О КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОЖАРОВ, ОБРАБОТКЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Д.В. Баровик, В.И. Корзюк, В.Б. Таранчук (Минск, Беларусь)

Лесным пожаром называется явление неуправляемого многостадийного горения в открытом пространстве на покрытой лесом площади, когда имеют место взаимосвязанные процессы конвективного и радиационного переноса энергии, нагревания, сушки и *пиролиза лесных горючих материалов* (ЛГМ), а также *горение газообразных и догорание* конденсированных продуктов пиролиза ЛГМ. При математическом моделировании пожаров на территории, покрытой лесом, обычно принимают во внимание достаточно большой контрольный объем среды – зону пожара, внутри которой параметры состояния среды в результате обусловленных пожаром физико-химических превращений отличаются от невозмущенных значений, определяемых погодными условиями и типом растительности. Наиболее сильное изменение параметров состояния среды происходит в части зоны, называемой фронтом пожара. При лесных пожарах имеет место эффект задымленности территорий, возможно образование облаков над зоной пожара в результате конденсации водяного пара, образующегося при сгорании ЛГМ. Физико-химические процессы в зоне лесного пожара и тепло- и массоперенос в приземном слое атмосферы включают (см., например, [1, 2]) прогрев, сушку, пиролиз ЛГМ, сгорание продуктов пиролиза; подъем продуктов горения с возможными конденсацией и выпадением осадков, а, с другой стороны, с возможными коагуляцией, седиментацией частиц. При математическом описании [1] будем считать, что лес в процессе пожара представляет собой многофазную многоярусную пористо-дисперсную пространственно-неоднородную среду, которая состоит из сухого органического вещества (объемная доля φ_1), воды в жидко-капельном состоянии (φ_2), связанной с этим веществом конденсированного продукта *пиролиза (коксика,* φ_3), *конденсированного продукта горения коксика (пепла,* φ_4), газовой фазы (φ_5), дисперсных частиц сажи (φ_6), золы (φ_7), капель воды (φ_8) над очагом лесного пожара. Примем, что элементы ЛГМ (тонкие веточки, хвоинки, листва) имеют одну температуру, а газовая и дисперсная фазы – другую; под влиянием ветра элементы среды колеблются, а эффект колебаний этих элементов (аэроупругость среды) сказывается только на значениях силы сопротивления и коэффициентов тепло- и массообмена элементов ЛГМ с газовой фазой, т. е. среда считается квазитвердой (почти недеформирующейся при порывах ветра). Тепловая энергия, выделившаяся во фронте пожара в результате свободной и вынужденной конвекции и излучения, передается ЛГМ, которые нагреваются, высушиваются и затем разлагаются на газообразные горючие и инертные продукты пиролиза и конденсированный горючий продукт пиролиза (коксик), после чего газообразные и конденсированные продукты сгорают, и процесс повторяется сначала. Над фронтом пожара имеет место конвективная колонка, которая возникает в результате свободной конвекции и содержит большое количество паров воды. Последние могут конденсироваться с образованием капель воды в верхних, относительно более холодных слоях атмосферы над зоной пожара.

Для упрощения полной системы уравнений тепло- и массопереноса в зоне лесного пожара [1] ниже рассматривается двухфазная модель пожаров в одном ярусе леса [2]. Система уравнений двумерной двухфазной модели для яруса, полученная интегрированием по высоте слоя ЛГМ исходной трехмерной системы осредненных по Рейнольдсу уравнений газовой динамики при сформулированных упрощениях, может быть записана в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho \nu}{\partial y} = Q - J_p, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + \varphi p)}{\partial x} + \frac{\partial \rho u \nu}{\partial y} = 2\rho\omega_s \nu - \rho c_d s u|V| + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + p\frac{\partial \varphi}{\partial x} - J_u, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho \nu}{\partial t} + \frac{\partial \rho u \nu}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \nu^2 + \varphi p)}{\partial y} = -2\rho\omega_s u - \rho c_d s \nu|V| + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + p\frac{\partial \varphi}{\partial y} - J_\nu, \tag{3}$$

$$\begin{gathered}\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u E + \varphi p u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \nu E + \varphi p \nu)}{\partial y} = -J_E + \frac{\partial}{\partial x}\Big(K_\zeta \frac{\partial T}{\partial x}\Big) + \\ + \frac{\partial}{\partial y}\Big(K_\zeta \frac{\partial T}{\partial y}\Big) + p\sum_{j=1}^{m} \frac{\partial R_{\varphi_j}}{\partial \rho_j} + \alpha(T_1 - T) + \kappa\sigma(T_1^4 - T^4) + Q_T - 2\sigma T^4,\end{gathered} \tag{4}$$

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial \rho u C}{\partial x} + \frac{\partial \rho \nu C}{\partial y} = R_C - J_C + \frac{\partial}{\partial x}\Big(\rho D_C \frac{\partial C}{\partial x}\Big) + \frac{\partial}{\partial y}\Big(\rho D_C \frac{\partial C}{\partial y}\Big), \tag{5}$$

$$p = \frac{\rho R T}{\varphi}\sum_{i=1}^{m} \frac{C_i}{M_i}, \quad R = (\gamma - 1)c_\nu, \quad K_\zeta = c_\nu(k_T + k) + \frac{16\sigma l_\zeta T^3}{3}, \tag{6}$$

$$\rho_j \frac{\partial \varphi_j}{\partial t} = R_{\varphi_j}, \quad j = 1, \dots, m, \tag{7}$$

$$\sum_{j=1}^{m} \rho_j \varphi_j c_{\nu j} \frac{\partial T_1}{\partial t} = -p\sum_{j=1}^{m} \frac{R_{\varphi_j}}{\rho_j} - \alpha(T_1 - T) - \kappa\sigma(T_1^4 - T^4) + Q_{T_1}, \tag{8}$$

$$\varphi + \sum_{j=1}^{m} \varphi_j = 1, \quad \sum_{i=1}^{n} C_i = 1, \quad \sum_{i=1}^{n} R_i = Q, \quad \sum_{i=1}^{n} R_{\varphi_j} = -Q. \tag{9}$$

Уравнения (1)–(6) описывают изменения газовой фазы, (7), (8) – твердой, (9) – нормировочные и балансные соотношения. Начальные и граничные условия получаются из условий, приведенных в [1], после осреднения по высоте яруса.

Система уравнений (1)–(9) решалась численно с применением метода расщепления по физическим процессам, явных конечно-разностных аппроксимаций. При построении разностных аппроксимаций на основе схемы расщепления основную трудность представляет реализация первого этапа – выбор аппроксимации, обеспечивающей достаточно точный расчет приближенного решения нелинейных уравнений переноса. Для их аппроксимации применяется явная разностная схема на двухточечном ориентированном по направлению потока шаблоне [4]. Алгоритмы численного решения системы реализованы в среде КТС *Mathematica*. В КТС *Mathematica* также разработан программный сервис визуализации: двумерная и трехмерная графика [5, 6] с поддержкой вывода контуров, зон поражения, границ облаков тяжелых углеводородов, фронтов низового и верхового пожаров, изолиний рассчитываемых цифровых полей (распределений температуры, давления газа, концентраций компонентов газовой фазы, частиц дыма, сажи, капелек воды и др.), векторных полей скоростей, когда каждая стрелка в соответствующей точке прорисовывается сонаправленной с вектором скорости потока, а ее длина пропорциональна величине скорости.

Литература

1. Гришин А.М. *Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения* // Успехи механики. 2002. № 4. С. 41–89.

2. Кулешов А.А. *Математическое моделирование в задачах промышленной безопасности и экологии* // Информационные технологии и вычислительные системы. 2003. № 4. С. 56–70.

3. Нигматулин Р.И. *Динамика многофазных сред.* М.: Наука, 1987.

4. Таранчук В.Б., Чудов Л.А. *Численное моделирование процессов двухфазной многокомпонентной фильтрации* // Современные проблемы и математические методы теории фильтрации. М.: Наука, 1987. С. 184–194.

5. Морозов А.А., Таранчук В.Б. *Программирование задач численного анализа в системе Mathematica*: Учеб. пособие. – Минск: БГПУ, 2005.

6. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. *Библиотека модулей визуализации научных данных в системе Mathematica* // Информатизация образования. 2007. № 2. С. 24–31.