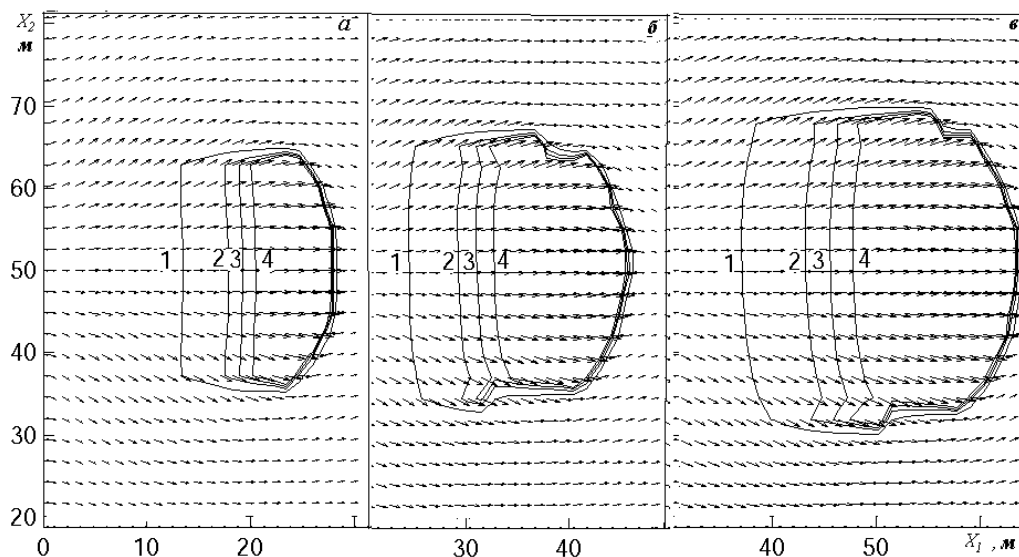


Рис. 3. Распределение изотерм и поля скорости в различные моменты времени: $t = 4.3$ с (а), $t = 6$ с (б), $t = 8$ с (в); $V_e = 5$ м/с; $\bar{T} = 2, 2.5, 3, 4$ (кривые 1–4 соответственно); $\bar{T} = T/T_e$, $T_e = 300$ К.

Таким образом, под воздействием очага повышенной температуры воспламеняется полог леса. При дальнейшем прогреве полога леса происходит продвижение зоны воспламенения в глубь полога леса в направлении ветра. На рис. 3–5 представлено распределение температур, массовых концентраций кислорода и летучих продуктов пиролиза в различные моменты времени в процессе распространения фронта лесного пожара. Из рисунков следует, что формируется фронт горения, который распространяется по лесному массиву. На рис. 3 показано распределение изотерм газовой фазы в три различных момента времени.

Перед областью горения формируется фронт пиролиза (см. рис. 5) в виде зоны с повышенным содержанием летучих горючих продуктов пиролиза. Под влиянием горения происходит также выгорание последних, что вызывает уменьшение концентрации кисло-

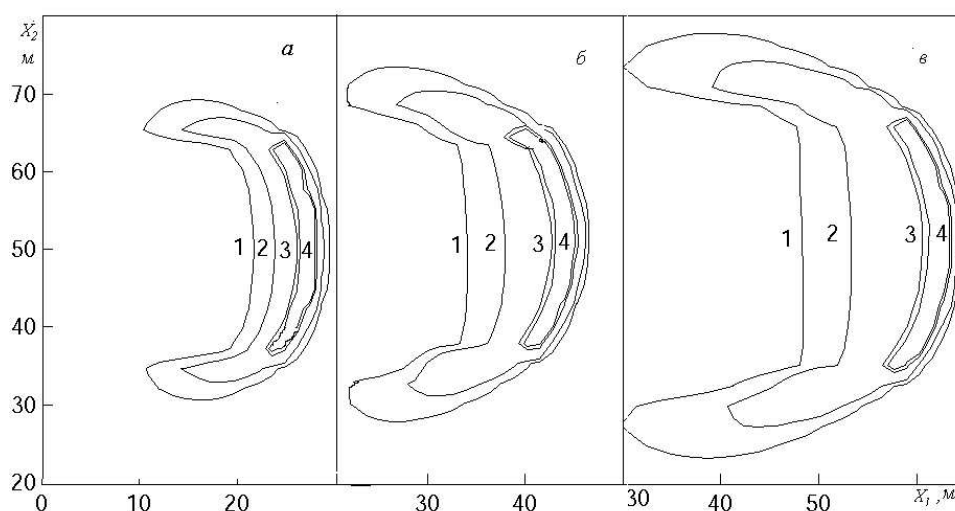


Рис. 4. Распределение кислорода \bar{c}_1 в моменты времени: $t = 4.3$ с (а), $t = 6$ с (б), $t = 8$ с (в); $V_e = 5$ м/с; $\bar{c}_1 = 0.9, 0.8, 0.5, 0.4$ (кривые 1–4 соответственно).

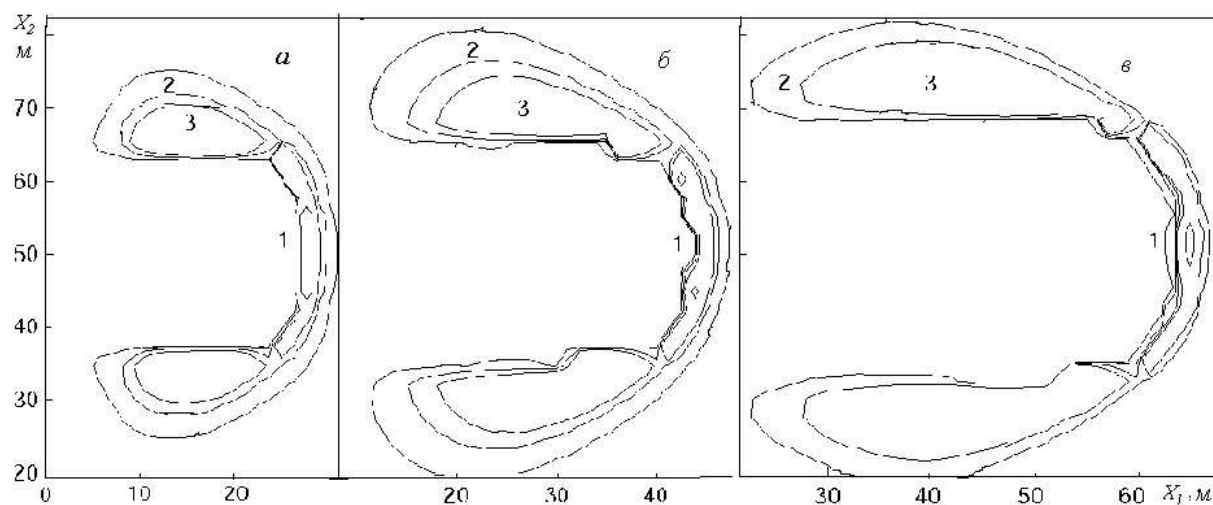


Рис. 5. Распределение газообразных продуктов пиролиза \bar{c}_2 в моменты времени: $t = 4.3$ с (а), $t = 6$ с (б), $t = 8$ с (в); $V_e = 5$ м/с; $\bar{c}_2 = 0.1, 0.5, 1$ (кривые 1–3 соответственно).

рода (см. рис. 4). При дальнейшем расчете наблюдается перемещение изотерм и изолиний компонентов газовой фазы, что указывает на перемещение и расширение фронта лесного пожара. Расчеты показывают, что с увеличением скорости ветра возрастает скорость распространения горения. Увеличение влагосодержания ЛГМ ведет к уменьшению скорости распространения фронта пожара, а затем и к его прекращению, что соответствует результатам работ [1, 2] и результатам экспериментальных исследований, представленных в [7–9].

Список литературы

- [1] Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992.
- [2] Гришин А.М., Грузин А.Д., Зверев В.Г. Математическая теория верховых лесных пожаров // Теплофизика лесных пожаров / ИТФ СО РАН СССР. Новосибирск, 1984. С. 38–75.
- [3] Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения массовых и верховых лесных пожаров с учетом радиационно-конвективного теплопереноса и двухтемпературности среды: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1995.
- [4] Гришин А.М., Перминов В.А. Переход низового лесного пожара в верховой // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 6. С. 27–35.
- [5] PERMINOV V.A. Mathematical modeling of crown forest fire initiation // III Intern. Conf. on Forest Fire Research and 14th Conf. on Fire and Forest Meteorology. Portugal, Luso, 1998. P. 419–431.
- [6] ПАТАНКАР С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
- [7] ИСАКОВ Р.В. Воспламенение хвои при развитии низовых пожаров в верховые: Дис. ... канд. техн. наук: Красноярск, 1985.
- [8] ЛЕОНТЬЕВ А.К., МОршин В.Н. Метод расчета воспламенения тонкой растительной частицы в конвективном потоке газа // Интенсификация лесозаготовительных и лесохозяйственных производств. Л.: ЛТА, 1989. С. 59–67.
- [9] КОНЕВ Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977.

*Поступила в редакцию 23 марта 2006 г.,
в переработанном виде — 18 апреля 2006 г.*