



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. А. Кулешов, Е. Е. Мышецкая, С. Е. Якуш, Моделирование распространения лесных пожаров на основе модифицированной двумерной модели, *Матем. моделирование*, 2016, том 28, номер 12, 20–32

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.142.136.226

13 сентября 2024 г., 09:20:26



МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ

© 2016 г. А.А. Кулешов¹, Е.Е. Мышецкая¹, С.Е. Якуш²

¹ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва

² Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва
andrew_kuleshov@mail.ru

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 15-01-03445.

Рассматривается модифицированная двумерная модель лесных пожаров. Модель построена путем осреднения исходных трехмерных уравнений двухфазной среды по высоте слоя лесных горючих материалов. Для описания турбулентности используется $k-\varepsilon$ модель с введением дополнительных членов генерации и диссипации турбулентной кинетической энергии в лесном массиве. 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.

Приведенные результаты демонстрационных расчетов показывают, что предложенная модель дает качественно правильную картину образования и распространения фронта пожара в условиях неоднородного распределения запасов лесных горючих материалов, наличия препятствий для распространения огня и влияния ветра.

Модель может быть использована для прогнозирования распространения фронта пожара в реальном времени, для получения экспертных оценок развития чрезвычайных ситуаций, связанных с лесными пожарами, и оценки ущерба от пожаров.

Ключевые слова: лесные пожары, модифицированная двумерная математическая модель, численное моделирование.

NUMERICAL SIMULATION OF FOREST FIRE SPREAD BASED ON MODIFIED 2D MODEL

A.A. Kuleshov¹, E.E. Myshetskaya¹, S.E. Yakush²

¹ Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences

² Ishlinskii Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences

A modified two-dimensional two-phase mathematical model of forest fires spread is considered. The model is based on the averaging of three-dimensional equations of two-phase medium over the height of the forest fuel (FF) layer, it includes the $(k-\varepsilon)$ turbulence model with additional turbulence production and dissipation terms in the forest layer and the Eddy Break-up Model for the combustion rate in the gas phase.

The model elaborated can serve to carry out numerical simulation of the forest fire front propagation in conditions of non-homogeneous forest fuel distribution, obstacles to the fire spread and the effects of wind. This model can be used for computation of the fire propagation in real time, for expert assessments of emergency situations and assess the damage caused by forest fires.

Key words: forest fires, modified two-dimension mathematical model, numerical simulation.

1. Введение

Математическое моделирование лесных пожаров является одной из самых сложных областей моделирования в силу многообразия и сложности физических процессов, протекающих в зоне пожара и в атмосфере над пожаром, влияния погодных условий, возможного распространения пожара на большой площади в течение длительного времени и других факторов.

В последние 20 лет эта область развивалась особенно интенсивно и было создано много различных моделей лесных пожаров. Условно эти модели можно разделить на две большие группы [1]. Первая группа моделей – эмпирические и полуэмпирические модели (Simple Fire Behavior Models), вторая группа – физически обоснованные модели (Complex Fire Behavior Models), построенные на законах сохранения механики сплошных сред.

Эмпирические модели относительно простые, они не учитывают многих физических процессов, происходящих в зоне пожара, но в то же время их программная реализация не требует больших вычислительных ресурсов и позволяет проводить расчеты распространения пожара в режиме реального времени. Такими моделями являются, в частности, модели конечных автоматов [2, 3], эмпирическая модель скорости распространения пожара [4-7], совместная модель пожар-атмосфера [8, 9], которая использует эмпирический алгоритм Ротермеля для распространения пожара [10, 11], а также ряд других моделей (см. [12]).

Физически обоснованные модели более сложные, они могут учитывать различные физические процессы, происходящие в зоне пожара [1, 13-26]. Эти модели могут быть многофазными по составу среды, и каждая фаза может содержать несколько компонент. Для численного моделирования лесных пожаров используются как двумерные, так и трехмерные модели. Созданные в последнее время трехмерные программы [20-22] требуют очень больших вычислительных ресурсов и с их помощью пока еще невозможно проводить расчеты распространения реальных лесных пожаров на большой площади и в течение длительного времени. Однако с помощью трехмерных моделей можно исследовать сложные физические эффекты, происходящие как в зоне пожара, так и в атмосфере над пожаром, например, образование когерентных структур в атмосферном слое над пожаром [21]. Ранее созданные двумерные модели описывали распространение пожара вдоль одного заданного направления в координатах (x, z) , или одинаково по всем горизонтальным направлениям в цилиндрических координатах (r, z) . В таких моделях нельзя задать неравномерное распределение лесных горючих материалов по площади и с их помощью невозможно было моделировать распространение реальных лесных пожаров.

В ранних работах авторов [23-27] была разработана физически обоснованная двумерная двухфазная модель распространения лесных пожаров. Модель основана на предложенном А.М.Гришиным [13] математическом описании лесного пожара как двухфазной реагирующей среды, а уравнения модели получены осреднением исходных трехмерных уравнений по высоте слоя лесных горючих материалов (ЛГМ). Эта модель не требует таких больших вычислительных ресурсов, как трехмерные модели и при использовании современных суперкомпьютеров с ее помощью можно проводить численное моделирование распространения лесных пожаров практически в режиме реального времени. Модель основана на фундаментальных физических законах сохранения массы, импульса и энергии и учитывает основные физические процессы, происходящие в зоне

пожара, которые важны для корректного описания распространения фронта пожара. Тем не менее в модели использовалось упрощенное описание турбулентного перемешивания. Кроме того, скорость тепловыделения при горении в газовой среде, от которой зависит скорость распространения огня, описывалась кинетическими формулами для химических реакций с константами, в задании которых была значительная доля неопределенности. В настоящей работе рассматривается двумерная модель с $(k-\varepsilon)$ моделью турбулентности, модифицированной путем включения дополнительных членов генерации и диссипации турбулентности в лесном массиве [28, 29]. 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 [30-33].

2. Постановка задачи

2.1. Фазовый и компонентный состав среды. В предлагаемой модели лес рассматривается как одноярусная двухфазная среда, состоящая из воздуха и летучих продуктов пиролиза и горения (газовоздушная или газовая фаза), а также из лесных горючих материалов и твердых продуктов пиролиза ЛГМ (твердая фаза). 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.

2.2. Система уравнений модели. Рассмотрим одноярусную модель лесного пожара в одном слое ЛГМ постоянной толщины и будем предполагать, что физико-химическими параметрами (истинная плотность, влагосодержание, теплотворная способность и т.д.) в этом слое ЛГМ постоянны. Система уравнений двумерной двухфазной 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 и подсистемы уравнений динамики массы компонент твердой фазы и ее энергии. Уравнения модели имеют следующий вид:

газовая фаза:

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} E + \phi p \mathbf{V}) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + \\ + \alpha (T_1 - T) + \sigma (\varepsilon_1 T_1^4 - \varepsilon T^4) + f_\Gamma + f_{\Gamma R} + q_1 W + q_s W_s - J_E, \end{aligned} \quad (3)$$

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

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

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

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

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

твердая фаза:

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

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{j=1}^3 \rho_j^0 \phi_j c_{pj} T_1 = -\alpha (T_1 - T) - \sigma (\varkappa_1 T_1^4 - \varkappa T^4) + Q_{T_1}; \quad (10)$$

нормировочные и балансные соотношения:

$$\phi + \sum_{j=1}^3 \phi_j = 1, \quad \sum_{i=1}^5 C_i + C_s = 1, \quad \sum_{i=1}^5 (Q_i + W_i) + Q_s - W_s = Q, \quad \sum_{j=1}^3 R_{\phi_j} = -Q. \quad (11)$$

Система уравнений (1)-(11) 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; ρ_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 СО, 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.

Заметим, что, как показали численные эксперименты с созданной ранее авторами моделью лесных пожаров [23-27], влияние членов, описывающих изменение импульса и энергии, обусловленное изменением объемных долей фаз в модели, пренебрежимо мало, и эти члены в настоящей модели не учитываются.

2.3. 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 [28,29]. 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 $\mu_t = c_\mu \rho k^2 / \varepsilon$;

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

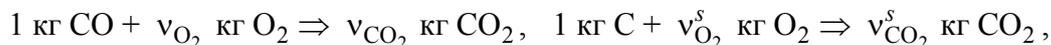
$$P_k = \frac{1}{2} c_d s \rho |\mathbf{V}|^3, \quad P_\varepsilon = c_{\varepsilon 1} c_d s \rho |\mathbf{V}|^3 \frac{\varepsilon^0}{k^0}, \quad L_k = 2 c_d s \rho |\mathbf{V}| k, \quad L_\varepsilon = 4 c_{\varepsilon 2} c_d s \rho |\mathbf{V}| \varepsilon,$$

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 [28,29]: $c_{\varepsilon 1} = 1.8$, $c_{\varepsilon 2} = 0.6$; 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 [23], в которой плотность потока энергии излучения определяется формулой $\mathbf{W} = -k_r \nabla T$, $k_r = 16 \sigma l_s T^3 / 3$, 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.

2.4. 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 газофазной реакции и реакции горения дисперсной сажи соответственно. Скорость турбулентного горения описывается моделью дробления вихрей (Eddy Breakup model) [30-33]. Массовые скорости горения СО и сажи выражаются формулами (в качестве индекса i используются химические формулы компонент)

$$W = \rho A \frac{\varepsilon}{k} \min \left(C_{\text{CO}}, \frac{C_{\text{O}_2}}{\nu_{\text{O}_2}}, \frac{BC_{\text{CO}_2}}{\nu_{\text{CO}_2}} \right), \quad W_s = \rho A \frac{\varepsilon}{k} \min \left(C_s, \frac{C_{\text{O}_2}}{\nu_{\text{O}_2}^s}, \frac{C_s \nu_{\text{O}_2}^s}{C_s \nu_{\text{O}_2}^s + C_{\text{CO}} \nu_{\text{O}_2}} \right),$$

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 по газовому топливу; 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 $\nu_{\text{CO}} = 1$ по определению W .

2.5. Химические процессы в твердой фазе. 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 $R_0 = \rho_1 \phi_1 k_0 \exp(-E_0/(RT_1))$ [13]. 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, ЛГМ, 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.

Скорость горения коксика описывается формулой $R_c = \rho C_2 k_c \exp(-E_c/(RT))$ [13]. При горении коксика со скоростью R_c также происходит выгорание кислорода в газовой фазе и образование CO_2 , который поступает в газовую фазу. Тогда $Q_2 = -R_c, Q_3 = \alpha_3 R_0 + R_c, R_{\phi_2} = \alpha_c R_0 - R_c$.

Тепловыделение при горении коксика определяется формулой $Q_{T_1} = q_c \phi_2 R_c$, где q_c – теплота сгорания углерода.

2.6. Поток вещества, импульса и энергии через верхнюю и нижнюю границы слоя ЛГМ. Поток вещества, импульса и энергии через верхнюю и нижнюю границы слоя ЛГМ $J_p, \mathbf{J}_v, J_E, \mathbf{J}_C, J_s$ 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 [13] $w|_{z=h_2} = (g(T - T_2)h/T_2)^{1/2}$, 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.

2.7. 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; ε_1 – коэффициент поглощения излучения в твердой фазе.

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

2.8. Граничные и начальные условия. Граничные условия для системы (1)-(11) 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

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

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, C^0, C_s^0) , начальная скорость равна нулю $\mathbf{V}^0 = 0$, 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.

При задании начальных данных для численного моделирования реальных лесных пожаров большую трудность представляет задание объемной доли ЛГМ для рассматриваемых лесных массивов, так как систематического обследования лесных массивов специалистами по лесному хозяйству практически не проводится. Однако с развитием современных технологий эти данные могут быть получены с помощью специальных математических методов и алгоритмов обработки данных аэрокосмического мониторинга Земли [34].

3. Краткое описание численных методов и алгоритма решения задачи

В задаче численного моделирования реальных лесных пожаров, распространяющихся на больших площадях и достаточно продолжительных по времени, возникает необходимость обработки больших массивов данных, которая может быть проведена только с использованием достаточно мощных вычислительных систем с параллельной архитектурой. При этом для эффективного применения таких систем алгоритмы и численные методы решаемой задачи должны обладать высокой степенью параллелизма. С этой точки зрения наилучшим подходом является примененный в ранних версиях модели [24-27] алгоритм расщепления по физическим процессам с использованием явных конечно-разностных схем для решения полученных подсистем. Аналогичный подход и методы были применены для численной реализации системы (1)-(11). Для аппроксимации рассматриваемой системы вводим дискретизацию по времени $t_{n+1} = t_n + \Delta t$. На каждом шаге по времени $[t_n, t_{n+1}]$ исходная система уравнений расщепляется на подсистемы, каждая из которых описывает тот или иной физический процесс (этап), или несколько процессов, имеющих однотипное математическое описание. Перечислим основные этапы решения рассматриваемой задачи.

Этап 1. Перенос газовой фазы.

Этап 2. Учет турбулентной вязкости, теплопроводности и диффузии.

Этап 3. Учет выбывания субстанции на верхней и нижней границах слоя ЛГМ.

Этап 4. Учет межфазного трения.

Этап 5. Учет влияния ветра.

Этап 6. Учет химических реакций.

Этап 7. Учет межфазного теплообмена и обмена лучистой энергией.

На каждом этапе соответствующая подсистема уравнений решалась конечно-разностным методом на прямоугольной сетке. Для аппроксимации применялись явные разностные схемы. Например, для решения подсистемы уравнений переноса газовой фазы на этапе 1 использовалась явная TVD-схема, подробно описанная в [26].

При создании программного комплекса для многопроцессорной ЭВМ за основу был взят параллельный программный комплекс, созданный для ранней версии модели [25-27], написанный на языке FORTRAN с применением библиотеки MPI. Ниже приведены результаты численного моделирования процесса распространения лесных пожаров на многопроцессорном вычислительном комплексе МВС-15000ВМ.

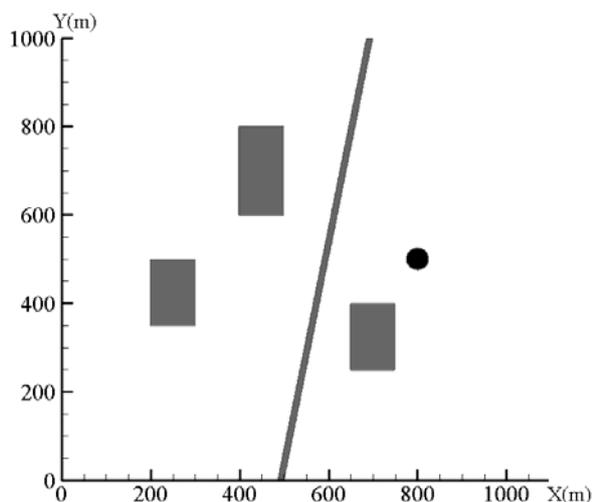
4. Результаты численного моделирования

На рис. 1, 2 представлены результаты демонстрационных расчетов на многопроцессорной ЭВМ по двумерной двухфазной модели лесных пожаров (1)–(11) в условиях неоднородного распределения запасов ЛГМ. Сеточная область 1000×1000 узлов. В расчетах использовалось до 1600 процессоров.

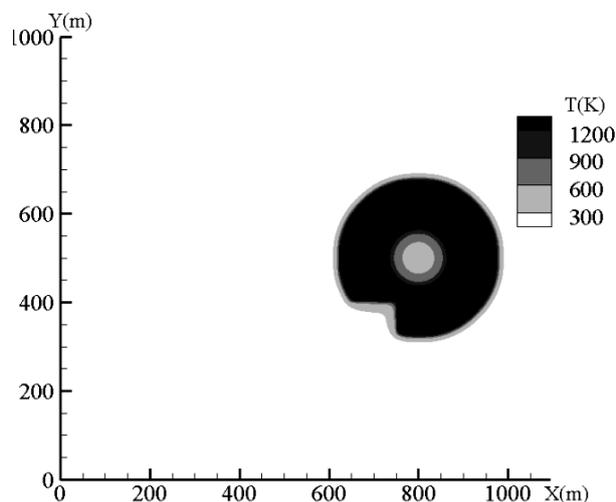
На рис. 1а в начальный момент времени схематично изображены поляны прямоугольной формы и дорога, на которых отсутствует растительность. Источник пожара имеет форму круга. Ветер отсутствует. На рис. 1b видно выгорание ЛГМ и образование температурного фронта пожара. Температура за задней кромкой фронта постепенно падает. Фронт пожара не может преодолеть дорогу шириной 8м и распространяется вдоль нее, обтекая поляну, расположенную справа от дороги (см. рис. 1c, d). На рис. 2 представ-

лены результаты расчета с теми же начальными условиями, но при наличии ветра, который имеет скорость $V_w = -2.0$ м/с. Фронт пожара обтекает поляны и распространяется через дорогу такой же ширины (8 м).

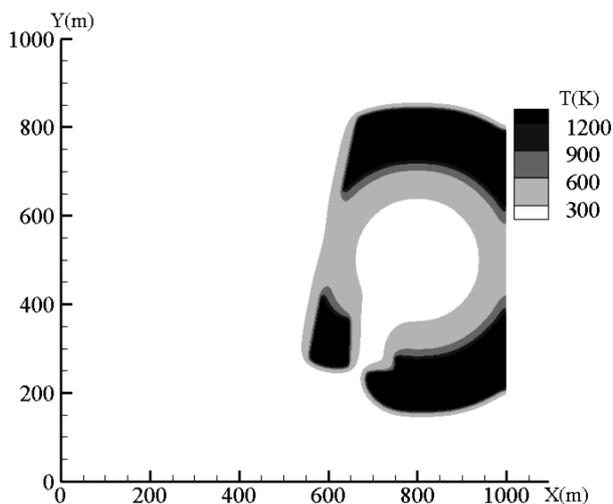
a) $t = 0$ с



b) $t = 1000$ с



c) $t = 1500$ с



d) $t = 2750$ с

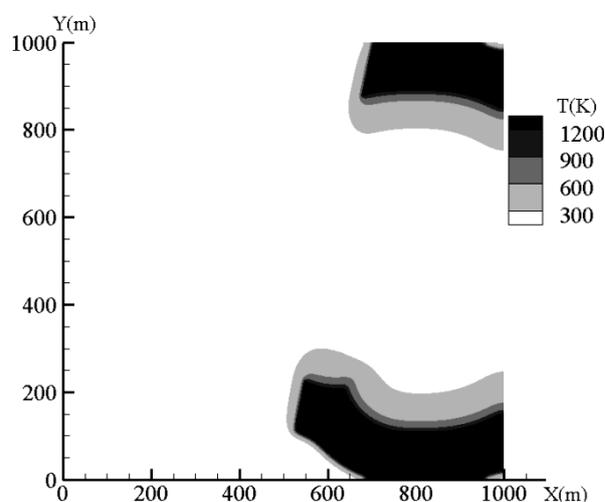


Рис.1. Температурный фронт пожара в отсутствие ветра не преодолевает дорогу шириной 8м.

Было численно исследовано взаимодействие фронта пожара с препятствием – дорогой, развернутой под разными углами к набегающему фронту пожара. На рис.3b,c при отсутствии ветра фронт пожара не может преодолеть дорогу шириной 7м, развернутую под углом 180° к фронту пожара. На рис.3e,f также в отсутствие ветра фронт пожара преодолевает дорогу шириной 7м, развернутую под углом 90° к фронту пожара, что объясняется более сильным прогревом узкого сектора ЛГМ за дорогой.

Оценка ускорения и эффективности применяемых параллельных алгоритмов.

Были проведены расчеты ускорения и эффективности применяемых параллельных алгоритмов. В табл.1 представлено время вычислений в минутах (t_{Np}) в зависимости от количества процессоров (Np) для описанного выше численного эксперимента с дорогой,

расположенной под углом 90° к фронту пожара; длительность процесса распространения пожара 4000 с, количество шагов, сетка 1000×1000 узлов.

Таблица 1.

N_p	1	25	100	400	625	1600
t_{N_p} (min)	950	111	22	3.5	3	5

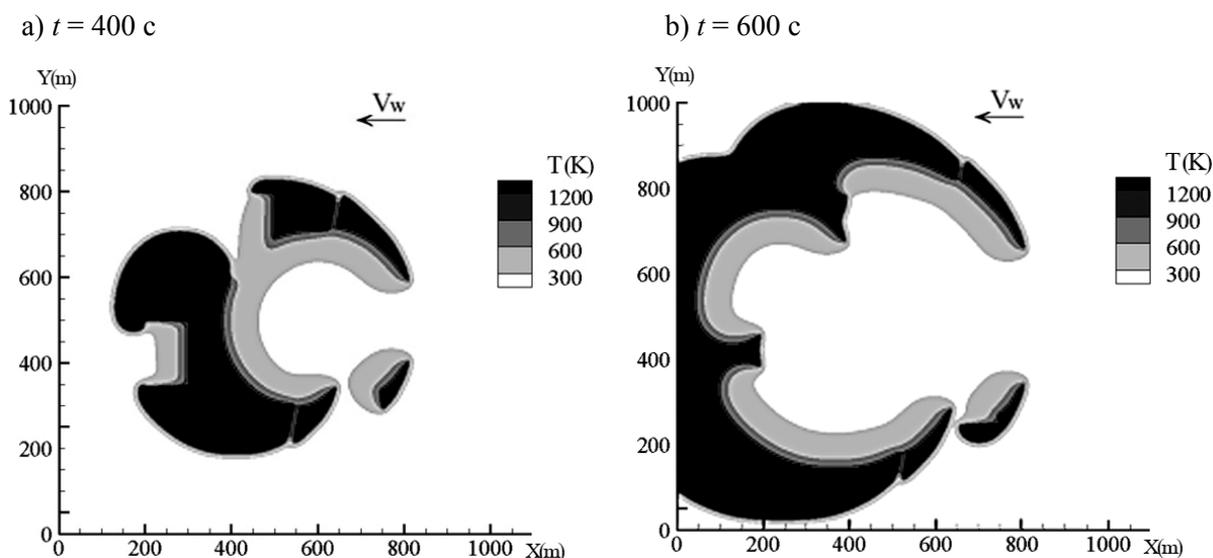


Рис.2. Температурный фронт пожара обтекает поляны и преодолевает дорогу шириной 8 м при наличии ветра $V_w = (-2.0)$ м/с.

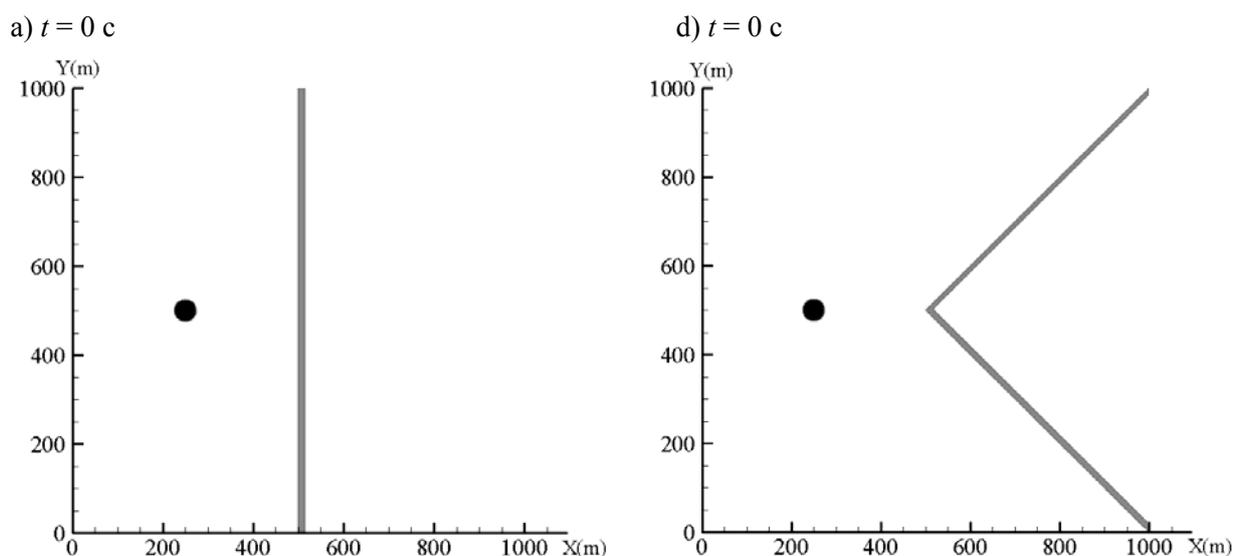


Рис.3а,д.

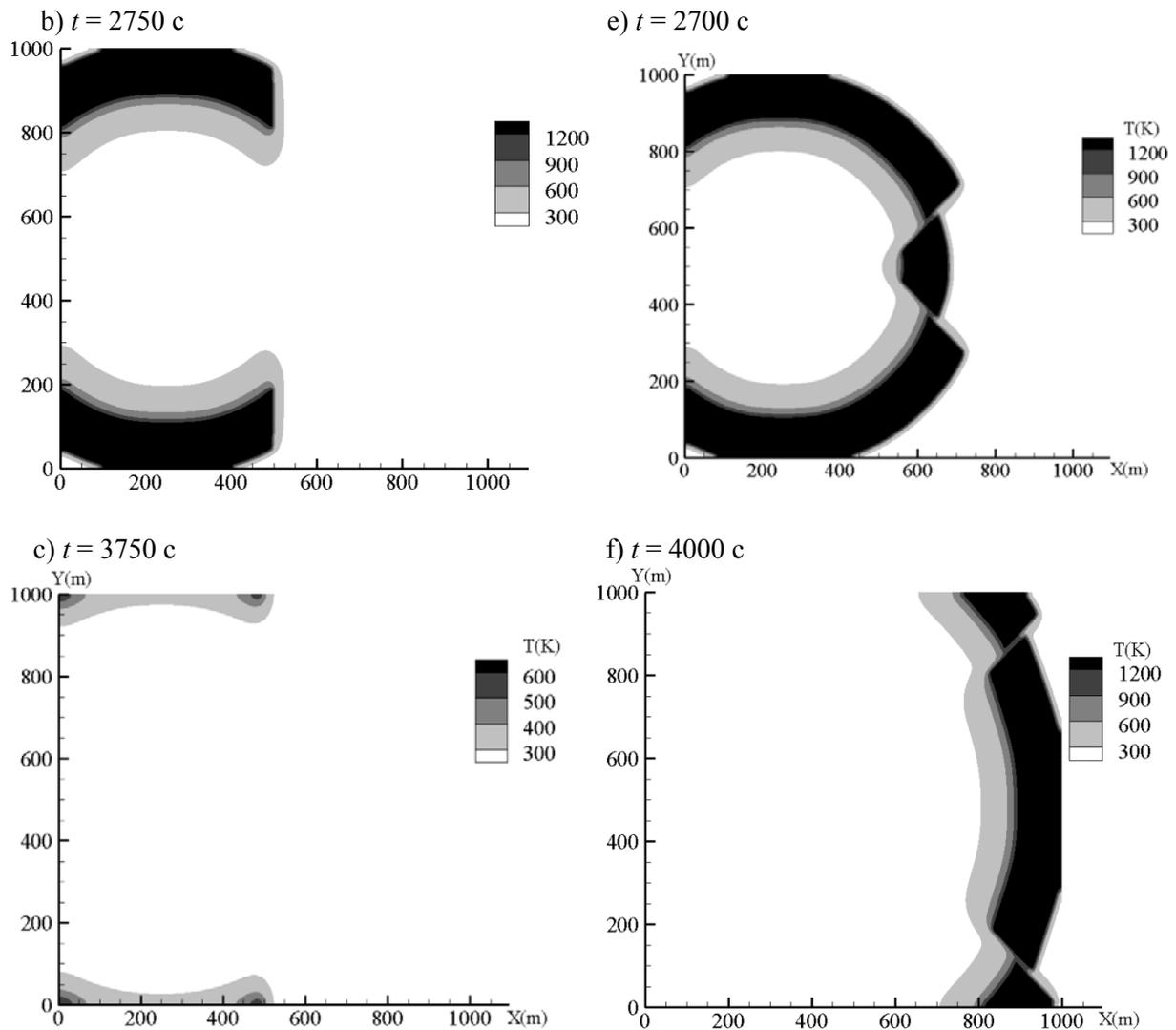


Рис.3. Результаты расчетов взаимодействия фронта пожара с дорогами, расположенными под углом 180° (а, б, с) и 90° (д, е, ф) к фронту пожара.

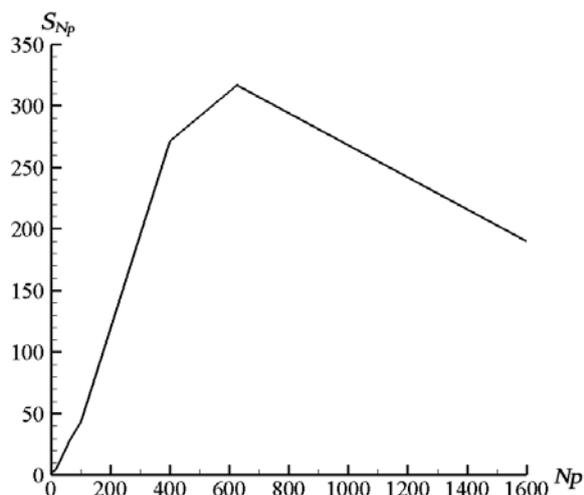


Рис.4. Ускорение вычислений в зависимости от количества процессоров (сетка 1000×1000 узлов).

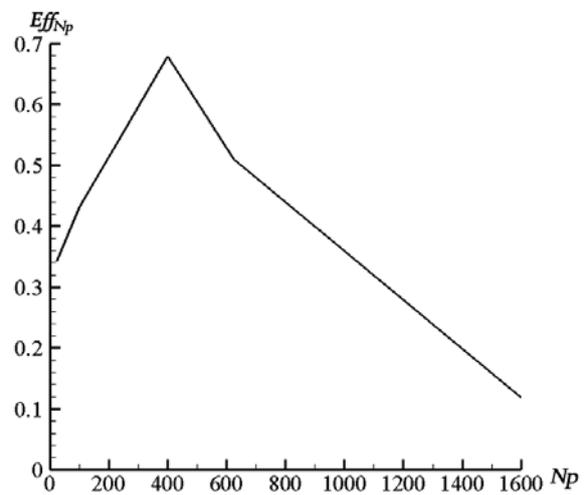


Рис.5. Эффективность вычислений в зависимости от количества процессоров (сетка 1000×1000 узлов).

На рис.4 представлен график ускорения параллельного алгоритма $S_{Np} = t_1 / t_{Np}$. На рис.5 представлен график эффективности вычислений $Eff_{Np} = S_{Np} / Np$. На этих графиках видно, что при большом количестве (более 400) процессоров ускорение и эффективность падают, что связано с увеличением числа обменов данными.

5. Заключение

Приведенные результаты демонстрационных расчетов показывают, что предложенная модель дает качественно правильную картину образования и распространения фронта пожара в условиях неоднородного распределения запасов лесных горючих материалов, наличия препятствий для распространения огня и влияния ветра.

Модель может быть использована для прогнозирования распространения фронта пожара в реальном времени, для получения экспертных оценок развития чрезвычайных ситуаций, связанных с лесными пожарами и оценки ущерба от пожаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *W.E. Mell, R.J. McDermott, G.P. Forney.* Wildland fire behavior modeling: perspectives, new approaches and applications // Proceedings of 3rd Fire Behavior and Fuels Conf., October 25-29, 2010, Spokane, Washington, USA, Pub. by the Int. Association of Wildland Fire, Birmingham, Alabama, USA.
2. *G.L. Achtemeier.* Field validation of a free-agent cellular automata model of fire spread with fire-atmosphere coupling // International Journal of Wildland Fire, 2013, v.22, №2, p.148-156.
3. *H.A. Perryman, C.J. Dugaw, J. Morgan Varner and D.L. Johnson.* A cellular automata model to link surface fires to firebrand lift-off and dispersal // International Journal of Wildland Fire, 2013, v.22, №4, p.428-439.
4. *M.E. Alexander, M.G. Cruz.* Evaluating a model for predicting active crown fire rate of spread using wildfire observations // Canadian Journal of Forest Research, 2006, v.36, p.3015-3028.
5. *E. Alexander, M.G. Cruz.* Interdependencies between flame length and fireline intensity in predicting crown fire initiation and crown scorch height // International Journal of Wildland Fire, 2012, v.21, №2, p.95-113.
6. *M.G. Cruz, M.E. Alexander.* Uncertainty associated with model predictions of surface and crown fire rates of spread // Environmental Modelling & Software, 2013, v.47, p.16-28.
7. *M.G. Cruz, J.S. Gould, M.E. Alexander, A.L. Sullivan, W.L. McCaw, S. Matthews.* Empirical-based models for predicting head-fire rate of spread in Australian fuel types // Australian Forestry, 2015, v.78, p.118-158.
8. *T.L. Clark, J. Coen and D. Lathman.* Description of a coupled atmospheric–fire model // International Journal of Wildland Fire, 2004, v.13, №1, p.49-63.
9. *J.L. Coen.* Modeling wildland fires: A description of the coupled atmosphere – wildland fire environment model (CAWFE) // NCAR Technical Notes, 2013.
10. *R.C. Rothermel.* A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels // USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper INT-115. Ogden, 1972.
11. *P.L. Andrews, M.G. Cruz and R.C. Rothermel.* Examination of the wind speed limit function in the Rothermel surface fire spread model // International Journal of Wildland Fire, 2013, v.22, №7, p.959-969.
12. *J.B. Filippi, V. Mallet and B. Nader.* Evaluation of forest fire models on a large observation database // Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, v.14, p.3077-3091.
13. *А.М. Гришин.* Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука СО, 1992, 404 с.;
А.М. Grishin. Matematicheskoe modelirovanie lesnykh pozharov i novye sposoby borby s nimi. – Novosibirsk: Nauka SO, 1992, 404 s.

14. *W. Mell, M.A. Jenkins, J. Gould and P. Cheney.* A physics-based approach to modelling grassland fires // *International Journal of Wildland Fire*, 2007, v.16, №1, p.1-22.
15. *E. Mueller, W. Mell and A. Simeoni.* Large eddy simulation of forest canopy flow for wildland fire modeling // *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, v.44, p.1535-1545.
16. *C.M. Hoffman, J. Canfield, R.R. Linn, W. Mell, C.H. Sieg, F. Pimont, J. Ziegler.* Evaluating crown fire rate of spread predictions from physics-based models // *Fire Technology*, First online: 05 June 2015, p.1-17. DOI:10.1007/s10694-015-0500-3.
17. *D. Morvan, J-L. Dupuy.* Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation // *Combustion and Flame*, 2004, v.138, p.199-210.
18. *J-L. Dupuy, D. Morvan.* Numerical study of a crown fire spreading toward a fuel break using a multiphase physical model // *International Journal of Wildland Fire*, 2005, v.14, №2, p.141-151.
19. *D. Morvan.* A numerical study of flame geometry and potential for crown fire initiation for a wildfire propagating through shrub fuel // *International Journal of Wildland Fire*, 2007, v.16, №5, p.511-518.
20. *G. Accary, O. Bessonov, D. Fougère, S. Meradji, D. Morvan.* Optimized parallel approach for 3D modelling of forest fire behavior // *Parallel Computing Technologies*, 2007, p.96-102.
21. *K. Gavrilov, G. Accary, D. Morvan, D. Lyubimov, S. Mèradji, O. Bessonov.* Numerical simulation of coherent structures over plant canopy // *Flow, Turbulence and Combustion*, 2011, v.86, №1, p.89-111.
22. *V. Perminov.* Mathematical modeling of crown forest fire spread // *Open Journal of Forestry*, 2012, v.2, №1, p.17-22.
23. *А.А. Кулешов.* Математическое моделирование лесных пожаров // *Мат. мод.*, 2002, т.14, №11, с.33-42;
A.A. Kuleshov. Matematicheskoe modeli lesnykh pozharov // *Mat. mod.*, 2002, t.14, №11, s.33-42.
24. *А.А. Кулешов, Е.Е. Мышецкая.* Математическое моделирование лесных пожаров с применением многофазных моделей // *Мат. моделирование*, 2005, т.17, №1, с.34-42;
A.A. Kuleshov, E.E. Myshetskaia. Matematicheskoe modelirovanie lesnykh pozharov s primeneniem mnogofaznykh modelei // *Mat. modelirovanie*, 2005, t.17, №1, s.34-42.
25. *А.А. Кулешов, Е.Е. Мышецкая.* Математическое моделирование лесных пожаров с применением многопроцессорных ЭВМ // *Матем. моделирование*, 2008, т.20, № 11, с.28-34;
англ. пер.: *A.A. Kuleshov, E.E. Myshetskaya.* Mathematical simulation of forest fires using multi-processor computers // *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2009, v.1, №4, p.629-634.
26. *A.A. Kuleshov, E.E. Myshetskaya.* Numerical simulation of forest fires based on 2D model // *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*, 2011, v.6, Issue 4, p.91-100.
27. *A.A. Kuleshov, B.N. Chetverushkin, E.E. Myshetskaya.* Parallel computing in forest fire two-dimension modeling // *Computers and Fluids*, 2013, v.80, p.202-206.
28. *Li Liang, Li Xiaofeng, L. Borong, Z. Yinghin.* Improved (k-ε) two-equation turbulence model for canopy flow // *Atmospheric Environment*, 2006, v.40, p.762-770.
29. *H. Hiraoka, M. Ohashi.* A (k-ε) turbulence closure model for plant canopy flows // *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, v.96, p.2139-2149.
30. *B.F. Magnussen, B.H. Hjertager.* 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.
31. *S. Galant, D. Grouset, G. Martinez, P. Micheau, J.B. Allemand.* 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.
32. *G.M. Makhviladze, J.P. Roberts, S.E. Yakush.* Combustion of two-phase hydrocarbon fuel clouds released into the atmosphere // *Combustion and Flame*, 1999, v.118, p.583-605.
33. *G.M. Makhviladze, S.E. Yakush.* 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.
34. *V.V. Kozoderov, E.V. Dmitriev, A.A. Sokolov.* Improved technique for retrieval of forest parameters from hyperspectral remote sensing data // *Optics Express*, 2015, v.23, №24, p.A1342-A1353.