ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 115 за 2019 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Кулешов А.А., Мышечная Е.Е.

Результаты расчетов
распространения фронта
лесных пожаров по
двумерной трехфазной
модели

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Кулешов А.А., Мышечная Е.Е.
Результаты расчетов распространения фронта лесных пожаров по двумерной трехфазной
модели // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2019. № 115. 9 с. doi:[10.20948/prepr-2019-115](https://doi.org/10.20948/prepr-2019-115)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-115>

О р д е н а   Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й   а к а д е м и и   н а у к

А.А. Кулешов, Е.Е. Мышечкая

Результаты расчетов
распространения фронта лесных пожаров
по двумерной трехфазной модели

Москва — 2019

А.А. Кулешов, Е.Е. Мышецкая

Результаты расчетов распространения фронта лесных пожаров по двумерной трехфазной модели

На основе разработанных авторами ранее двумерной трехфазной математической модели лесных пожаров и алгоритма численного решения был создан параллельный программный комплекс и представлены результаты расчетов процесса распространения фронта лесных пожаров в условиях неоднородного распределения лесных горючих материалов на площади, наличия препятствий для распространения огня и при наличии ветра.

Ключевые слова: лесные пожары, двумерная трехфазная математическая модель, результаты расчетов.

Andrey Aleksandrovich Kuleshov, Elena Evgenievna Myshetskaya

Results of computation of the forest fires front propagation based on a two-dimensional three-phase model

Based on the previously developed two-dimensional three-phase mathematical model of forest fires and an algorithm for numerical solution, a parallel program complex was created and the results of computation of the forest fires front propagation in the presence of an inhomogeneous distribution of forest fuel, the presence of obstacles for the fire propagation, the presence of a wind are presented.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-01-00405.

Введение

В работе [1] была построена двумерная трехфазная модель лесных пожаров, система уравнений которой включает подсистемы для трех фаз: газовой фазы, состоящей из воздуха и легких летучих продуктов пиролиза и горения; твердой фазы, состоящей из лесных горючих материалов (ЛГМ) и твердых продуктов пиролиза ЛГМ; дисперсной фазы, состоящей из крупных горящих частиц, которые переносятся ветром над слоем ЛГМ и, оседая, образуют новые очаги пожара перед основным его фронтом.

В работе [2] предложен алгоритм численного решения задачи, который основан на широко известном методе расщепления задачи по физическим процессам.

В настоящей работе приводятся некоторые результаты численного моделирования лесных пожаров с помощью программного комплекса, созданного на основе трехмерной трехфазной модели и разработанного алгоритма.

1. Краткое описание математической модели и алгоритма численного решения задачи

1.1. Краткое описание математической модели

Для наглядности приведем систему уравнений модели, которая подробно описана в [1]. Уравнения модели имеют следующий вид:

газовая фаза:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = Q - J_\rho, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) + \nabla (\phi p) = \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{V}) + \mathbf{F} + \mathbf{F}_w - \mathbf{J}_V, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} E + \phi p \mathbf{V}) = & \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + \alpha (T_1 - T) + \sigma (\varepsilon_1 T_1^4 - \varepsilon T^4) + \\ & + \alpha_d (T_d - T) + \sigma (\varepsilon_d T_d^4 - \varepsilon T^4) + f_\Gamma + f_{\Gamma R} + q_l W + q_s W_s - J_E, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} C_i) = \nabla \cdot (\rho D_{eff} \nabla C_i) + Q_i + W_i + W_i^s - J_{C_i}, \quad i = \overline{1, 5}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho C_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} C_s) = Q_s - W_s - J_s, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G + P_k - \rho \varepsilon - L_k, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + c_1 G \frac{\varepsilon}{k} + P_\varepsilon - c_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} - L_\varepsilon, \quad (7)$$

$$p = \rho^0 R T \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{M_i}; \quad (8)$$

твёрдая фаза:

$$\rho_j^0 \frac{\partial \phi_j}{\partial t} = R_{\phi_j}, \quad j = \overline{1, 3}; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^3 \rho_j^0 \phi_j c_{pj} T_1 = & -\alpha(T_1 - T) - \sigma(\mathfrak{x}_1 T_1^4 - \mathfrak{x} T^4) - \\ & -\alpha_2(T_1 - T_d) - \sigma(\mathfrak{x}_1 T_1^4 - \mathfrak{x}_d T_d^4) + Q_{T_1}; \end{aligned} \quad (10)$$

дисперсная фаза:

$$\frac{\partial \mathbf{V}_d}{\partial t} = -c_f (\mathbf{V}_d - \mathbf{V}_w) |\mathbf{V}_d - \mathbf{V}_w|, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_d \mathbf{V}_d) = R_d - J_d, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_d c_{pd} T_d}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_d \mathbf{V}_d c_{pd} T_d) = & -\alpha_1(T_d - T) - \alpha_2(T_d - T_1) - \\ & -\sigma(\mathfrak{x}_d T_d^4 - \mathfrak{x} T^4) - \sigma(\mathfrak{x}_d T_d^4 - \mathfrak{x}_1 T_1^4) - J_{T_d} + Q_{T_d}; \end{aligned} \quad (13)$$

нормировочные и балансные соотношения:

$$\begin{aligned} \phi + \sum_{j=1}^3 \phi_j + \phi_d = 1, \quad \sum_{i=1}^5 C_i + C_s = 1, \\ \sum_{i=1}^5 (Q_i + W_i + W_i^s) + Q_s - W_s = Q, \quad \sum_{j=1}^3 R_{\phi_j} = -Q. \end{aligned} \quad (14)$$

Система уравнений (1)-(14) рассматривается в декартовых координатах в прямоугольной области $\Omega = \{0 \leq x \leq l_1, 0 \leq y \leq l_2\}$ на горизонтальной плоскости XY ; ρ – парциальная плотность газовой фазы; p – общее давление многофазной среды; $\mathbf{V}=(u, v)$ – вектор скорости газовой фазы; T – температура газовой фазы; E – полная энергия газовой фазы, $E=0.5(u^2+v^2)+c_v T$; c_v – удельная теплоемкость газовой фазы; ϕ – ее объемная доля; $\rho^0=\rho/\phi$ – ее истинная плотность; R – универсальная газовая постоянная; M_i – молекулярная масса i -й

компоненты газовой фазы; $\mathbf{F} = -\rho c_d s \mathbf{V} |\mathbf{V}|$ – объемная сила, связанная с обменом импульсами между фазами (сила межфазного трения); c_d – эмпирический коэффициент сопротивления растительности; s – удельная поверхность ЛГМ; $\mathbf{F}_w = -\rho \xi (\mathbf{V} - \mathbf{V}_w) |\mathbf{V} - \mathbf{V}_w|$ – сила трения, обусловленная ветром на верхней границе слоя ЛГМ, имеющим скорость $\mathbf{V}_w$; ξ – безразмерный эмпирический коэффициент трения; $C_i, i = \overline{1,5}$ – массовые концентрации горючего газа (CO), окислителя (O₂), углекислого газа (CO₂), паров воды (H₂O) и азота (N₂) соответственно; C_s – массовая концентрация мелкодисперсной сажи; Q – скорость поступления вещества в газовую среду в результате химических процессов в твердой фазе; $\phi_j, j = \overline{1,3}$ – объемные доли компонентов твердой фазы: ЛГМ, коксика и золы соответственно; $\rho_j^0, j = \overline{1,3}$ – истинная плотность j -й компоненты твердой фазы, $\rho_j^0 = \text{const}$; R_{ϕ_j} – скорость изменения массы j -й компоненты твердой фазы в результате химических реакций; T_1 – температура твердой фазы; Q_{T_1} – тепловыделение в твердой фазе в процессе горения; c_{pj} – удельная теплоемкость компонент твердой фазы; W – массовая скорость реакции горения CO; W_s – массовая скорость горения сажи; $W_i, W_i^s, i = \overline{1,5}$ – скорости образования или потребления компонент газовой фазы в соответствующих реакциях, $\rho_d, T_d, \mathbf{V}_d = (u_d, v_d), \phi_d$ – парциальная плотность, температура, скорость и объемная доля дисперсной фазы соответственно, коэффициент сопротивления частиц c_f зависит от формы частиц, площади сечения частиц, которые будем полагать одинаковыми (рассматривается монодисперсная смесь), и числа Рейнольдса: так, согласно [14], при $\text{Re} > 2 \cdot 10^6$ $c_f = 0.1 k_f \pi r^2$, где k_f – коэффициент формы частицы; $\mathbf{V}_w = (u_w, v_w)$ – скорость ветра над лесным массивом; $\phi_d = \rho_d / \rho_d^0$, где ρ_d^0 и c_{pd} – истинная плотность и удельная теплоемкость материала дисперсных частиц соответственно, и так как дисперсные частицы и коксик состоят из углерода, то $\rho_d^0 = \rho_2^0, c_{pd} = c_{p2}$ и равны соответствующим параметрам углерода.

Для турбулентного замыкания системы (1)-(5) использована модифицированная k - ϵ модель турбулентности.

Граничные условия для системы (1)-(14) задаются на открытой боковой границе Γ расчетной области. На тех участках границы, где поток втекает в расчетную область, задаются параметры невозмущенной окружающей среды (с индексом a)

$$\Phi|_{\Gamma} = \Phi_a, \quad \Phi = (\rho, u, v, T)^T, \quad (\mathbf{V}, \mathbf{n}) \leq 0,$$

а на участках границы, где газ вытекает из области, задаются условия

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\Gamma} = 0, \quad \Phi = (\rho, u, v, E, C, \rho_d, T_d)^T, \quad (\mathbf{V}, \mathbf{n}) > 0.$$

Начальные значения параметров вне источника пожара – это параметры окружающей среды, а в очаге пожара задаются характерные для рассматриваемого вида пожара и типа ЛГМ значения параметров $(T^0, T_1^0, T_d^0, C^0, C_s^0, \rho_d^0)$, начальные скорости газовой и дисперсной фаз равны нулю $\mathbf{V}^0 = 0, \mathbf{V}_d^0 = 0$, а давление в начальный момент времени задается равным атмосферному $p^0 = p_a$ (известно, что в открытых системах давление выравнивается) и из уравнения состояния находится неизвестное нам значение плотности газовой фазы в начальный момент времени.

1.2. Краткое описание алгоритма численного решения задачи

Как было отмечено во введении, алгоритм численного решения задачи основан на широко известном методе расщепления по физическим процессам. На временном шаге $[t_n, t_{n+1}]$ последовательно решаются подсистемы уравнений, описывающие те или иные физические процессы, описанные в модели, а начальными данными для решения этих подсистем служат решения, полученные на предыдущих этапах. Алгоритм решения задачи на каждом шаге делится на следующие этапы [2]:

Этап 1. Перенос газовой фазы.

Этап 2. Учет выбывания субстанции на верхней и нижней границах слоя ЛГМ.

Этап 3. Учет межфазного трения.

Этап 4. Учет влияния ветра на верхней границе слоя ЛГМ.

Этап 5. Учет вязкости, теплопроводности и диффузии.

Этап 6. Учет генерации и диссипации турбулентной кинетической энергии и скорости ее диссипации.

Этап 7. Вычисление скорости дисперсной фазы.

Этап 8. Перенос массы и энергии дисперсной фазы.

Этап 9. Учет химических реакций.

Этап 10. Учет межфазного теплообмена и обмена лучистой энергией.

2. Результаты численного моделирования

Программный комплекс для численной реализации модели (1)-(14) был создан на базе программного комплекса для двумерной двухфазной модели [3], который был модифицирован путем включением дополнительных модулей для расчета скорости, массы и энергии дисперсной фазы. При расчете межфазного теплообмена и обмена лучистой энергией дополнительно учитывался обмен между газовой и дисперсной, а также между твердой и дисперсной фазами.

Моделирование процесса распространения лесных пожаров было проведено на многопроцессорном вычислительном комплексе МВС-15000ВМ.

Рис.1. Распространение фронта лесного пожара.

На рис.1 представлены результаты расчетов на многопроцессорной ЭВМ процесса распространения лесного пожара по двумерной трехфазной модели (1)-(14) в условиях неоднородного распределения запасов ЛГМ и при наличии ветра.

На рис.1а в начальный момент времени схематично изображены три поляны прямоугольной формы и две дороги, на которых отсутствует растительность. Источник пожара имеет форму круга. Ветер имеет скорость $V_w = (4,4)$ м/с.

На рис.1б-1е показано изменение объемной доли (выгорание) ЛГМ на различные моменты времени. Из наблюдений за реальными лесными пожарами известно [4], что в пожарах сгорает только малая доля ЛГМ, например, у хвойных деревьев сгорают только хвоя и тонкие ветки, поэтому максимальная объемная доля ϕ_1 выгорающих ЛГМ принята равной 0.003. По объемной доле ЛГМ можно оценить степень выгорания ЛГМ и, тем самым, оценить ущерб от пожара, причиненный конкретному лесному массиву.

На рис. 1в видно, как фронт пожара распространяется по направлению ветра, обтекает ближнюю к источнику пожара полянку и как по мере выгорания ЛГМ образуется задняя кромка фронта пожара. На рис. 1г-1е фронт пожара обтекает остальные полянки и распространяется через дороги.

Представленные результаты расчетов показывают, что предложенная модель позволяет описать наблюдаемый в реальных лесных пожарах механизм распространения огня с помощью горящих частиц, которые переносятся ветром над пологом леса и, опускаясь, служат причиной образования новых очагов пожара перед передней кромкой фронта пожара (см. рис. 1г-1е). Эти очаги затем сливаются с основным фронтом пожара.

Заключение

Для моделирования лесных пожаров на основе разработанной ранее двумерной трехфазной математической модели был создан параллельный программный комплекс и проведены расчеты распространения лесных пожаров с учетом основных физико-химических процессов и механизмов, характерных для протекания реальных лесных пожаров, в том числе механизма распространения лесных пожаров горящими частицами, которые переносятся ветром над пологом леса и, опускаясь передней кромкой основного фронта пожара, служат причиной образования вторичных очагов огня.

Список литературы

1. Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е., Якуш С.Е. Двумерная трехфазная математическая модель лесных пожаров // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2017. № 92. 12 с.
2. Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е. Алгоритм численного решения для двумерной трехфазной математической модели лесных пожаров // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 202. 16 с.
3. Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е., Якуш С.Е. Моделирование распространения лесных пожаров на основе модифицированной

двумерной модели // Мат. моделирование. 2016. Т. 28. № 12. С. 20-32.

4. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука СО. 1992. 404 с.

Оглавление

Введение	3
1. Краткое описание математической модели и алгоритма численного решения задачи	3
2. Результаты численного моделирования.....	6
Заключение.....	8
Список литературы.....	8