

Математическое моделирование динамики лесных пожаров

Двухфазная двухтемпературная модель лесных пожаров

Для простоты записи системы уравнений ниже рассматривается двухфазная модель пожаров в одном ярусе леса, на основе которой легко сконструировать многоярусную модель лесных пожаров, 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 предлагаемой модели лес рассматривается как одноярусная двухфазная среда, состоящая из воздуха и газообразных продуктов пиролиза и горения (газовоздушная или газовая фаза) и из лесных горючих материалов (ЛГМ) и твёрдых продуктов пиролиза и горения ЛГМ (твёрдая фаза). При построении физико-математической модели двухфазной гетерогенной смеси на основе методов механики сплошной среды такая смесь представляется как двухкомпонентный континуум с взаимопроникающим движением фаз и с межфазным обменом массой, импульсом и энергией [8]. 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). При этом предполагаем, что частицы дисперсной сажи движутся вместе с газовой фазой, и при сгорании сажи процесс теплообмена проходит быстро и можно рассматривать единую температуру газовой фазы. Твёрдая фаза также является многокомпонентной средой, состоящей из ЛГМ, продукта пиролиза ЛГМ — коксика и золы.

Система уравнений двумерной двухфазной модели, полученная интегрированием по высоте слоя ЛГМ исходной трехмерной системы осредненных по Рейнольдсу уравнений газовой динамики, имеет следующий вид:

– газовая фаза:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = Q - J_\rho,$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} = -\frac{\partial \phi p}{\partial x} + P_1 + F_1 + p \frac{\partial \phi}{\partial x} - J_u + 2\rho \omega_z v,$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial y} = -\frac{\partial \phi p}{\partial y} + P_2 + F_2 + p \frac{\partial \phi}{\partial y} - J_v - 2\rho \omega_z u,$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u E}{\partial x} + \frac{\partial \rho v E}{\partial y} = & -\frac{\partial \phi p u}{\partial x} - \frac{\partial \phi p v}{\partial y} + F_T - J_T + \\
& + p \sum_{j=1}^m \left(R_{\phi_j} / \rho_j \right) + \alpha (T_1 - T) - \operatorname{div} \mathbf{W} - 4\kappa \sigma_k T^4 + f_\Gamma + f_{\Gamma R} + Q_T,
\end{aligned}
\tag{2.1}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho \mathbf{C}}{\partial t} + \frac{\partial \rho u \mathbf{C}}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \mathbf{C}}{\partial y} = & \mathbf{R}_C + \mathbf{F}_C - \mathbf{J}_C, \\
\frac{\partial \rho C_{cd}}{\partial t} + \frac{\partial \rho u C_{cd}}{\partial x} + \frac{\partial \rho v C_{cd}}{\partial y} = & R_{cd} - J_{cd}, \\
p = & p(\rho, T, \mathbf{C}),
\end{aligned}$$

– твёрдая фаза:

$$\rho_j \frac{\partial \phi_j}{\partial t} = R_{\phi_j}, \quad j = 1, \dots, m,
\tag{2.2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^m \rho_j \phi_j c_{pj} T_1 = -p \sum_{j=1}^m \left(R_{\phi_j} / \rho_j \right) - \alpha (T_1 - T) + \sigma T^4 - \sigma \kappa_1 T_1^4 + Q_{T_1},$$

– нормировочные и балансные соотношения:

$$\phi + \sum_{j=1}^m \phi_j = 1, \quad \sum_{i=1}^n C_i + C_{cd} = 1, \quad \sum_{i=1}^n R_i + R_{cd} = Q, \quad \sum_{j=1}^m R_{\phi_j} = -Q,$$

где: $\rho, T, E, \mathbf{V} = (u, v)$ — парциальная плотность, температура, полная энергия и скорость газовой фазы, p — общее давление многофазной среды, ϕ — объёмная доля газовой фазы, ϕp — диагональная составляющая тензора напряжений, пропорциональная объёмной доле газовой фазы, $p \frac{\partial \phi}{\partial x_i}$, $i = 1, 2$ — компоненты

объёмной силы, обуславливающей изменение импульса за счёт изменения объёмной доли газовой фазы, $p \sum_{j=1}^m \left(R_{\phi_j} / \rho_j \right) = -p \frac{\partial \phi}{\partial t}$ — изменение полной энергии за счёт изменения объёмной доли газовой фазы, Q — скорость поступления вещества в газовую среду за счёт процессов в твёрдой фазе, Q_T — тепловыделение в газовой фазе

за счет горения газов и дисперсной сажи, $J_p, \mathbf{J}_c, J_u, J_v, J_E$ — поток вещества, импульса и энергии на верхней и нижней границах слоя ЛГМ, $\mathbf{C} = (C_1, C_2, \dots, C_n)$ — массовые концентрации газовых компонентов газовой фазы, C_{cd} — массовая концентрация дисперсной сажи в газовой фазе, D_C — коэффициент диффузии, $\mathbf{R}_C = (R_1, R_2, \dots, R_n)$, R_i — скорость изменения C_i в результате химических реакций, R_{cd} — скорость изменения C_{cd} за счет химических реакций, J_{cd} — выбывание дисперсной сажи на верхней и нижней границах слоя ЛГМ, $2\rho\omega_z v$, $-2\rho\omega_z u$ — компоненты силы Кориолиса, ω_z — угловая скорость вращения Земли, $F_1 = \rho c_d s u |\mathbf{V}|$, $F_2 = \rho c_d s v |\mathbf{V}|$ — компоненты объемной силы, связанной с обменом импульсом между фазами (силы межфазного трения), c_d — эмпирический коэффициент сопротивления растительности, s — удельная поверхность ЛГМ, P_1, P_2 — члены турбулентной вязкости,

$$F_T = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_s \frac{\partial T}{\partial y} \right),$$

$$\mathbf{F}_C = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_C \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_C \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial y} \right),$$

$k_s = k + k_t$, k — коэффициент молекулярной теплопроводности в газе, k_t — коэффициент турбулентной теплопроводности, D_C — коэффициент турбулентной диффузии, $\alpha(T_1 - T)$ — межфазный теплообмен, α — коэффициент теплообмена, f_Γ — теплообмен на верхней и нижней границах слоя ЛГМ, $\phi_j, j = 1, \dots, m$ — объемные доли компонентов твердой фазы в объеме двухфазной среды, $\rho_j, j = 1, \dots, m$ — истинные плотности компонентов твердой фазы $\rho_j = \text{const}$, $c_{pj}, j = 1, \dots, m$ — теплоемкость компонентов твердой фазы, $R_{\phi_j}, j = 1, \dots, m$ — скорость изменения объемной доли ϕ_j , T_1 — температура твердой фазы, Q_{T_1} — тепловыделение в твердой фазе.

В модели переноса энергии излучения будем полагать, что излучение во фронте пожара локально равновесное. Тогда перенос лучистой энергии в этой модели осуществляется за счет механизма лучистой теплопроводности, обусловленного

наличием дисперсных частиц, где для потока энергии излучения $\mathbf{W}$ используется формула [9,10]

$$\mathbf{W} = -\frac{16\sigma l_s T^3}{3} \text{grad } T,$$

и механизма переноса излучения в оптически прозрачном слое, описываемого членом $4\kappa\sigma_k T^4$, l_s — длина пробега излучения (характерное расстояние между дисперсными частицами), κ — коэффициент поглощения излучения в газе, σ_k — интеграл от спектральной интенсивности равновесного излучения по спектру частот, для которых газовую фазу можно считать оптически прозрачной средой, f_{GR} — обмен лучистой энергией на верхней и нижней границах слоя ЛГМ, $\sigma T^4 - \sigma\kappa_1 T_1^4$ — поглощение лучистой энергии в твёрдой фазе, κ_1 — коэффициент поглощения излучения в твердой фазе, σ — постоянная Стефана-Больцмана.

Замыкание модели

Межфазный массообмен и тепловыделение за счет химических реакций.

В двухфазной модели (2.1), (2.2) рассматриваются:

– газовая фаза, состоящая из 3-х компонент:

- 1 – горючие газы (в основном CO, H₂, CH₄), массовая концентрация C_1 ,
- 2 – негорючие газы (N₂, CO₂), массовая концентрация C_2 ,
- 3 – окислитель (O₂), массовая концентрация C_3 ;

– твердая фаза, состоящая из 3-х компонент:

- 1 – лесные горючие материалы, объемная доля ϕ_1 ,
- 2 – коксик, объемная доля ϕ_2 ,
- 3 – зола, объемная доля ϕ_3 .

В двухфазной модели дисперсная сажа рассматривается как четвертая компонента в газовой фазе с массовой концентрацией C_{cd} . Продукты пиролиза лесогорючих материалов – коксик и дисперсная сажа состоят, практически, из чистого углерода.

В качестве базовых химических реакций рассмотрим реакции пиролиза ЛГМ (R_0), горения углерода (R_c) и горения газов (R_{co}). Процессами диссоциации при

характерных значениях температуры газовой фазы во фронте пожара около 1300 К можно пренебречь.

Для величин R_0 , R_c , R_{co} воспользуемся формулами [11,12]:

$$R_0 = \rho_1 \phi_1 k_0 \exp\left(-\frac{E_0}{RT_1}\right),$$

$$\frac{E_0}{R} = 9400 \text{ К}, \quad k_0 = 3.63 \cdot 10^4 [\text{с}^{-1}],$$

$$R_c = \frac{M_c}{M_3} \rho C_3 k_c \exp\left(-\frac{E_c}{RT}\right),$$

$$\frac{E_c}{R} = 10000 \text{ К}, \quad k_c = 1000 [\text{м/с}],$$

$$R_{co} = \rho C_1 k_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right),$$

$$E_1 = 96800 [\text{Дж/моль}], \quad R = 8.3144 [\text{кДж}/(\text{моль} \cdot \text{К})], \quad k_1 = 7.05 \cdot 10^6 [\text{с}^{-1}].$$

Тогда члены, описывающие изменение массы и энергии за счет химических реакций, определяются формулами:

$$Q = (1 - \alpha_c - \alpha_{as} - \alpha_{cd})R_0 + \phi_2 s_2 R_c + C_{cd} s_{cd} R_c,$$

$$R_1 = (1 - \alpha_c - \alpha_{as} - \alpha_{cd})\alpha_1 R_0 - R_{co},$$

$$R_2 = (1 - \alpha_c - \alpha_{as} - \alpha_{cd})(1 - \alpha_1)R_0 + R_{co} + \phi_2 s_2 R_c + C_{cd} s_{cd} R_c,$$

$$R_3 = -R_c,$$

$$R_{\phi_1} = -R_0,$$

$$R_{\phi_2} = \alpha_c R_0 - \phi_2 s_2 R_c,$$

$$R_{\phi_3} = \alpha_{as} R_0,$$

$$R_{cd} = \alpha_{cd} R_0 - C_{cd} s_{cd} R_c,$$

$$Q_T = q R_{co} + q_1 C_{cd} s_{cd} R_c,$$

$$Q_{T_1} = q_1 \phi_2 s_2 R_c,$$

где: M_c – молекулярная масса углерода ($M_c = 12$), M_3 – молекулярная масса окислителя (O_2), E_0, E_1, E_c – энергии активации, k_0, k_1, k_c – константы химических процессов, α_c – коксовое число или доля коксика при пиролизе ЛГМ, α_{cd} – доля дисперсной сажи при пиролизе ЛГМ, α_{as} – доля золы, образующейся при пиролизе ЛГМ, $(1 - \alpha_c - \alpha_{as} - \alpha_{cd})$ – доля газов при пиролизе ЛГМ, α_1 – доля горючих газов среди газов, образующихся при пиролизе ЛГМ, $(1 - \alpha_1)$ – доля негорючих газов при пиролизе ЛГМ, $s_2(m^{-1})$ – удельная поверхность коксика, $s_{cd}(m^{-1})$ – удельная поверхность дисперсной сажи, q – теплота горения газов, q_1 – теплота горения углерода (коксика и сажи), $\alpha_c R_0$ – массовая скорость образования коксика при пиролизе ЛГМ, $\alpha_{cd} R_0$ – массовая скорость образования сажи при пиролизе ЛГМ, $\alpha_{as} R_0$ – массовая скорость образования золы при пиролизе ЛГМ, $(1 - \alpha_c - \alpha_{as} - \alpha_{cd}) R_0$ – массовая скорость образования газов при пиролизе ЛГМ, $\phi_2 s_2 R_c$ – массовая скорость выгорания коксика и образования газов при горении, $C_{cd} s_{cd} R_c$ – массовая скорость выгорания дисперсной сажи и образования газов при горении.

В предложенных моделях возможно более детальное рассмотрение химического состава смеси газов в зоне пожара. В качестве горючих газов можно отдельно рассматривать оксид углерода (CO) и метан (CH₄), которые и составляют основной объем горючей смеси. Тогда C_1 можно рассматривать как вектор, состоящий из двух компонент, а член, описывающий тепловыделение в газовой фазе Q_T , также будет суммарным. В качестве негорючих газов можно отдельно рассматривать азот (N₂), углекислый газ (CO₂) и пары воды, тогда C_2 будет трехкомпонентным вектором.

Уравнение состояния газовой фазы

$$p\phi = \rho RT \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{M_i},$$

где M_i – молекулярные массы компонентов газовой фазы.

Турбулентное замыкание системы. В качестве турбулентного замыкания уравнений газовой фазы достаточно воспользоваться известной формулой зависимости коэффициента турбулентной вязкости от инвариантов тензора скоростей деформаций.

Применение более сложных моделей турбулентности в расчетах реальных лесных пожаров нецелесообразно в силу большой погрешности в задании исходных данных по запасам ЛГМ и в определении коэффициентов физических процессов, протекающих в зоне пожара.

Выбывание субстанции через верхнюю границу слоя ЛГМ описывается формулой

$$J_{\varphi} = \varphi w|_{z=h} + \partial \varphi w / \partial z|_{z=h},$$

где вертикальная скорость w и ее производная по z определяются полуэмпирической формулой (см. [11]).

Алгоритм численного решения задачи

При разработке алгоритма численного решения системы уравнений модели лесных пожаров был применен метод расщепления по физическим процессам, аналогичный описанному выше методу для модели распространения облаков тяжелых газов. В этой задаче в методе расщепления добавятся этапы учитывающие следующие физико-химические процессы:

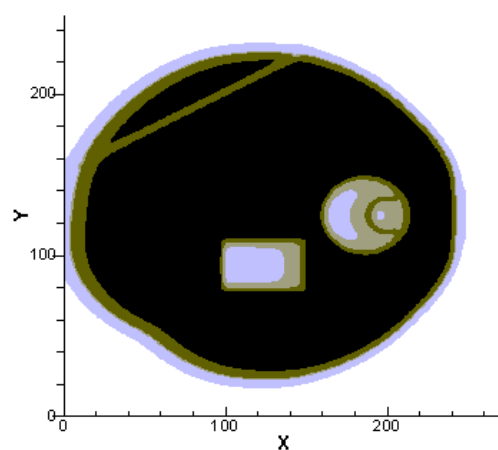
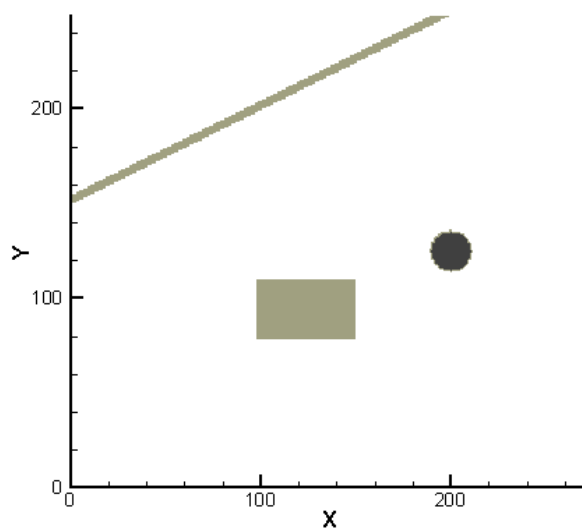
- учет изменения импульса за счет изменения объемных долей фаз и силы Кориолиса
- учет выбывания субстанции на верхней и нижней границах слоя ЛГМ;
- учет химических реакций – изменение массы и массовых концентраций в газовой фазе и объемных долей компонентов твердой фазы и изменение тепловой энергии;
- учет межфазного теплообмена и обмена лучистой энергией:

Трехфазная модель лесных пожаров

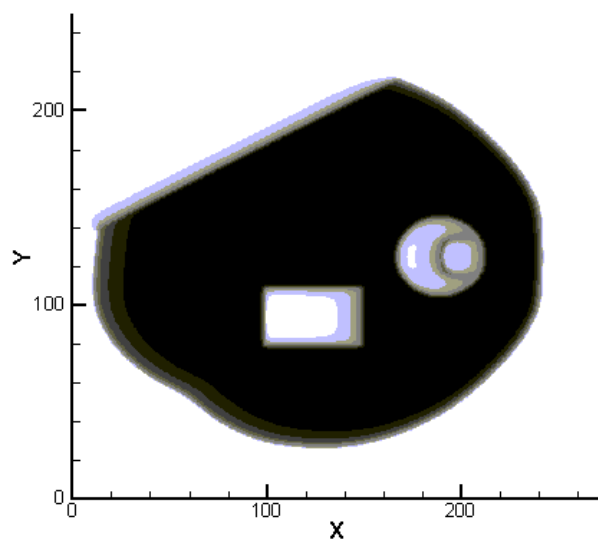
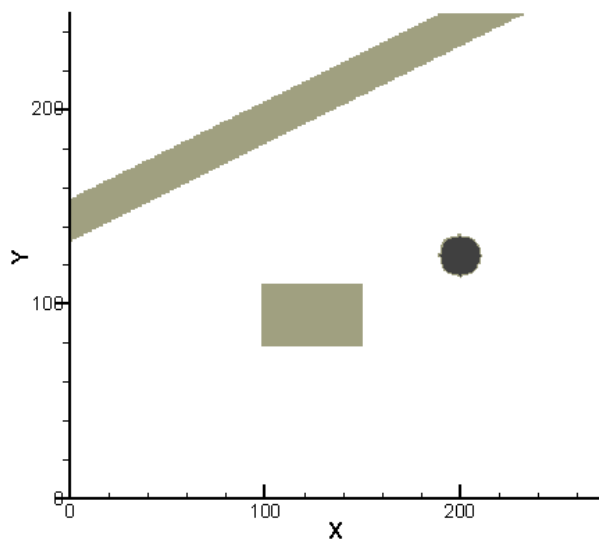
Автором была разработана также трехфазная модель лесных пожаров [2], в которой дисперсная сажа учитывается как отдельная фаза со своей скоростью и температурой. Результаты численных экспериментов показали, что учет дисперсной сажи как отдельной фазы не оказывает существенного влияния на энергетический баланс во фронте пожара, что объясняется быстрым протеканием процессов межфазного обмена энергией. Однако, трехфазная модель позволяет описать важный механизм распространения пожара горящими частицами дисперсной сажи.

Результаты тестовых расчетов

На рис. 3а представлены результаты тестовых расчетов по распространению лесного пожара под действием ветра, дующего со скоростью 2 м/с в направлении, противоположном оси ОХ, в условиях неоднородного распределения запасов ЛГМ. Источник пожара первоначально имеет форму круга. Схематично изображены поляна прямоугольной формы и дорога, на которых отсутствует растительность (см. рис.3а).



видно выгорание ЛГМ и образование температурного фронта пожара. Температура за фронтом постепенно падает. Фронт пожара обтекает поляну и распространяется через узкую дорогу шириной 3 метра.



На рис. изображена дорога шириной 20 метров. Фронт пожара не может преодолеть дорогу такой ширины и распространяется вдоль нее по направлению ветра.

Результаты тестовых расчетов показывают, что модель дает качественно правильную картину образования фронта пожара и его распространения под действием ветра в условиях неоднородного распределения запасов ЛГМ на местности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dobrocheev O.V., Kuleshov A.A.,Lelakin A.L. A two dimensional model of heavy gas cloud dispersion under industrial accidents, Preprint IAE 1991, М.: 1991, № 5339/1, - 16р.
2. Кулешов А.А. Математически модели лесных пожаров // Матем. моделирование. 2002. Т.14, №11, с.33-42.
3. Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е., Тишкин В.Ф. Математическое моделирование лесных пожаров по двухфазной модели // г. Казань, 2002г., с 26 июня по 4 июля 2002 г. 16-ая сессия Международной школы по моделям механики сплошной среды.
4. Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е., Тишкин В.Ф. Прогнозирование распространения лесных пожаров методом математического моделирования // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Научно-практическая конференция, 23 октября 2002г. М.: Центр “Антистихия”, 2003, с.148-154.
5. Стокер Дж.Дж. Волны на воде. Математическая теория и приложение // М.: Иностр. Лит., 1959.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика // М.:Наука, 1988.-736с.
7. Кузьмин Р.Н., Кулешов А.А., Савенкова Н.П., Филиппова С.В. Моделирование аварий на промышленном объекте с истечением тяжелых газов и жидкостей // Математическое моделирование, М.: 1998, Т.10, №8, -10с.
8. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.:Наука, 1987, 464с.
9. Четверушкин Б.Н. Математическое моделирование задач динамики излучающего газа. – М.: Наука, 1985, 304с.
10. Зельдович Я.Б, Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Физматгиз, 1963, 632с.
11. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука СО, 1992, 404с.
12. Померанцев В.В. Ред. Основы практической теории горения. – Л.: Энергоатомиздат, 1986, 309с.

Кулешов Андрей Александрович. Родился в 1956 г. Окончил Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова в 1978 г. Кандидат физико-математических наук. Автор более 50 научных работ. Область научных интересов: прикладная математика, математическое моделирование. Старший научный сотрудник Института математического моделирования РАН.