

**ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАСПРОСТРАНЕНИИ
ВЕРХОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА В СОПРЯЖЕННОЙ ПОСТАНОВКЕ**

Е.С. Хапова

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. В.А. Перминов
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: ekaterinakhapova@mail.ru

**NUMERICAL SOLUTION OF CROWN FOREST FIRE SPREAD PROBLEM
IN CONJUGATE SETTING**

E.S.Hapova

Scientific Supervisor: Prof., Dr. V.A. Perminov
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: ekaterinakhapova@mail.ru

This paper presents the conjugate formulation of the problem of the crown forest fire spread. It is taken into account the mutual influence of the combustion zone and the atmospheric boundary layer. The turbulent flows as well as physical and chemical processes of the forest canopy are considered. Discrete analogue obtained by finite volume method. The using of method of splitting into physical processes reduces the computing time for solving the problem. The distributions of the key functions in the area under consideration at different times allow to explore the spread of crown forest fire depending on the meteorological conditions and the characteristics of the forest (forest bulk and the moisture content of combustible materials, the presence of heterogeneities - roads, glades, etc.)

Лесной пожар – это стихийное, неуправляемое явление. В зависимости от того, где распространяется огонь, пожары делятся на низовые, верховые и подземные. В результате лесных пожаров ежегодно в Российской Федерации гибнет около 1 млн. га леса. Возникновение и распространение лесных пожаров зависит от различных условий: метеорологических: скорости ветра, температуры окружающей среды, состояния атмосферы, рельефа местности и других факторов. Наиболее опасным видом пожаров являются верховые. В этом случае горению подвержена крона деревьев. На долю данного вида пожаров приходится до 70% выгоревшей площади. В связи с тем, что экспериментальные исследования верховых лесных пожаров являются очень трудоемкими и дорогостоящими, представляет интерес использование методов математического моделирования. Считается, 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 лесным массивом в невозмущенных условиях,
- 5) газодисперсная смесь бинарна и состоит из частиц конденсированной фазы, а также газовой фазы - компонентов кислорода, газообразных горючих и инертных компонентов.

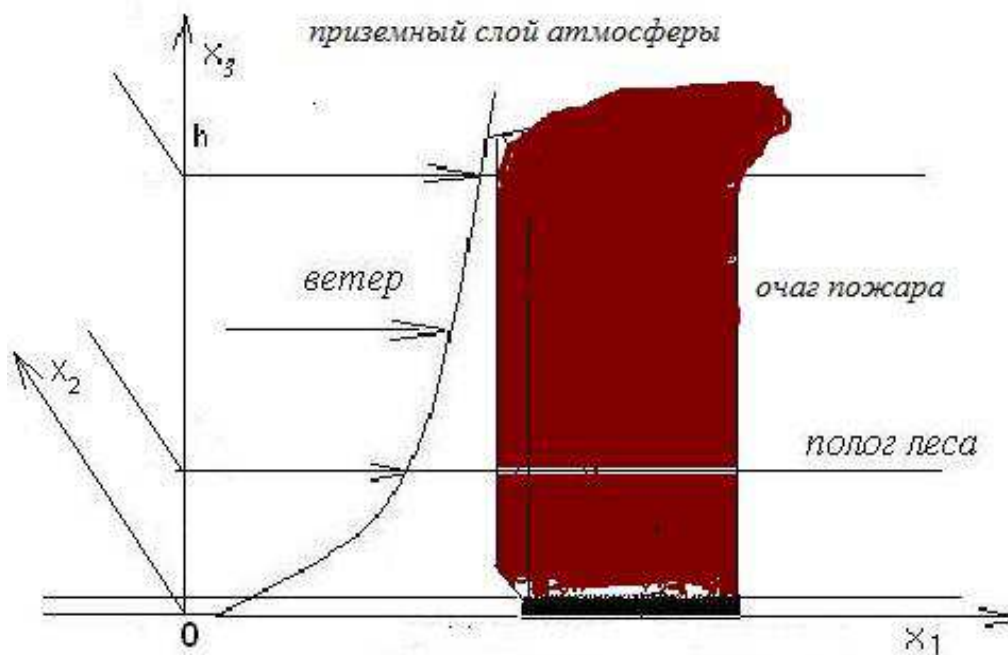


Рис. 1. Схема расчетной области

В данной работе, в отличие от [1] предлагается постановка задачи, в которой используются две системы уравнений для приземного слоя атмосферы и лесного массива. Это позволяет существенно сократить компьютерное время счета. Так как вертикальные размеры лесного массива значительно меньше горизонтальных, трехмерная система дифференциальных уравнений, описывающая процессы тепломассопереноса в лесном массиве [1, 2], может быть проинтегрирована по вертикальной координате x_3 . То есть, рассматриваемая задача сводится к решению двумерной нестационарной системы дифференциальных уравнений. Приводя основную систему уравнений к дивергентному виду, проинтегрируем по высоте от напочвенного покрова до уровня верхней границы полога леса. Для описания процессов в приземном слое атмосферы будет использоваться система уравнений Рейнольдса для турбулентного реагирующего течения.

Сформулированная выше задача сводится к решению следующей системы уравнений:

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

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

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

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

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

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

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

$$\sum_{\alpha=1}^5 c_{\alpha} = 1, p_e = \rho RT \sum_{\alpha=1}^5 \frac{c_{\alpha}}{M_{\alpha}}, \vec{v} = (v_1, v_2, v_3), \vec{g} = (0, 0, g), \dot{m} = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3 + R_{53} + R_{64},$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5, R_{52} = \nu(1 - \alpha_c) R_1 - R_5, R_{53} = \alpha_6 R_1, R_{54} = \frac{\alpha_4 v_{3*}}{v_3 + v_{3*}} R_3, R_{55} = 0,$$

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

$$R_3 = k_3 \rho_3 s_{\sigma} c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_s}\right), R_5 = k_5 M_2 \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0.25} \frac{c_2 M}{M_2} T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right).$$

где x_i – координаты (рис.1); v_i – проекции скорости на оси x_i . Система уравнений (1) – (7) описывает процессы переноса в области лесного массива, который включает в себя пространство между подстилающей поверхностью и нижней границей полого леса, полог леса, и пространство над пологом. В нашей постановке мы будем рассматривать две отдельные системы уравнений, полученные из системы уравнений (1)–(7) для полого леса и приземного слоя атмосферы. Термодинамические, теплофизические и структурные характеристики соответствуют лесным горючим материалам соснового леса [1-3] обозначения и численные значения приведены в работах [1,2].

Система уравнений (1)-(7) с соответствующими начальными и граничными условиями, приведенными выше, для численного интегрирования редуцирована к дискретной форме с помощью метода контрольного объема Патанкара-Сполдинга [3]. Сеточные уравнения, возникающие в процессе дискретизации, разрешались с помощью метода *SIP* [2]. Алгоритм решения приведенной задачи включает в себя расщепление по физическим процессам, то есть вначале рассчитывались параметры, характеризующие течение смеси реагирующих газов, а затем решались уравнения химической кинетики и учитывались химические источники для скалярных функций. При этом шаг по времени для интегрирования системы обыкновенных уравнений выбирался автоматически, что позволяло корректно учесть процессы химических преобразований. Шаг в последнем случае уменьшался. Согласование полей скорости и давления осуществлялось итерационным образом в рамках алгоритма SIMPLE [3].

На основе изложенной математической постановки проводились численные расчеты по определению картины процесса возникновения и распространения верхового лесного пожара в результате зажигания полого леса от заданного очага горения. В результате численного интегрирования получены поля массовых концентраций компонент газовой фазы, температур, объемных долей компонентов твердой фазы в различные моменты времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. - Новосибирск: Наука, 1992. – 408 с.
2. Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения верховых и массовых лесных пожаров: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. – Томск, 2011. – 39 с.
3. Патанкар С.В. Численные метода решения задач теплообмена и динамики жидкости. -М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.