



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

Препринты ИПМ • Препринт № 92 за 2017 г.



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

Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е.,
Якуш С.Е.

Двумерная трехфазная
математическая модель
лесных пожаров

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: 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. doi:[10.20948/prepr-2017-92](https://doi.org/10.20948/prepr-2017-92)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-92>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

А.А. Кулешов, Е.Е. Мышечкая, С.Е. Якуш

**Двумерная трехфазная математическая
модель лесных пожаров**

Москва — 2017

А.А. Кулешов, Е.Е. Мышецкая, С.Е. Якуш

Двумерная трехфазная математическая модель лесных пожаров

Рассматривается двумерная трехфазная математическая модель лесных пожаров, построенная методом осреднения исходных уравнений многофазной среды по высоте слоя лесных горючих материалов (ЛГМ). Модель описывает распространение фронта лесного пожара в условиях неоднородного распределения ЛГМ на местности и наличия препятствий для распространения огня, а также учитывает перенос горящих частиц ветром над слоем ЛГМ и их выпадение.

Ключевые слова: лесные пожары, двумерная математическая модель, трехфазная среда

*Andrey Aleksandrovich Kuleshov, Elena Evgenievna Myshetskaya,
Sergey Evgenievich Yakush*

Two-dimensional three-phase mathematical model of forest fires

A two-dimensional three-phase mathematical model of forest fires is considered. The model is based on the averaging of initial multiphase medium equations over the height of the forest fuel (FF) layer. The developed model can be used to carry out numerical simulation of the forest fire-front propagation under the conditions of a heterogeneous FF distribution, the presence of obstacles to the fire propagation, and takes into account the transfer of burning particles by wind over the FF layer and their fall-out.

Key words: forest fires, two-dimensional mathematical model, three-phase medium

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 15-01-03445-а.

Введение

Лесные пожары представляют собой опасное природное явление, ежегодно приносящее значительный экономический и экологический ущерб. Для успешной борьбы с лесными пожарами важным элементом является прогнозирование процесса их распространения, а одним из самых эффективных и не требующих больших затрат инструментом прогнозирования является метод математического моделирования.

Математическое моделирование лесных пожаров интенсивно развивается последние два десятилетия, и к настоящему времени создано достаточно много различных моделей лесных пожаров, краткий обзор которых приведен в [1]. Одним из направлений моделирования лесных пожаров, разработанных авторами [1-6], является прогнозирование распространения фронта лесных пожаров на основе двумерных математических моделей. В ранних работах авторов [2-3] на основе предложенного А.М. Гришиным [7] общего подхода к описанию лесного пожара как многофазной реагирующей среды была разработана двумерная двухфазная модель лесных пожаров, в которой среда состоит из газовой (газовоздушной) и твердой фаз. Эта модель была построена на основе фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии, а ее уравнения были получены путем осреднения исходных трехмерных уравнений по высоте слоя лесных горючих материалов (ЛГМ). Модель учитывает основные физические процессы, происходящие в зоне пожара, и с ее помощью на современных многопроцессорных вычислительных комплексах можно проводить численное моделирование распространения лесных пожаров практически в режиме реального времени [4-6]. Однако в этой модели использовалось упрощенное описание турбулентного перемешивания, а тепловыделение при горении в газовой фазе, от которого зависит скорость распространения фронта пожара, описывалось кинетическими формулами для скоростей химических реакций с константами, в задании которых была значительная доля неопределенности. В последнее время авторами была предложена модифицированная двумерная модель [1] с описанием турбулентности с помощью известной $k-\varepsilon$ модели и с включением дополнительных членов генерации и диссипации турбулентности в лесном массиве [8,9]. В этой модели скорость турбулентного горения в газовой фазе описывается моделью дробления вихрей, согласно которой скорость горения при высокой температуре не зависит от кинетики реакций, а определяется исключительно скоростью турбулентного смешения компонент [10-13].

В моделях [1-6] в качестве одной из компонент газовой фазы рассматривалась мелкодисперсная сажа, которая переносится вместе с газовой фазой. В настоящей работе как дальнейшее развитие модифицированной двумерной модели [1] рассматривается трехфазная модель, в которой третья фаза состоит из крупных горящих дисперсных частиц, переносимых в ветровом поле над слоем ЛГМ. Рассматривая дисперсные частицы как

отдельную фазу, движущуюся со скоростью, отличной от скорости газовой фазы, можно описать наблюдаемый в реальных лесных пожарах механизм распространения пожара с помощью горящих частиц, которые переносятся ветром над пологом леса и, опускаясь, служат причиной образования новых очагов огня перед передней кромкой фронта пожара. Расстояния, на которые переносятся крупные горящие частицы в горизонтальном направлении, зависят от скорости ветра, времени горения, а также массы частиц и их геометрической формы, влияющей на их аэродинамику.

1. Фазовый и компонентный состав среды

В предлагаемой модели лес рассматривается как одноярусная трехфазная среда, состоящая из воздуха и легких летучих продуктов пиролиза и горения (газовоздушная или газовая фаза), из лесных горючих материалов и твердых продуктов пиролиза ЛГМ (твердая фаза) и из относительно крупных горящих дисперсных частиц (дисперсная фаза), также являющихся продуктом пиролиза ЛГМ. Газовая фаза состоит из шести компонент: горючего газа CO (массовая концентрация C_1), окислителя O_2 (C_2), углекислого газа CO_2 (C_3), паров воды H_2O (C_4), азота N_2 (C_5) и мелкодисперсной сажи (C_6). При этом предполагаем, что частицы мелкодисперсной сажи движутся вместе с газовой фазой, при сгорании сажи процесс теплообмена проходит быстро, и можно рассматривать единую температуру газовой фазы. Твердая фаза также является многокомпонентной и состоит из ЛГМ (объемная доля ϕ_1) и продуктов пиролиза ЛГМ – коксика (ϕ_2) и золы (ϕ_3). Коксик и мелкодисперсная сажа практически полностью состоят из углерода и сгорают без твердого остатка. Дисперсная фаза (объемная доля ϕ_d) состоит из горящих частиц углерода одинаковой формы и размера (монодисперсная смесь), которые переносятся ветром над слоем лесных горючих и оседают под действием силы тяжести.

2. Система уравнений модели

Рассмотрим одноярусную модель лесного пожара в одном слое ЛГМ постоянной толщины и будем предполагать, что физико-химические параметры (истинная плотность, влагосодержание, теплотворная способность и т.д.) в этом слое ЛГМ постоянны. Система уравнений двумерной трехфазной модели, полученная интегрированием по высоте слоя ЛГМ (яруса леса) исходных трехмерных уравнений, состоит из подсистемы осредненных по Фавру уравнений газовой динамики для многокомпонентной газовой фазы, подсистемы уравнений для массы компонент твердой фазы и ее энергии и подсистемы переноса массы и энергии крупных дисперсных частиц. Уравнения модели имеют следующий вид:

газовая фаза:

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} E + \phi p \mathbf{V}) &= \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + \alpha (T_1 - T) + \sigma (\mathfrak{a}_1 T_1^4 - \mathfrak{a} T^4) + \\ &+ \alpha_1 (T_d - T) + \sigma (\mathfrak{a}_d T_d^4 - \mathfrak{a} T^4) + f_\Gamma + f_{\Gamma R} + q_1 W + q_s W_s - J_E, \end{aligned} \quad (3)$$

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

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

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

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

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

твердая фаза:

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

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

дисперсная фаза:

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

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

$$\frac{\partial \rho_d c_{pd} T_d}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_d \mathbf{V}_d c_{pd} T_d) = -\alpha_1 (T_d - T) - \alpha_2 (T_d - T_1) - \sigma (\varepsilon_d T_d^4 - \varepsilon T^4) - \sigma (\varepsilon_d T_d^4 - \varepsilon_1 T_1^4) - J_{T_d} + Q_{T_d}; \quad (13)$$

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; Q – скорость поступления вещества в газовую среду в результате химических процессов в твердой фазе; $\rho_j^0, j=\overline{1,3}$ – 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 $\text{Re} > 2 \cdot 10^6$

$c_f = 0.1k_f\pi r^2$, 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.

3. Турбулентное замыкание модели

Для турбулентного замыкания системы (1)-(5) использована модифицированная модель турбулентности, содержащая в правых частях уравнений для турбулентной кинетической энергии k и скорости ее диссипации ε помимо обычного выражения для скорости генерации турбулентной энергии G дополнительные члены P_k, P_ε и L_k, L_ε , которые описывают соответственно генерацию и диссипацию турбулентности за счет взаимодействия потока с ЛГМ [8,9]. Эффективный коэффициент вязкости равен сумме динамической и турбулентной вязкости $\mu_{eff} = \mu_l + \mu_t$, где динамическая вязкость вычисляется

по формуле Сатерленда $\mu_l = \frac{1.458 T^{3/2}}{T + 110.4} 10^{-6}$, а турбулентная вязкость

вычисляется по формуле $\mu_t = c_\mu \rho k^2 / \varepsilon$;

$$G = \mu_t \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\};$$

$$P_k = \frac{1}{2} c_d s \rho |\mathbf{V}|^3, \quad P_\varepsilon = c_{\varepsilon 1} c_d s \rho |\mathbf{V}|^3 \frac{\varepsilon^0}{k^0}, \quad L_k = 2 c_d s \rho |\mathbf{V}| k, \quad L_\varepsilon = 4 c_{\varepsilon 2} c_d s \rho |\mathbf{V}| \varepsilon,$$

где используется стандартный набор констант $k-\varepsilon$ модели турбулентности: $c_\mu = 0.09$, $c_1 = 1.44$, $c_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, а для членов $P_\varepsilon, L_\varepsilon$ используются константы, полученные с помощью натуральных экспериментов [8,9]: $c_{\varepsilon 1} = 1.8$, $c_{\varepsilon 2} = 0.6$; k^0, ε^0 – характерные значения параметров турбулентности в лесном массиве, используемые также в качестве начальных значений для k и ε .

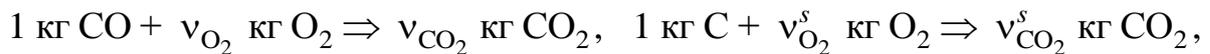
Эффективный коэффициент теплопроводности $k_{eff} = k_l + k_t + k_r$ есть сумма коэффициентов молекулярной, турбулентной и лучистой теплопроводности соответственно, где $k_l = c_p \mu_l / Pr$, $k_t = c_p \mu_t / Pr_t$, $Pr = Pr_t = 0.7$ – ламинарное и турбулентное числа Прандтля. В качестве модели переноса излучения рассматривается модель лучистой теплопроводности, подробно описанная в [2], в которой плотность потока энергии излучения определяется формулой

$W_r = -k_r \nabla T$, $k_r = 16\sigma l_s T^3/3$, l_s – длина пробега излучения, σ – постоянная Стефана–Больцмана.

Эффективный коэффициент диффузии $D_{eff} = \mu_l/\rho Sc + \mu_t/\rho Sc_t$, где $Sc = Sc_t = 0.7$ – ламинарное и турбулентное числа Шмидта.

4. Модель горения в газовой фазе

Модель горения в газовой фазе состоит из двух одностадийных необратимых брутто-реакций горения СО дисперсной сажи:



где $\nu_i, \nu_i^s, i = \overline{1,5}$ – массовые стехиометрические коэффициенты газовой реакции и реакции горения дисперсной сажи соответственно. Скорость турбулентного горения описывается моделью дробления вихрей (Eddy Breakup model) [10-13]. Массовые скорости горения СО и сажи выражаются формулами (в качестве индекса i используются химические формулы компонент)

$$W = \rho A \frac{\varepsilon}{k} \min \left(C_{CO}, \frac{C_{O_2}}{\nu_{O_2}}, \frac{BC_{CO_2}}{\nu_{CO_2}} \right),$$

$$W_s = \rho A \frac{\varepsilon}{k} \min \left(C_s, \frac{C_{O_2}}{\nu_{O_2}^s}, \frac{C_s \nu_{O_2}^s}{C_s \nu_{O_2}^s + C_{CO} \nu_{O_2}} \right),$$

где $A = 4, B = 0.5$. Тепловыделение в газовой фазе происходит за счет горения СО и дисперсной сажи и равно $q_1 W + q_s W_s$, где q_1, q_s – теплота сгорания газа и сажи соответственно; W – скорость химической реакции горения газа; W_s – скорость выгорания сажи; $W_i, W_i^s, i = \overline{1,5}$ – скорости образования или потребления компонент газовой фазы в соответствующих реакциях, которые выражаются через скорости W, W_s и массовые стехиометрические коэффициенты как $W_i = \pm \nu_i W, W_i^s = \pm \nu_i^s W_s$, где знак «плюс» берется для продуктов реакции, знак «минус» – для топлива и окислителя, при этом $\nu_{CO} = 1$ по определению W .

5. Химические процессы в твердой и дисперсной фазах

В качестве базовых химических реакций в твердой фазе будем рассматривать реакции пиролиза и горения коксика. Скорости этих реакций будем описывать по закону Аррениуса.

Скорость реакции пиролиза ЛГМ описывается формулой

$R_0 = \rho_1 \phi_1 k_0 \exp(-E_0/(RT_1))$ [7]. Введем обозначения: $\alpha_i, \alpha_s, \alpha_c, \alpha_{as}$ – доля i -го газа, дисперсной сажи, коксика и золы, образующихся при пиролизе, при этом для кислорода и азота $\alpha_2 = \alpha_5 = 0$. Тогда образование газов, сажи, коксика и золы в результате пиролиза описывается членами $Q_1 = \alpha_1 R_0$, $Q_3 = \alpha_3 R_0$, $Q_4 = \alpha_4 R_0$, $Q_s = \alpha_s R_0$, $\alpha_c R_0$, $R_{\phi_1} = -R_0$, $R_{\phi_3} = \alpha_{as} R_0$ соответственно, а скорость выгорания ЛГМ: $R_{\phi_1} = -R_0$.

Скорость горения коксика описывается формулой $R_c = \rho C_2 k_c \exp(-E_c/(RT))$ [7]. При горении коксика со скоростью R_c также происходят выгорание кислорода в газовой фазе и образование CO_2 , который поступает в газовую фазу. Тогда $Q_2 = -R_c$, $Q_3 = \alpha_3 R_0 + R_c$, $R_{\phi_2} = \alpha_c R_0 - R_c$.

Изменение массы дисперсной фазы описывается формулой $R_d = \alpha_d R_0 - R_c$, где первое слагаемое описывает образование дисперсных частиц в результате пиролиза, второе – их выгорание.

Тепловыделение при горении коксика описывается формулой $Q_{T_1} = q_c \phi_2 R_c$, где q_c – теплота сгорания углерода. Тепловыделение при горении дисперсных частиц описывается формулой $Q_{T_d} = q_c \phi_d R_c$.

6. Поток вещества, импульса и энергии через верхнюю и нижнюю границы слоя ЛГМ

Потоки вещества, импульса и энергии через верхнюю и нижнюю границы слоя ЛГМ $J_\rho, \mathbf{J}_V, J_E, \mathbf{J}_C, J_s, J_d$ описываются формулой

$$\mathbf{J}_\Phi = \frac{\Phi w|_{z=h_2}}{h} - \frac{\Phi w|_{z=h_1}}{h}, \quad \Phi = (\rho, \rho u, \rho v, \rho E, \rho C, \rho C_s)^T,$$

где h_1, h_2 – высоты верхней и нижней границ слоя ЛГМ; h – толщина слоя ЛГМ, $h = h_2 - h_1$, вертикальная скорость w на верхней и нижней границах слоя ЛГМ определяется полуэмпирической формулой [7] $w|_{z=h_2} = (g(T - T_2)h/T_2)^{1/2}$, T_2 – температура над верхней границей слоя ЛГМ (для верхнего яруса леса – температура невозмущенной атмосферы). В рассматриваемой одноярусной модели леса $w|_{z=h_1} = 0$. Для многоярусной модели значение $w|_{z=h_1}$ нужно взять равным значению $w|_{z=h_2}$ для нижнего яруса.

7. Межфазный теплообмен и обмен лучистой энергией

Член $\alpha(T_1 - T)$ описывает межфазный теплообмен, где α – коэффициент теплообмена; $\sigma(\varepsilon_1 T_1^4 - \varepsilon T^4)$ – межфазный обмен лучистой энергией; ε –

коэффициент поглощения излучения в газовой фазе с учетом дисперсной сажи; α_1 – коэффициент поглощения излучения в твердой фазе.

Выпадение горящих дисперсных частиц из приземного слоя атмосферы моделируется с помощью генератора случайных чисел, а члены $\alpha_1(T_d - T)$, $\alpha_2(T_d - T_1)$, $\sigma(\alpha_d T_d^4 - \alpha T^4)$, $\sigma(\alpha_d T_d^4 - \alpha_1 T_1^4)$ являются точечными источниками энергии в газовой и твердой фазах, действующими в точках выпадения горящих частиц до их полного выгорания, α_d – коэффициент поглощения излучения дисперсных частиц.

Обмен тепловой энергией f_Γ и обмен лучистой энергией $f_{\Gamma R}$ на верхней и нижней границах слоя ЛГМ происходят по тем же законам, что и межфазный обмен тепловой и лучистой энергией соответственно.

8. Граничные и начальные условия

Граничные условия для системы (1)-(14) нужно задать 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

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

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.

Заключение

Разработана двумерная трехфазная математическая модель лесных пожаров, описывающая распространение фронта пожара с учетом основных физико-химических процессов, характерных для протекания реальных лесных пожаров, в том числе неоднородного распределения ЛГМ на местности, наличия препятствий для распространения огня, наличия ветра, а также

учитывающая механизм распространения пожара с помощью горящих частиц, переносимых ветром над слоем ЛГМ. В дальнейшем будет проведена численная реализация построенной модели на многопроцессорных вычислительных комплексах с применением апробированного ранее для двумерной двухфазной модели [1-6] метода расщепления системы уравнений по физическим процессам и конечно-разностной аппроксимацией полученных подсистем.

Список литературы

1. 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.
2. Кулешов А.А. Математическое моделирование лесных пожаров // Мат. моделирование. 2002. Т. 14. № 11. С. 33-42.
3. Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е. Математическое моделирование лесных пожаров с применением многофазных моделей // Мат. моделирование. 2005. Т. 17. № 1. С. 34-42.
4. Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е. Математическое моделирование лесных пожаров с применением многопроцессорных ЭВМ // Мат. моделирование. 2008. Т. 20. № 11. С. 28-34.
5. Kuleshov A.A., Myshetskaya E.E. Numerical simulation of forest fires based on 2D model // WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer. 2011. V. 6. Issue 4. P. 91-100.
6. Kuleshov A.A., Chetverushkin B.N., Myshetskaya E.E. Parallel computing in forest fire two-dimension modeling // Computers and Fluids. 2013. V. 80. P. 202-206.
7. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука СО. 1992. 404 с.
8. Liang Li, Xiaofeng Li, Borong L., Yinghin Z. Improved (k-ε) two-equation turbulence model for canopy flow // Atmospheric Environment. 2006. V. 40. P. 762-770.
9. Hiraoka H., Ohashi M. A (k-ε) turbulence closure model for plant canopy flows // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2008. V. 96. P. 2139-2149.
10. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On the mathematical modelling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // 16th Symp. (Int.) on Combustion, Pittsburgh, PA, The Combustion Inst. 1976. P. 711-729.

11. Galant S., Grouset D., Martinez G., Micheau P., Allemand J.B. Three-dimensional steady parabolic calculations of large-scale methane turbulent diffusion flames to predict flare radiation under cross-wind conditions // 20th Symp. (Int.) on Combustion, Pittsburgh, PA, The Combustion Institute. 1984. P. 531-540.
12. Makhviladze G.M., Roberts J.P., Yakush S.E. Combustion of two-phase hydrocarbon fuel clouds released into the atmosphere // Combustion and Flame. 1999. V. 118. P. 583-605.
13. Makhviladze G.M., Yakush S.E. Modelling of formation and combustion of accidentally released fuel clouds. Hazards XVIII: Process safety – sharing best practice // IChemE Symp. Series. 2004. V. 150. P. 270-282.
14. Померанцев В.В. Основы практической теории горения. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. 309с.

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение | 3 |
| 1. Фазовый и компонентный состав среды | 4 |
| 2. Система уравнений модели | 4 |
| 3. Турбулентное замыкание модели | 7 |
| 4. Модель горения в газовой фазе | 8 |
| 5. Химические процессы в твердой и дисперсной фазах | 8 |
| 6. Поток вещества, импульса и энергии через верхнюю и нижнюю границы слоя ЛГМ | 9 |
| 7. Межфазный теплообмен и обмен лучистой энергией | 9 |
| 8. Граничные и начальные условия | 10 |
| Заключение | 10 |
| Список литературы | 11 |