

О КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОЖАРОВ В КЛИЕНТ-СЕРВЕРНОЙ АРХИТЕКТУРЕ РАСЧЕТОВ, ОБРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ (Часть 1)

Д.В. Баровик, В.И. Корзюк, В.Б. Таранчук
Беларусь, г. Минск

Приведены рассматриваемая математическая модель и некоторые алгоритмические особенности ее реализации в среде системы Mathematica. Обсуждаются состав и требования к сервису программного комплекса для моделирования лесных пожаров и визуализации результатов.

Основные понятия теории лесных пожаров. 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. Лесные пожары распространяются в результате горения лесных горючих материалов, к которым относятся природные углеводородные топлива, в частности: веточки, хвоинки, листья в кронах деревьев и опавшие на землю, а также напочвенный покров (трава, кустарники, мох, лишайник), болотные растения и торф. В результате горения лесных горючих материалов образуются конечные продукты горения – зола и недожог (совокупность недогоревших лесных горючих материалов, которые обогащены углеродом). Над очагом лесного пожара возникает конвективная колонка – струя нагретых продуктов сгорания ЛГМ (частицы сажи и золы в виде дыма).

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. Поверхность, отделяющая фронт от несгоревших ЛГМ, называется внешней кромкой фронта лесного пожара. Ее проекция на подстилающую поверхность называется контуром лесного пожара. Внешняя кромка, распространяющаяся по ветру, называется передней, а против ветра – задней кромкой фронта лесного пожара.

Изменения химического состава и агрегатного состояния в зоне лесного 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, листья) 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.

Двухфазная двухтемпературная модель лесных пожаров. Для упрощения полной системы уравнений тепло- и массопереноса в зоне лесного пожара ([1]) ниже рассматривается двухфазная модель пожаров в одном ярусе леса ([2]), на основе которой при необходимости можно составить многоярусную модель, записав систему уравнений для каждого яруса леса с заданием коэффициентов и начальных значений параметров, а также, определив члены, описывающие обмен веществом, импульсом и энергией между ярусами. В рассматриваемой ниже модели лес представляется как однослойная двухфазная среда, состоящая из воздуха и газообразных продуктов пиролиза и горения (газовая фаза) и из лесных горючих материалов и твердых пиролиза и горения ЛГМ (твердая фаза). В физико-математической модели двухфазной гетерогенной смеси имеем двухкомпонентный континуум с движением фаз и с межфазным обменом массой, импульсом и энергией ([3]); газовая фаза является многокомпонентной средой, состоящей из горючих газов (CO , H_2 , CH_4 и др.), негорючих газов (CO_2 , N_2 и др.), дисперсной сажи и окислителя (O_2). Считается, что частицы дисперсной сажи движутся вместе с газовой фазой, при сгорании сажи процесс теплообмена проходит быстро и можно рассматривать температуру газовой фазы. Твердая фаза также является многокомпонентной состоящей из ЛГМ, продукта пиролиза ЛГМ - коксика и золы.

Система уравнений двумерной двухфазной модели для яруса ([2]), полученная интегрированием по высоте слоя ЛГМ исходной трехмерной системы осредненных по Рейнольдсу уравнений газовой динамики при сформулированных упрощениях, может быть записана в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = Q - J_p, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + \varphi p)}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} = 2\rho\omega_y v - \rho c_{\varphi} s u |V| + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + p \frac{\partial \varphi}{\partial x} - J_u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho uv}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v^2 + \varphi p)}{\partial y} = -2\rho\omega_x u - \rho c_{\varphi} s v |V| + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + p \frac{\partial \varphi}{\partial y} - J_v, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u E + \varphi p u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v E + \varphi p v)}{\partial y} = -J_E + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{\varphi} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{\varphi} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\ + p \sum_{j=1}^m \frac{R_{\varphi j}}{\rho_j} + \alpha(T_i - T) + \kappa\sigma(T_i^4 - T^4) + Q_T - 2\sigma T^4, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial \rho u C}{\partial x} + \frac{\partial \rho v C}{\partial y} = R_C - J_C + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_C \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_C \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (5)$$

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

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

$$\sum_{j=1}^m \rho_j \varphi_j c_{\varphi j} \frac{\partial T}{\partial t} = -p \sum_{j=1}^m \frac{R_{\varphi j}}{\rho_j} - \alpha(T_i - T) - \kappa\sigma(T_i^4 - T^4) + Q_T, \quad (8)$$

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

Уравнения (1 - 6) описывают изменения газовой фазы, (7 - 8) - твердой, (9) - нормировочные и балансные соотношения. Приняты обозначения: t - время; x, y - декартовы координаты; ρ, p, T, E, V - парциальная плотность, давление, температура, полная энергия и скорость газовой фазы; φ - объемная доля газовой фазы; Q - скорость поступления вещества в газовую среду за счёт процессов в твердой фазе; Q_T - тепловыделение в газовой фазе; J_p, J_C, J_u, J_v, J_E - поток вещества, импульса и энергии на верхней и нижней границах слоя ЛПМ; $C_1, C_2, \dots, C_n$ - массовые концентрации компонент газовой фазы; $R_1, R_2, \dots, R_n$ - скорость изменения концентрации за счет химических реакций; D_C - коэффициент турбулентной диффузии; M_i - молекулярная масса i -ой компоненты; (6) - уравнение состояния газовой фазы, R - универсальная газовая постоянная, γ - показатель адиабаты; $\varphi_j, j = 1, \dots, m$ - объемные доли компонентов твердой фазы (определены выше); $\rho_j, j = 1, \dots, m$ - истинные плотности компонентов твердой фазы $\rho_j = \text{const}$; $c_{\varphi j}, j = 1, \dots, m$ - теплоемкости компонентов

твердой фазы; $R_{\varphi_j}, j=1, \dots, m$ – скорость изменения объемной доли φ_j ; T_i – температура твердой фазы; Q_{τ} – тепловыделение в твердой фазе; ω_z – угловая скорость вращения Земли; c_d – эмпирический коэффициент сопротивления растительности; s – удельная поверхность ЛПМ; k – коэффициент молекулярной теплопроводности в газе; k_T – коэффициент турбулентной теплопроводности; $\kappa\sigma(T_1^4 - T^4)$ – обмен лучистой энергией между твердой и газовой фазами; κ – коэффициент поглощения излучения; $\alpha(T_i - T)$ – межфазный теплообмен; α – коэффициент теплообмена; τ – тензор турбулентных вязких напряжений, $\tau_{ij} = \nu_t(\partial V_i/\partial x_j + \partial V_j/\partial x_i)$, ν_t – коэффициент турбулентной вязкости; σ – постоянная Стефана-Больцмана; l_c – характерное расстояние между элементами ЛПМ.

Начальные и граничные условия получаются из условий, приведенных в ([1]), после осреднения по высоте яруса.

Схема численного решения методом расщепления. Система уравнений (1) – (9) решалась численно с применением метода расщепления по физическим процессам, явных конечно-разностных аппроксимаций. А именно, решение рассматриваемой системы на любом временном интервале $[t_n, t_{n+1}]$ определяется поэтапно. На каждом из этапов рассчитывается часть исходной системы уравнений, описывающая тот или иной физический процесс, а начальными данными служат решения, полученные на предыдущем этапе. Все входящие в уравнения коэффициенты вычисляются на временном слое t_n и уже рассчитанном промежуточном. Система расщепляется на следующие составляющие:

1 этап. Перенос газовой фазы:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial G(F)}{\partial x} + \frac{\partial H(F)}{\partial y} = 0, \quad (10)$$

$$F = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \\ \rho C \end{pmatrix}, \quad G(F) = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + R\rho T \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{M_i} \\ \rho uv \\ \rho uE + R\rho uT \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{M_i} \\ \rho uC \end{pmatrix}, \quad H(F) = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + R\rho T \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{M_i} \\ \rho vE + R\rho vT \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{M_i} \\ \rho vC \end{pmatrix}.$$

2 этап. Учет изменения импульса и энергии за счет расширения трубки тока:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} = p^n \frac{\partial \varphi^n}{\partial x}, \quad \frac{\partial \rho v}{\partial t} = p^n \frac{\partial \varphi^n}{\partial y}, \quad \frac{\partial \rho E}{\partial t} = p^n \sum_{j=1}^n \frac{R_{\varphi_j}}{\rho_j}. \quad (11)$$

3 этап. Учет выбывания субстанции на верхней границе:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = -J_F \quad (12)$$

$$u = \frac{\rho u}{\rho}, v = \frac{\rho v}{\rho}, E = \frac{\rho E}{\rho}, C = \frac{\rho C}{\rho}, T = \frac{1}{c_v} \left(E - \frac{u^2}{2} - \frac{v^2}{2} \right)$$

и вычисление:

4 этап. Учет межфазного трения:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -c_d s u |V|, \frac{\partial v}{\partial t} = -c_d s v |V|, |V| = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (13)$$

5 этап. Учет изменения импульса за счет ускорения Кориолиса:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 2\omega_z v, \frac{\partial v}{\partial t} = -2\omega_z u \quad (14)$$

6 этап. Учет влияния турбулентной вязкости, теплопроводности и диффузии:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial W}{\partial y} \right), \text{ где } W = \begin{pmatrix} u \\ v \\ T \\ C \end{pmatrix}, K = \begin{pmatrix} \nu_t \\ \nu_t \\ K_\epsilon \\ D_\epsilon \end{pmatrix} \quad (15)$$

7 этап. Учет химических реакций:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = Q, \rho_j \frac{\partial \phi_j}{\partial t} = R_{\phi_j}, j = 1, \dots, m, \frac{\partial \rho C_i}{\partial t} = R_i, i = 1, \dots, n-1, C_n = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} C_i \quad (16)$$

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = Q_T, \sum_{j=1}^m \rho_j c_{vj} \frac{\partial T_j}{\partial t} = Q_{T_1} \quad (17)$$

Здесь (16) - изменение массы и массовых концентраций в газовой фазе и объемных долей компонентов твердой фазы за счет химических реакций, (17) - изменение тепловой энергии за счет химических реакций. Критерий прекращения горения: объемная доля ЛГМ становится меньше некоторого (задаваемого) критического значения ϕ^* : $\phi(x, y, t) \leq \phi^*(x, y)$.

8 этап. Учет межфазного теплообмена и обмена лучистой энергией:

$$c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha(T_1 - T) + \kappa \sigma (T_1^4 - T^4) - 2\sigma T^4, \sum_{j=1}^m \rho_j \phi_j c_{vj} \frac{\partial T_j}{\partial t} = -\alpha(T_1 - T) - \kappa \sigma (T_1^4 - T^4) \quad (18)$$

9 этап. Вычисление давления из уравнения состояния:

$$p = \frac{\rho R T}{\phi} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{M_i} \quad (19)$$

Разностная схема для решения уравнений математической модели. При построении разностных аппроксимаций на основе описанной схемы расщепления основную трудность представляет реализация первого этапа - выбор аппрокси-

мации, обеспечивающей достаточно точный расчет приближенного решения нелинейных уравнений переноса. Первоначально (другие аппроксимации, модификации традиционных схем являются предметом отдельной работы) для аппроксимации уравнений системы (10) применяется явная разностная схема на двухточечном ориентированном по направлению потока шаблоне ([4]). При аппроксимации всех уравнений (10) – (19) производные по времени заменялись разностью вперед, производные по пространственным переменным в уравнениях (15) – выражениями типа

$$\frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial W}{\partial x} \approx (K_{i+1/2,j} \frac{W_{i+1,j} - W_{i,j}}{\Delta x} - K_{i-1/2,j} \frac{W_{i,j} - W_{i-1,j}}{\Delta x}) / \Delta x,$$

$$\frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial W}{\partial y} \approx (K_{i,j+1/2} \frac{W_{i,j+1} - W_{i,j}}{\Delta y} - K_{i,j-1/2} \frac{W_{i,j} - W_{i,j-1}}{\Delta y}) / \Delta y.$$

Описанная схема реализована в среде КТС Mathematica. При расчетах условие устойчивости контролировалось путем сопоставления результатов, полученных с разными значениями временного шага, а также соотношением

$$\max_i (|u_y| + c_y) \frac{\Delta t}{\min(\Delta x, \Delta y)} < \frac{1}{4}.$$

Назначение получаемых в расчетах результатов – формирование базы знаний (БЗ) из комплектов рассчитанных при разных значениях параметров задачи типовых численных решений. Они идентифицируются тремя группами параметров: характеристиками ЛПГМ конкретного участка леса (наборы по умолчанию могут быть получены из отдельной БЗ), геометрией источника возгорания и климатическими условиями. Расчеты проводятся на мощном сервере по запросам, инициированным зарегистрированными пользователями. Результаты расчетов в унифицированном для спроектированной базы знаний формате (в ASCII кодировке) для определенных временных слоев, число которых, как правило, значительно меньше, чем число расчетных, сохраняются на внешнем устройстве.

Работа с БЗ возможна широкому кругу зарегистрированных в системе специалистов-предметников, которые могут анализировать и сопоставлять рассчитанные для разных параметров решения, интерактивно формировать графические иллюстрации из клиентских приложений.

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, 464 с.