

Математическое моделирование зажигания полога леса от очага низового лесного пожара*

В. А. ПЕРМИНОВ

Беловский институт (филиал)

ГОУ ВПО "Кемеровский государственный университет", Россия

e-mail: p_valer@mail.ru

In the context of the general mathematical model of forest fires, this study gives a new mathematical setting and method of numerical solution of a problem of a forest fire modeling. The boundary-value problem is solved numerically using the method of splitting according to physical processes. Fields of temperature, velocity, component mass fractions, and volume fractions of phases were obtained numerically. In this paper, the assignment and theoretical investigations of the problems of forest fire initiation are carried out.

Наиболее опасны верховые лесные пожары. На их долю приходится большая часть выгоревшей площади. Тушение этого вида пожаров требует больших затрат сил и средств, и в подавляющем большинстве случаев оно малоэффективно или невозможно [1–3]. 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. низовой лесной пожар переходит в верховой. Экспериментальные методы изучения лесных пожаров дорогостоящи и не позволяют проводить полное физическое моделирование данного явления. В этих условиях представляют интерес теоретические методы исследования. Так, метод математического моделирования позволяет адекватно описывать состояние лесного массива и приземного слоя атмосферы при лесных пожарах. Например, на основе численного анализа можно исследовать процесс возникновения и распространения верхового лесного пожара.

В настоящей работе приводятся результаты расчетов возникновения верхового лесного пожара по постановке, полученной на основе общей математической модели пожаров [1]. Пусть начало системы координат $x_1, x_2, x_3 = 0$ находится в центре источника возникновения горения, в очаге низового лесного пожара. Ось Ox_3 направлена вверх, а оси Ox_1 и Ox_2 — параллельно поверхности земли (ось x_1 совпадает с направлением ветра) (рис. 1).

Предполагается, что:

- 1) течение носит развитый турбулентный характер, молекулярным переносом пренебрегаем по сравнению с турбулентным;
- 2) плотность газовой фазы не зависит от давления из-за малости скорости течения по сравнению со скоростью звука;

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-01-96047).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2008.

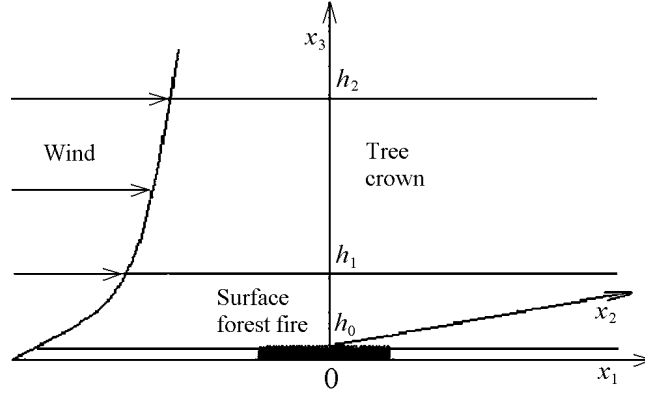


Рис. 1. Расчетная область

- 3) среда находится в локально-термодинамическом равновесии;
 4) известна скорость ветра над напочвенным покровом в невозмущенных условиях;
 5) газодисперсная смесь бинарна и состоит из частиц конденсированной фазы, а также газовой фазы — кислорода, газообразных горючих и инертных компонентов.

Сформулированная выше задача сводится к решению следующей системы уравнений:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Здесь символом $\frac{d}{dt}$ обозначена полная производная.

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 будут иметь следующий вид:

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

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

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

$$x_2 = 0 : \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, v_2 = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + \frac{c U_R}{2} = 0; \quad (11)$$

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

$$x_3 = 0 : v_1 = 0, v_2 = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_3} = 0, -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_3} + \frac{c U_R}{2} = 0,$$

$$v_3 = v_{30}, T = T_g \text{ при } |x_1| \leq \Delta, |x_2| \leq \Delta \text{ и } v_3 = 0, T = T_e \text{ при } |x_1| > \Delta, |x_2| > \Delta; \quad (13)$$

$$x_3 = x_{3e} : \frac{\partial v_1}{\partial x_3} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_3} = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_3} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_3} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_3} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_3} + \frac{c U_R}{2} = 0. \quad (14)$$

Значения функций в очаге зажигания на нижней границе расчетной области задаются в формуле (13) в зависимости от времени; $R_1, R_2, R_3, R_5, R_{5\alpha}$ — 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 зажигания; $c_{pi}, \rho_i, \varphi_i$ — 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 и T_s — температура 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 и 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 и c_d — удельная поверхность фитомассы и эмпирический коэффициент сопротивления полого леса; c — скорость света; v_i — проекции скорости на оси x_i ; α_c и ν_g — 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. Штрихом обозначена пульсационная составляющая данной величины.

Термодинамические, теплофизические и структурные характеристики соответствуют лесным горючим материалам соснового леса и приведены в [1]. Турбулентные потоки тепла массы и количества движения записываются через градиенты среднего течения. 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.

Таким образом, совокупность уравнений (1)–(7) является балансовыми соотношениями массы, энергии и количества движения, представляющими собой постановку задачи, решение которой позволяет определить характеристики сложного взаимосвязанного процесса возникновения лесного пожара.

Система уравнений (1)–(7) с начальными и граничными условиями (8)–(14) для численного интегрирования редуцирована к дискретной форме с помощью метода контрольного объема Патанкара — Сполдинга [4]. Сеточные уравнения, возникающие в процессе дискретизации, решались с помощью метода SIP. 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. Шаг по времени для интегрирования системы обыкновенных уравнений выбирался автоматически. Согласование полей скорости и давления осуществлялось итерационным методом в рамках алгоритма SIMPLE [3, 4].

На основе изложенной математической постановки (1)–(14) 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 компонентов газовой фазы, температур, объемных долей компонентов твердой фазы в различные моменты времени. Из полученных данных следует, что с течением времени возрастают температуры газовой и твердой фаз, происходит уменьшение массовой концентрации кислорода и изменение количества горючих продуктов пиролиза и объемных долей фаз на нижней границе полога леса вблизи очага горения. В результате воздействия очага повышенной температуры в его окрестности происходят прогрев полога леса, испарение влаги и разложение сухого ЛГМ. В результате этого в пологе леса выделяются летучие горючие продукты пиролиза. Во все время процесса температура газовой фазы выше температуры твердой фазы. Газообразные продукты пиролиза, выделившиеся в результате разложения ЛГМ, воспламеняются в пространстве между пологом леса и напочвенным покровом. При этом также происходит уменьшение концентрации кислорода. Начиная с момента зажигания температуры газовой и конденсированной фаз становятся одинаковыми, т. е. полученные результаты показывают, что процесс зажигания носит многостадийный характер.

Таким образом, под воздействием очага повышенной температуры воспламеняется полог леса. В процессе прогрева под воздействием архимедовой силы и ветра происходят всплытие и перенос в горизонтальном направлении нагретых газов и продуктов пиролиза и горения из очага горения по направлению ветра. На рис. 2 и 3 представлены

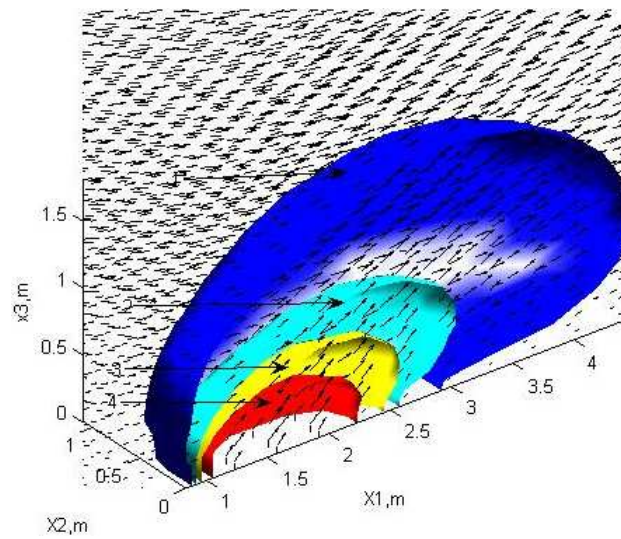


Рис. 2. Распределение поля скорости и поверхностей равной температуры ($t = 3$ с)

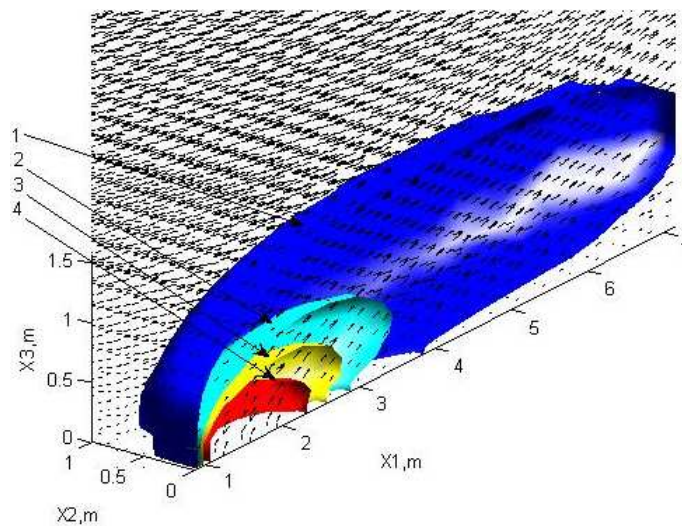


Рис. 3. Распределение поля скорости и поверхностей равной температуры ($t = 5$ с)

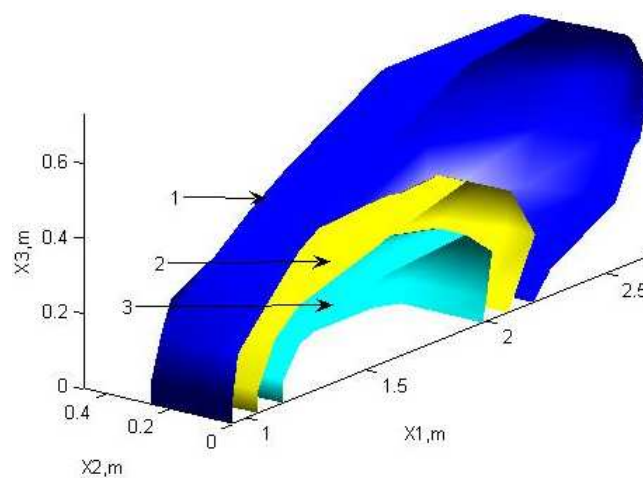


Рис. 4. Распределение поверхностей равной массовой концентрации кислорода ($t = 3$ с)

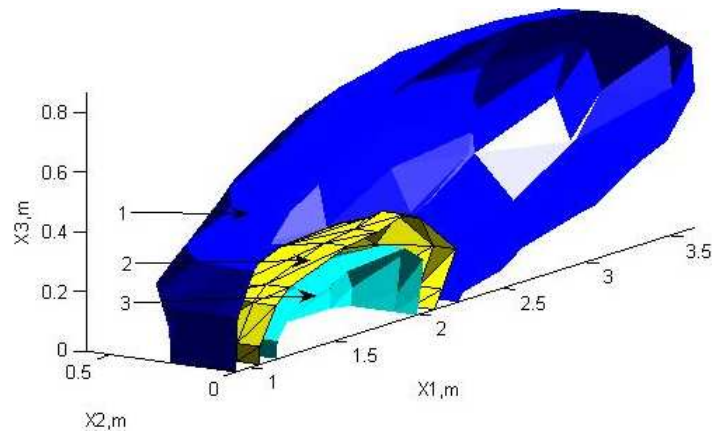


Рис. 5. Распределение поверхностей равной массовой концентрации кислорода ($t = 5$ с)

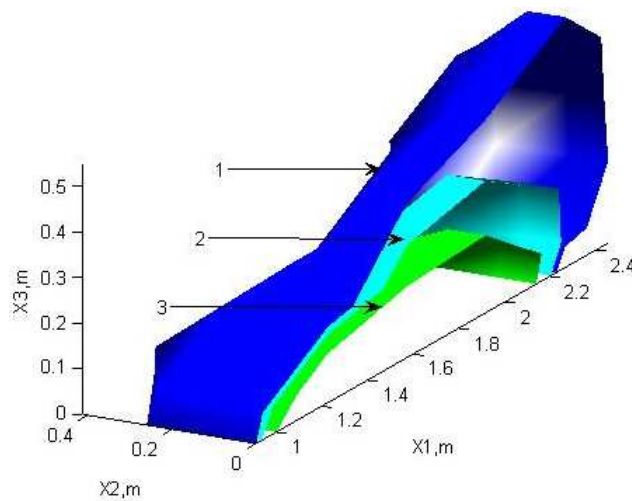


Рис. 6. Распределение поверхностей равной концентрации летучих продуктов пиролиза ($t = 0.3$ с)

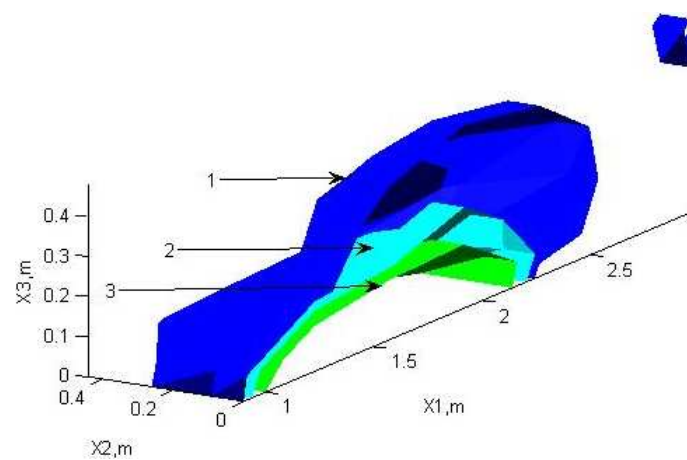


Рис. 7. Распределение поверхностей равной концентрации летучих продуктов пиролиза ($t = 0.5$ с)

распределения поверхностей равной температуры (изоповерхностей) ($1 - \bar{T} = 1.1$, $2 - \bar{T} = 1.5$, $3 - \bar{T} = 2.0$, $4 - \bar{T} = 3.0$) газовой фазы в различные моменты времени ($t = 3$ с и $t = 5$ с соответственно), а также векторные поля скорости в области воспламенения полога леса от очага горения. Видно, что в результате воздействия очага низового лесного пожара произошло воспламенение полога леса и область горения продвинулась вглубь. Кроме того, видно, что с течением времени за счет зоны горения происходит прогрев полога леса в вертикальном и в большей степени в горизонтальном направлениях, в результате чего происходит сушка и начинается процесс пиролиза ЛГМ, тем самым будет обеспечиваться дальнейшее распространение лесного пожара по пологу леса.

На рис. 4 и 5 представлено распределение в области горения поверхностей равной концентрации кислорода в моменты времени $t = 3$ и $t = 5$ с ($1 - \bar{C}_1 = 0.9$, $2 - 0.5$, $3 - 0.2$). В результате уменьшается массовая концентрация кислорода, который расходуется на окисление (горение) летучих горючих продуктов пиролиза.

Распределение в различные моменты времени поверхностей равной массовой концентрации летучих продуктов пиролиза (в первую очередь это СО), которые распространяются по направлению ветра, представлено на рис. 6 и 7 ($1 - \bar{C}_2 = 0.3$, $2 - 0.5$, $3 - 1.0$). Из рисунков следует, что под воздействием очага низового лесного пожара формируется область горения, которая в дальнейшем может распространяться по лесному массиву. Полученные численные результаты согласуются с данными, приведенными в [1–3], и экспериментальными исследованиями [5, 6].

Список литературы

- [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 зажигания крон деревьев // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 4. С. 13–22.
- [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] ПАТАНКАР С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984.
- [5] 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.
- [6] КОНЕВ Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977.

Поступила в редакцию 28 марта 2008 г.