

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЕРХОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ  
В ТРЕХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ*В. А. Перминов, А. М. Гудов*

## MATHEMATICAL MODEL OF CROWN WILDFIRE INITIATION IN THREE-DIMENSIONAL SETTING

*V. A. Perminov, A. M. Gudov*

В данной работе представлена математическая модель и результаты численных расчетов возникновения верхового лесного пожара в результате зажигания полога леса от очага низового пожара. Постановка данной задачи получена на основе общей математической модели пожаров [1]. Модель учитывает метеорологические условия (скорость ветра, температура окружающей среды и т. д.) и характеристики лесных массивов (влажность и запас лесных горючих материалов, пород деревьев и их высоты и др.). Разработана компьютерная программа расчета зажигания полога леса от очага низового лесного пожара. Показано, что процесс является многостадийным (инертный прогрев, сушка, пиролиз и зажигание) перехода низового лесного пожара в верховой. Представленная математическая модель может быть использована для определения критических условий воспламенения полога леса и оценки возможности возникновения верховых лесных пожаров на основе исходных данных о состоянии лесного массива и метеорологических условиях.

The results of calculations of the initiation of crown wildfire under influence of surface wildfire, derived from a general mathematical model of fire are presented. A computer program for calculating the ignition of crown wildfire in time for different meteorological conditions (wind speed, ambient temperature, etc.) and characteristics of forests (moisture and the bulk of forest fuel materials, trees and their height, etc.) was developed. The computer program is used for the calculation of critical condition of the possibility of crown wildfire initiation.

**Ключевые слова:** математическая модель, лесной пожар, верховой пожар, низовой пожар, зажигание.

**Keywords:** mathematical model, wildfire, crown fire, surface fire, ignition.

В работах [1; 3] отмечается, что верховые лесные пожары являются наиболее опасным видом лесных пожаров, так как они наносят наибольший ущерб древостою, их тушение трудоемко, а в некоторых случаях практически невозможно. Изучение данного вида лесных пожаров является актуальным, так как информация о механизмах возникновения и развития верховых лесных пожаров может быть использована при разработке новых способов профилактики и борьбы с ними. В [2; 7] возникновения верховых лесных пожаров исследовалось в двумерных постановках: осесимметричной (отсутствие внешнего поля ветра) и плоской (бесконечная длина фронта низового лесного пожара и конечная ширина) случаях. Данные подходы накладывают существенные ограничения на возможность изучения данного явления. В действительности очаг низового лесного пожара имеет конечные размеры, и в силу неоднородности распределения лесных горючих материалов фронт низового

лесного пожара не представляет собой прямую линию бесконечной длины, как это рассматривалось в [2; 6 – 7]. Все эти и другие ограничения можно не вводить, если задачу перехода низового лесного пожара рассматривать в пространственной трехмерной постановке. Согласно [1], возгорание в лесах происходит в нижнем ярусе леса в напочвенном покрове (опавшая хвоя, мхи, лишайники, отмершая трава и т. д.), а затем при определенных условиях огонь охватывает полог леса, то есть возникновение верхового лесного пожара происходит в результате перехода низового лесного пожара в верховой.

Пусть очаг низового пожара имеет конечные размеры и над пологом леса известна скорость ветра. Начало системы координат  $x_1, x_2, x_3 = 0$  связано с очагом низового пожара. Ось  $0x_3$  направлена вверх, а оси  $0x_1$  и  $0x_2$  – параллельно земной поверхности (ось  $x_1$  совпадает с направлением ветра). Схема данного процесса представлена на рис. 1.

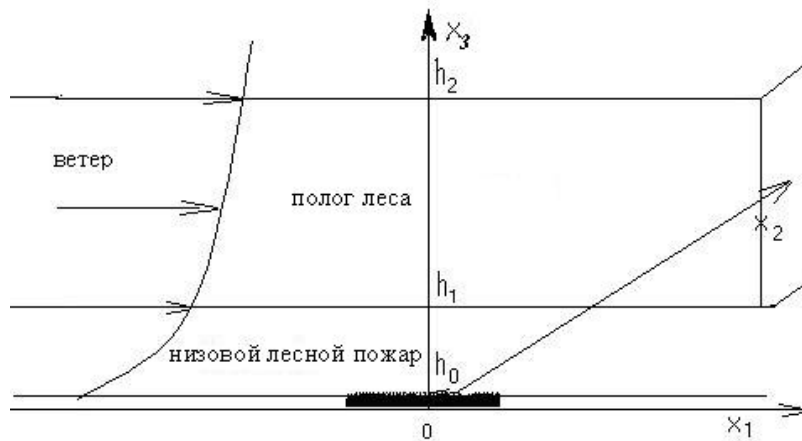


Рис. 1. Схема расчетной области

Предполагается, что:

- 1) течение носит развитый турбулентный характер, и молекулярным переносом пренебрегаем,
  - 2) плотность газовой фазы не зависит от давления из-за малости скорости течения по сравнению со скоростью звука,
  - 3) среда находится в локально-термодинамическом равновесии,
  - 4) известна скорость ветра над пологом леса в невозмущенных условиях,
  - 5) газодисперсная смесь – бинарная – и состоит из частиц конденсированной фазы, а также газовой фазы – компонентов кислорода, газообразных горючих и инертных компонентов.
- Сформулированная выше задача сводится к решению следующей системы уравнений [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j) = \dot{m}, \quad j = 1, 2, 3, \quad i = 1, 2, 3; \quad (1)$$

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

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho c_p \overline{v'_j T'}) + q_5 R_5 - \alpha_v (T - T_s) + k_g (c U_R - 4\sigma T^4); \quad (3)$$

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

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

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

$$\begin{aligned} \rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} &= -R_1, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \quad \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \\ &= \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sum_{\alpha=1}^5 c_\alpha &= 1, \quad p_e = \\ &= \rho RT \sum_{\alpha=1}^5 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \quad \vec{v} = (v_1, v_2, v_3), \quad \vec{g} = (0, 0, g); \end{aligned}$$

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

$$R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5, \quad R_{52} = v_g (1 - \alpha_c) R_1 - R_5,$$

$$R_{53} = 0, \quad R_{54} = \alpha_4 R_1,$$

$$R_{55} = \frac{\alpha_5 v_3}{v_3 + v_{3*}} R_3.$$

Символ  $\frac{d}{dt}$  обозначает полную производную:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial}{\partial x_3}.$$

Скорости реакций пиролиза, испарения влаги, горения кокса и летучих продуктов пиролиза определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} R_1 &= k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right), \\ R_2 &= k_2 \rho_2 \varphi_2 T_s^{-0.5} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_s}\right), \\ R_3 &= k_3 \rho \varphi_3 s_\sigma c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_s}\right), \\ R_5 &= k_5 M_2 \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0.25} \frac{c_2 M}{M_2} T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $R_1 - R_5$ ,  $R_{5\alpha}$  – массовые скорости пиролиза лесных горючих материалов, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза, образования сажи и пепла и образования  $\alpha$  – компонентов газодисперсной фазы;

$c_{pi}$ ,  $\rho_i$ ,  $\varphi_i$  – удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные доли  $i$ -ой фазы (1 – сухое органическое вещество, 2 – вода в жидко-капельном состоянии, 3 – конденсированные продукты пиролиза, 4 – минеральная часть, 5 – газовая фаза);

$T$ ,  $T_s$  – температура газовой и конденсированной фаз;  $c_\alpha$  – массовые концентрации ( $\alpha = 1$  – кислород, 2 – CO, 3 – сажа, 4 – пепел, 5 – инертные компоненты воздуха);

$P$  – давление;

$U_R$  – плотность энергии излучения;

$\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;

$k$  – коэффициент ослабления излучения;

$k_g$ ,  $k_s$  – коэффициенты поглощения для газодисперсной и конденсированной фаз;

$\alpha_V$  – коэффициент обмена фаз;

$q_b$ ,  $E_b$ ,  $k_i$  – тепловые эффекты, энергии активации и предэкспоненты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза;

$s_\sigma$  – удельная поверхность элемента лесных горючих материалов;

$M_\alpha$ ,  $M_c$ ,  $M$  – молекулярные веса индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси;

$s$ ,  $c_d$  – удельная поверхность фитомассы и эмпирический коэффициент полога леса;

$c$  – скорость света;

$v_i$  – проекции скорости на оси  $x_i$ ;

$\alpha_c$ ,  $\nu$  – коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза;

$\dot{m}$  – массовая скорость образования газодисперсной фазы;

$v_{3*}$  – характерная скорость выдува из очага низового лесного пожара;

$\alpha_4$ ,  $\alpha_6$  – эмпирические константы;

$g$  – ускорение свободного падения.

Система уравнений (1) – (7) описывает процессы переноса в области, которая включает в себя пространство между подстилающей поверхностью и нижней границей полога леса, полог леса и пространство над пологом. Термодинамические, теплофизические и структурные характеристики соответствуют лесным горючим материалам (ЛГМ) соснового леса и приведены в [1; 3; 7]. В (2) – (4) содержатся члены, связанные с турбулентной конвекцией, и нуждаются в замыкании. Компоненты тензора турбулентных напряжений, а также турбулентные потоки тепла и массы записываются через градиенты среднего течения согласно [4]. Коэффициент турбулентной динамической вязкости определяется с помощью локально-равновесной модели турбулентности [1].

Считается, что в начальный момент времени параметры состояния среды совпадают с невозмущенными значениями. На нижней границе расчетной области задается температура очага низового лесного пожара и массовая скорость выдува из него. На левой

границе задана скорость. Так как очаг низового пожара размещен в начале системы координат, процесс будет протекать симметрично относительно координатной плоскости  $Ox_1x_3$ , т. е.  $x_{20} = 0$ . С учетом сделанных предположений начальные и граничные условия для системы уравнений (1) – (7) будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} t = 0: v_i = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{\alpha e}, \\ T_s = T_e, \varphi_k = \varphi_{ke}, i = 1, 2, 3; \\ k = 1, 2, 3; \alpha = \overline{1, 5}. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} x_1 = -x_{1e}: v_1 = V_e, \\ v_2 = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_1} = 0, T = T_e, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} c_\alpha = c_{\alpha e}, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + c U_R / 2 = 0; \\ x_1 = x_{1e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_1} = 0, \\ \frac{\partial v_3}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + \frac{c}{2} U_R = 0; \\ x_2 = x_{20}: \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, v_2 = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial U_R}{\partial x_2} = 0; \\ x_2 = x_{2e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} + \frac{c}{2} U_R = 0; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} x_3 = 0: v_1 = 0, v_2 = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_3} = 0, \\ -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_3} + \frac{c}{2} U_R = 0, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} v_3 = v_{30}, T = T_g, |x_1| \leq \Delta, |x_2| \leq \Delta, \\ v_3 = 0, T = T_e, |x_1| > \Delta, |x_2| > \Delta; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_3 = x_{3e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_3} = 0, \\ \frac{\partial v_2}{\partial x_3} = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_3} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_3} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial x_3} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_3} + \frac{c}{2} U_R = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Система уравнений (1) – (7) с соответствующими начальными и граничными условиями, (9) – (15) приведенными выше, для численного интегрирования редуцирована к дискретной форме с помощью метода контрольного объема [5]. Сеточные уравнения, возникающие в процессе дискретизации, разрешались с помощью метода SIP [8]. Алгоритм решения приведенной задачи включает в себя расщепление по физическим процессам, то есть вначале рассчитывалась гидродинамическая картина, а затем решались уравнения химической кинетики и учитывались химические источники для скалярных функций. При этом шаг по времени для интегрирования системы обыкновенных уравнений, возникающих в результате расщепления, выбирался автоматически. Согласование полей скорости и давления осуществлялось итерационным образом в рамках алгоритма SIMPLE [5].

В результате численных расчетов получены поля скорости, распределения массовых концентраций компонент газовой фазы, температур, объемных долей твердой фазы в различные моменты времени. Из

полученных результатов следует, что с течением времени под действием очага низового лесного пожара возрастают температуры газовой и твердой фаз на нижней границе полога леса (рис. 2), происходит прогрев ЛГМ, испарение влаги, уменьшение объемной доли сухого ЛГМ, увеличение количества летучих горючих продуктов пиролиза, уменьшение массовой концентрации кислорода (рис. 3) и уменьшение объемных долей фаз (рис. 4) вблизи очага низового лесного пожара. Под действием очага повышенной температуры в его окрестности происходит прогрев полога леса, испарение влаги и разложение сухого ЛГМ. На рис. 2 – 4 представлено изменение температур газовой и твердой фаз, массовых концентраций газовой фазы и объемных долей фаз с течением времени ( $\bar{t} = t/t_*$ ,  $t_*$  – время формирования очага низового пожара). В результате действия очага низового пожара в пологе леса выделяются летучие горючие продукты пиролиза.

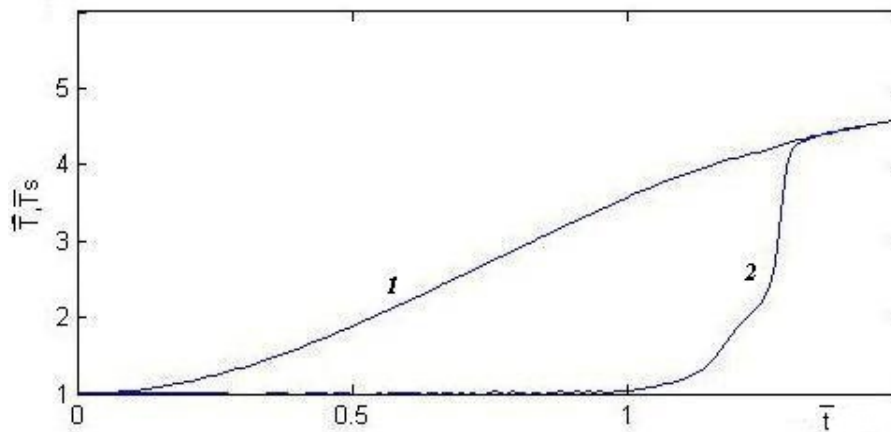


Рис. 2. Температура газовой (1 –  $\bar{T}$ ) и твердой фазы (2 –  $\bar{T}_s$ );  $\bar{T} = T/T_e$ ,  $\bar{T}_s = T_s/T_e$

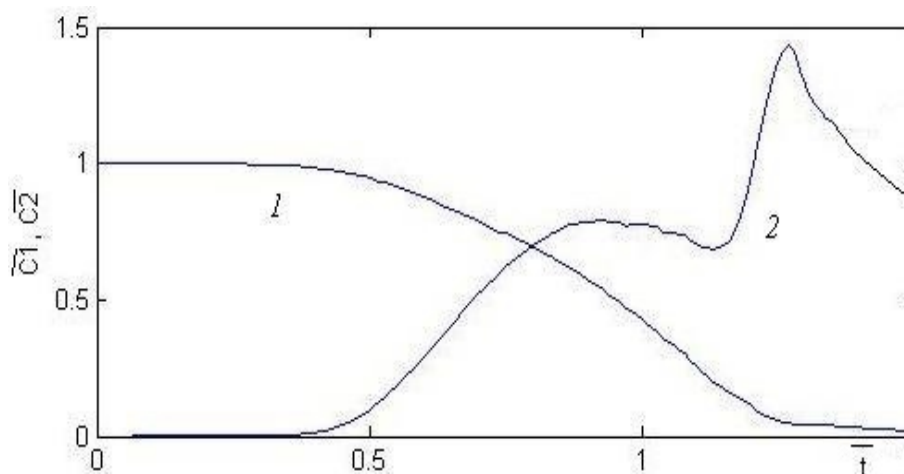


Рис. 3. Массовые концентрации кислорода (1 –  $\bar{C}_1$ ) и летучих горючих продуктов пиролиза (2 –  $\bar{C}_2$ );

$$\bar{c}_\alpha = c_\alpha / c_{1e}, c_{1e} = 0.23$$

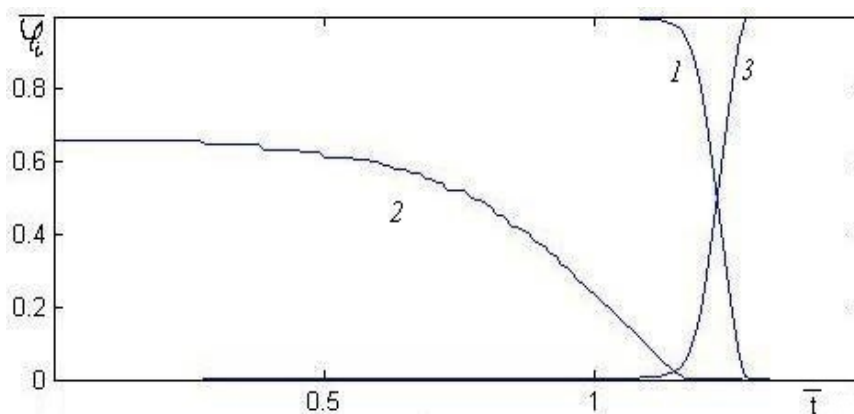


Рис. 4. Изменение объемных долей фаз: 1 –  $\bar{\varphi}_1 = \varphi_1 / \varphi_{1e}$ , 2 –  $\bar{\varphi}_2 = \rho_2 \varphi_2 / \rho_c$ , 3 –  $\bar{\varphi}_3 = \rho_3 \varphi_3 / \alpha_c \rho_1 \varphi_{1e}$ .

Все время процесса температура газовой фазы выше температуры твердой фазы. Это подтверждает, что конвективный механизм передачи энергии преобладает над радиационным. На рис. 5 – 7 (a)-e) представлены распределения температуры, концентраций кислорода и летучих продуктов пиролиза от момента начала пиролиза ( $\bar{t} = 1.0$ ) до воспламенения ( $\bar{t} = 1.5$ ).

Газообразные продукты пиролиза, выделившиеся в результате разложения ЛГМ, воспламеняются в пространстве между пологом леса и напочвенным покровом и происходит их выгорание (снижение концентрации) на нижней границе полога леса. При этом также происходит уменьшение концентрации кислорода. Начиная с момента зажигания, температуры газовой и конденсированной фаз становятся одинаковыми.

Таким образом, в данной работе на основе общей математической модели теории лесных пожаров разработана новая математическая модель перехода низового лесного пожара в верховой в трехмерном (пространственном) случае. Учитывается турбулентность течения, двухтемпературность среды и основные физико-химические процессы (сушка и пиролиз лесных горючих материалов, химические реакции горения газообразных и догорания конденсированных продуктов пиролиза). Анализ результатов численного реше-

ния задачи о переходе низового лесного пожара в верховой показал, что имеют место следующие стадии этого процесса: прогрев напочвенного покрова и полога леса, образование газообразных продуктов пиролиза напочвенного покрова, их воспламенение, образование газообразных продуктов пиролиза полога леса и их зажигание. То есть показано, что при переходе низового лесного пожара в верховой зажигание лесных горючих материалов носит газофазный характер. Установлено, что при воздействии очага низового лесного пожара на полог леса переход низового лесного пожара в верховой имеет место при определенных критических высотах нижней границы полога леса. Количество энергии, которое обеспечивало зажигание, не превосходило  $4500 \text{ кДж/м}^2$ , что подтверждается экспериментальными данными. Причем преобладающим является конвективный перенос энергии. Для наиболее характерных данных, описывающих реакционные и теплофизические свойства сосновых фитоценозов, получены конкретные значения времен и предельные высоты зажигания полога леса. Результаты расчетов показали, что математическое моделирование перехода низового лесного пожара в верховой, без учета двухтемпературности среды, приводит к уменьшению критической высоты полога леса, на которой возможно его воспламенение до 40 %.

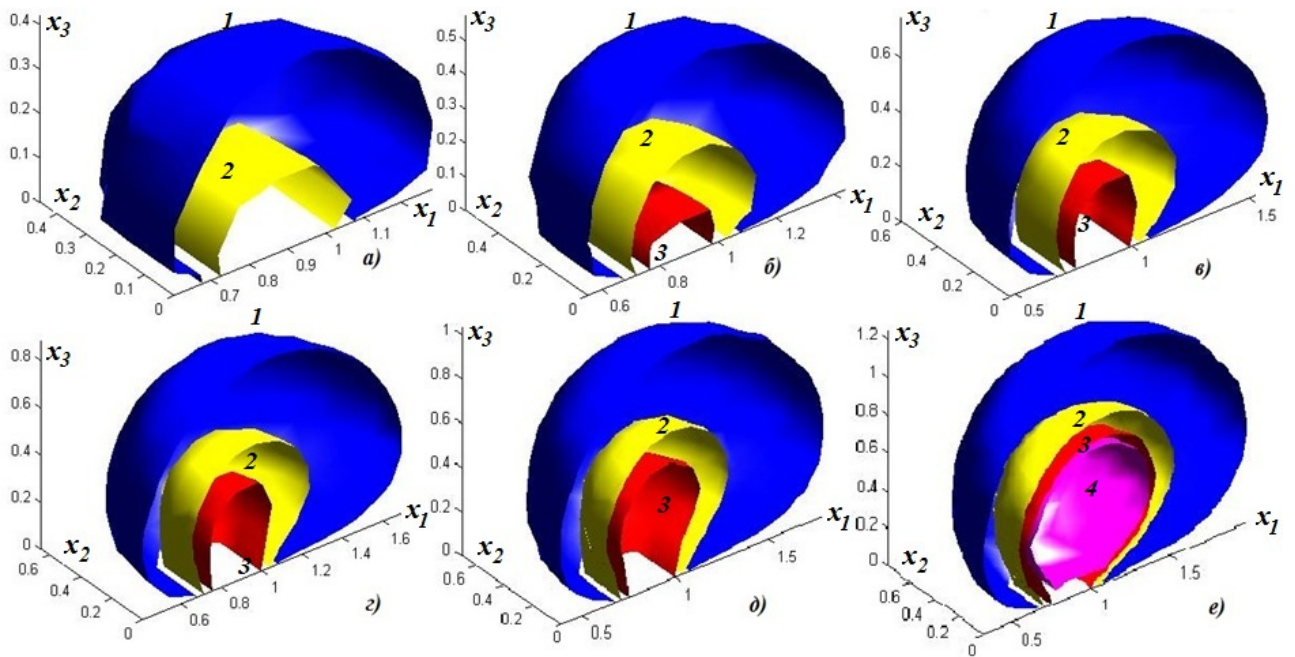


Рис. 5. Распределение изоповерхностей температуры  $\bar{T}$  (1 – 1.1, 2 – 2, 3 – 3, 4 – 4)

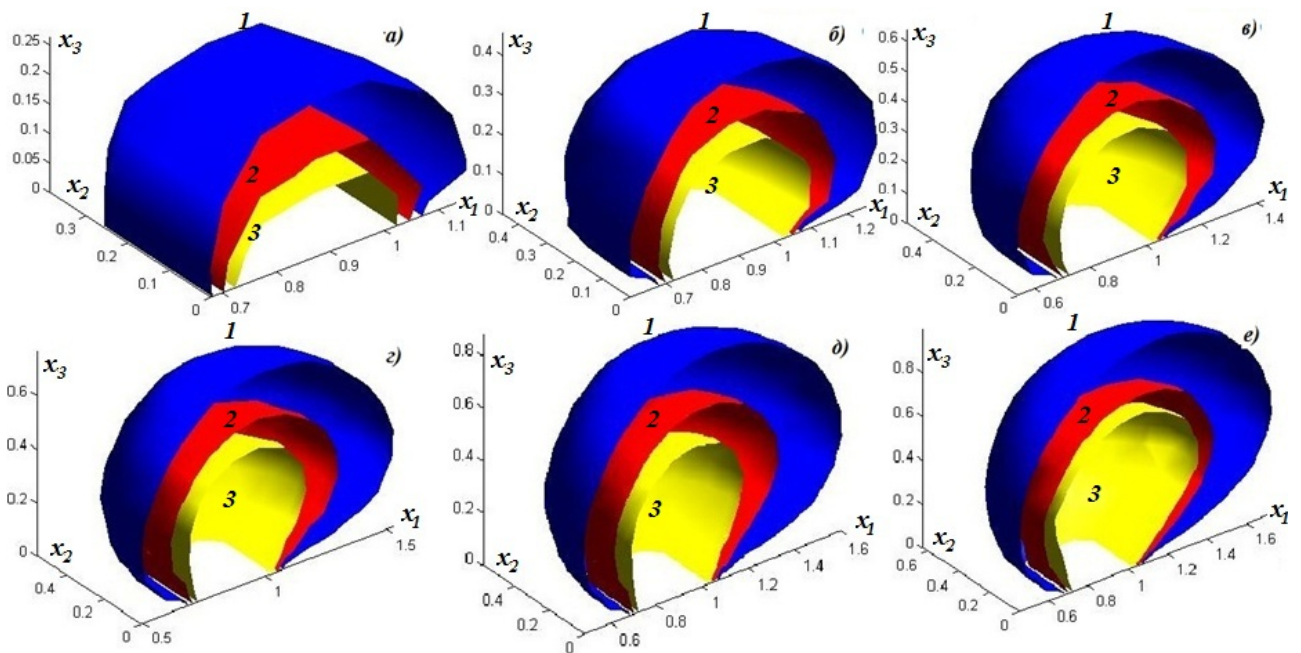


Рис. 6. Распределение изоповерхностей кислорода  $\bar{C}_1$  (1 – 0.9, 2 – 0.7, 3 – 0.5)

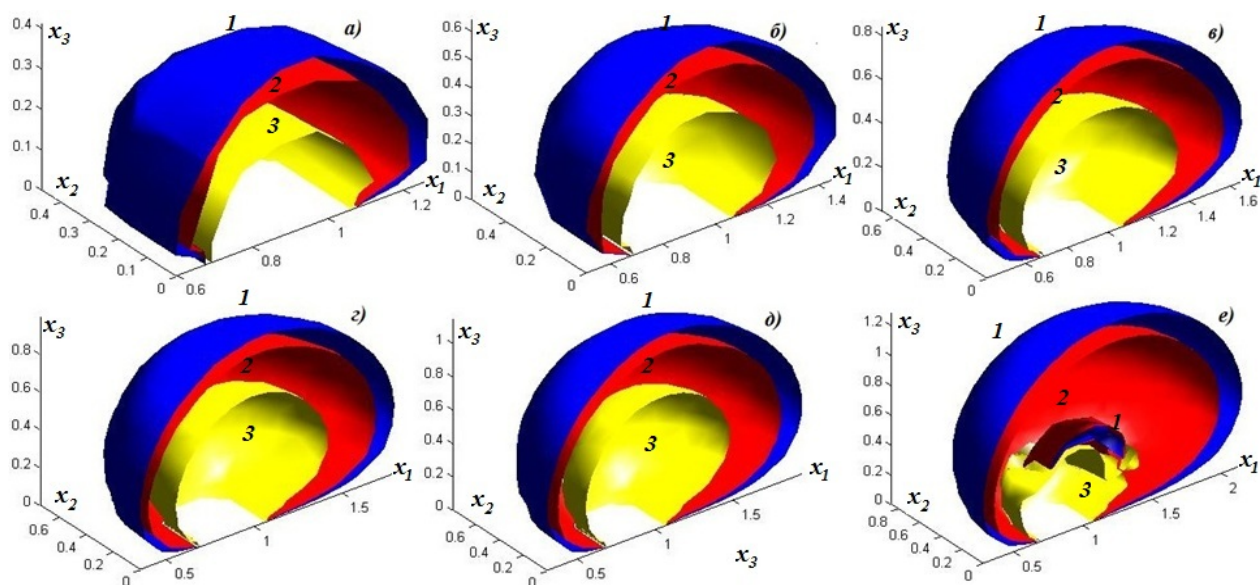


Рис. 7. Распределение изоповерхностей летучих продуктов пиролиза  $\bar{C}_2$  (1 – 0.05, 2 – 0.1, 3 – 0.5)

#### Литература

1. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука. 1992.
2. Гришин А. М., Перминов В. А. Математическое моделирование загорания крон деревьев // ФГВ. 34. 1998. С. 13 – 22.
3. Конев Э. В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука. 1977.
4. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. М.: Наука, 1965. Т. 1.
5. Патанкар С. В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат. 1984.
6. Перминов В. А. Математическое моделирование возникновения и распространения верховых лесных пожаров в осредненной постановке // Журнал технической физики. 85. 2015. С. 24 – 30.
7. 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: ТГУ, 1995. 188 с.
8. Stone H. L. Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations // SIAM Journal of Numerical Analysis. 5. 1968. P. 530 – 558.

#### Информация об авторах:

**Перминов Валерий Афанасьевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности Национального исследовательского Томского политехнического университета, Томск, [p\\_valer@mail.ru](mailto:p_valer@mail.ru).

**Valery A. Perminov** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Ecology and Life Safety, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk.

**Гудов Александр Михайлович** – доктор технических наук, доцент, декан математического факультета КемГУ, заведующий кафедрой ЮНЕСКО по новым информационным технологиям КемГУ, [good@kemsu.ru](mailto:good@kemsu.ru).

**Alexander M. Gudov** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the UNESCO Chair for New Information Technologies, Kemerovo State University.

Статья поступила в редколлегию 26.12.2014 г.