

УДК: 536.46:536

Математическое моделирование распространения степного пожара

Н. А. Асылбаев

Стерлитамакская государственная педагогическая академия,
Россия, 453103, р. Башкортостан, Стерлитамак, пр. Ленина, 37

E-mail: moljan@mail.ru

Получено 20 апреля 2010 г.

Методом математического моделирования на основе метода крупных частиц исследуется динамика распространения пожара в однородном степном массиве.

Ключевые слова: моделирование, степной пожар

Mathematical modeling of steppe fires

N. A. Asylbaev

Sterlitamak State Pedagogical University, Lenin st., 37, 453103, Sterlitamak, Bashkortostan, Russia

Abstract. – We consider the two-dimensional mathematical model of wildfire. Numerical solution algorithm based on the method of large particles was developed for this model.

Keywords: modeling, steppe fires

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2010, vol. 2, no. 4, pp. 377–384 (Russian).

Введение

Степная зона является одним из основных биомов суши. Для зоны степей характерен жаркий и засушливый климат в течение большей части года. В настоящее время степные пожары стали обычным явлением. Сухая трава загорается, а начавшийся пожар быстро расширяет фронт и идет полосой в несколько десятков километров ширины со скоростью 7 м/с. Ширина волны фронта горения при его высоте в 2–3 м составляет не более 1 метра. При степных пожарах гибнут молодые деревца, поэтому степные пожары приостанавливают наступление леса на степь [Немков, Сапига, 2002]. Таким образом, степные пожары наносят огромный ущерб пастбищам, степной растительности и хозяйственным объектам России.

Модель

Рассмотрим распространение степного пожара, полагая, что органическая масса степи в соответствии с моделью, принятой в [Гришин, 1992], представляет собой многофазную реакционноспособную пористую сплошную среду, состоящую из сухого органического вещества, воды в жидкокапельном состоянии, конденсированных продуктов пиролиза, обогащенных углеродом, минеральной части (зола), газовой и дисперсной фаз. Будем считать, что и другие горючие компоненты, входящие в состав летучих продуктов пиролиза, можно моделировать одним эффективным горючим газом с реакционными свойствами оксида углерода [Гришин, 1992; Гришин, 2004], а CO_2 и другие инертные компоненты – эффективным продуктом реакций, получая, таким образом, газовую фазу, состоящую из трех компонентов: окислителя O_2 , горючего газа (в качестве эффективного горючего газа принимаем CO как преобладающего среди горючих компонентов продуктов пиролиза) и CO_2 совместно с другими инертными компонентами газовой фазы. Перенос энергии от фронта горения к негорящему топливу в общем случае осуществляется путем кондукции, конвекции и излучения [Гришин, 1992; Гришин, 2004].

Для математического описания распространения степного пожара введем декартову систему координат; положим, что ось X направлена вдоль подстилающей органическую массу степи поверхности, ось Y – перпендикулярно оси X в плоскости подстилающей поверхности, ось Z – перпендикулярно осям X и Y . Будем полагать, что по направлению оси Y все параметры однородны. Тогда задачу о распространении степного пожара будем рассматривать в плоскости XOZ .

Пусть в момент $t = 0$ вблизи начала координат есть зона повышенной температуры, инициирующая степной пожар; требуется определить динамику распространения степного пожара для $t > 0$.

Для описания распространения степного пожара запишем уравнения в области степи, выражающие законы сохранения многокомпонентной реагирующей среды в дивергентной форме [Гришин, 1992]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} &= Q; \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho u w}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho_{sc_d} u \sqrt{u^2 + w^2} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'u'}) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{u'w'}); \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho u w}{\partial x} + \frac{\partial \rho w^2}{\partial z} &= -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho_{sc_d} w \sqrt{u^2 + w^2} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'w'}) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{w'w'}) - (\rho - \rho_0) g; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho c_p T u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho c_p T w) = \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \cdot c_p (\overline{u'T})) + \frac{\partial}{\partial z}(-\rho \cdot c_p (\overline{w'T})) +$$

$$+ q_5 R_5 (1 - \nu_5) - \alpha_v (T - T_s) + c_p T Q + k_{s,v} c_{p,s} (T_s - T) (1 - \alpha_c) R_{1s} + k_7 c_{p,7} (T_s - T) R_{2s}; \quad (3)$$

$$-\rho (\overline{u_i' u_j'}) = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \cdot K \cdot \delta_{i,j}, \quad i, j = 1, 2, \quad (4)$$

$$-\rho (\overline{u_i' T'}) = \Gamma_t \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad \Gamma_t = \frac{\mu_t}{Pr_t}, \quad Pr_t = 1;$$

$$K = \frac{C_\mu}{C_1^{3/2}} l^2 \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{g}{\theta} \frac{\partial (\theta - \theta_\infty)}{\partial z} Pr_t^{-1} \right\},$$

$$C_\mu = C_1 = 0.046;$$

$$\mu_t = \rho \cdot l^2 \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{g}{\theta} \frac{\partial (\theta - \theta_\infty)}{\partial z} Pr_t^{-1} \right\}^{1/2},$$

$$\theta = T \left(\frac{1000}{\rho} \right)^{c_p \frac{R}{\rho}}; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^4 \left(\rho_i \varphi_i c_{p,i} \frac{\partial T_s}{\partial t} \right) = q_3 R_{3s} - q_2 R_{2s} + \alpha_v (T - T_s) + q_5 R_5 \nu_5 + k_s (c U_R - 4 \sigma T^4); \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c}{3k_\Sigma} \frac{\partial U_R}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{c}{3k_\Sigma} \frac{\partial U_R}{\partial z} \right) = k_s (c U_R - 4 \sigma T_s^4) + Q_R \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_\alpha) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho C_\alpha u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho C_\alpha w) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial z} \right) + R_{5\alpha} \quad (8)$$

$$\alpha = \overline{1,2}, \quad \sum_{i=1}^4 C_\alpha = 1, \quad C_4 = C_4' = const;$$

$$\rho = \frac{p_e}{RT \sum_{i=1}^4 \frac{C_i}{M_i}}; \quad (9)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \quad \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1s} - \frac{M_c}{M_1} R_{3w}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0;$$

$$\varphi_5 = 1 - \sum_{i=1}^4 \varphi_i; \quad (10)$$

$$Q = (1 - \alpha_c) R_{1s} + R_{2s} + \frac{M_c}{M_1} R_{3w};$$

$$Q_R = \begin{cases} 0.5 \sigma T^4 \left(1 + \frac{l \cos(\beta_2) - (x - x_0)}{\sqrt{(x - x_0)^2 + 2l(x - x_0) \cos(\beta_2)}} \right), & x \geq x_0; \\ 0, & x \leq x_0 \end{cases}$$

$$l = k \frac{\sqrt{m_3 \omega}}{\sin \beta_2}, \quad \beta_2 = \frac{\pi}{2} - \beta_1, \quad \beta_1 = \left(\frac{4u_e^2}{g\Delta_\Gamma} \right)^{1/4},$$

$$R_{1s} = k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad R_{2s} = k_2 \rho_2 \varphi_2 T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right),$$

$$R_{3w} = k_3 s_\sigma \rho C_1 \varphi_3 \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right);$$

$$R_5 = k_5 M_2 T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right) \times \begin{cases} x_1^{0.25} x_2, & x_1 \geq 0.05 \\ x_1 x_2, & x_1 < 0.05 \end{cases}, \quad x_i = \frac{C_i}{\sum_{k=1}^4 \frac{C_k}{M_k} M_i};$$

$$R_{51} = -R_{3w} - \frac{R_5 M_1}{2M_2}, \quad R_{52} = (1 - \alpha_c) v_\Gamma R_1 - R_5, \quad R_{54} = 0.$$

Здесь $c_{p,i}, \rho_i, \varphi_i$ – удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные доли i -ой фазы многофазной реагирующей среды ($i = 1$ – сухое органическое вещество, $i = 2$ – вода в жидкокапельном состоянии, $i = 3$ – конденсированные продукты пиролиза сухого органического вещества, $i = 4$ – минеральная часть (зола), $i = 5$ – газовая фаза); T – температура газовой фазы; T_s – температура твердой; C_α – массовые концентрации компонентов газовой фазы ($\alpha = 1$ – кислорода, $\alpha = 2$ – горючих компонентов продуктов пиролиза, $\alpha = 3$ – продуктов окисления горючих компонентов пиролиза, $\alpha = 4$ – инертных компонентов газовой фазы, не реагирующих продуктов пиролиза и водяного пара); u, w – проекции скорости на оси x и z соответственно; p, p_e – давление в потоке и в невозмущенной области соответственно; штрих приписывается пульсационным составляющим характеристикам турбулентного течения; l – длина пути перемешивания; K – кинетическая энергия турбулентности; Pr_Γ – турбулентное число Прандтля; R_{1s} – массовая скорость реакции пиролиза степного горючего материала (СГМ); R_{2s} – массовая скорость испарения влаги, связанной с СГМ; R_{3w} – массовая скорость горения конденсированных продуктов пиролиза; $R_{3s} = \frac{M_c}{M_1} R_{3w}$ – массовая скорость убыли коксика (углерода) в результате его горения; R_{51}, R_{52} – массовые скорости исчезновения и образования компонентов газовой фазы (кислорода и оксида углерода); R_5 – массовая скорость газовой фазной реакции окисления оксида углерода; $q_1 = 0, q_2 = 3 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}, q_3 = 1.2 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}, q_5 = 10^7 \text{ Дж/кг}$ – тепловые эффекты реакций и процессов пиролиза СГМ, испарения связанные с СГМ воды, горения кокса и окисления летучих горючих продуктов пиролиза; C_4 – неизменная концентрация инертных компонентов; Q – массовая скорость образования газовой фазы; α_v – коэффициент объемного (межфазного) теплообмена; $v_5 < 1$ – доля теплоты газовой фазной реакции окисления газообразных продуктов пиролиза, поглощенная конденсированной фазой [Гришин А. М, 1992]; M_α, M_c, M – молекулярные массы индивидуальных компонентов, углерода и смеси в целом; $s = 0.5 \text{ м}^{-1}$ – удельная поверхность элемента СГМ; $c_d = 0.03$ – коэффициент сопротивления; $s_\sigma = 1000 \text{ м}^{-1}$ – эффективная удельная поверхность коксика; E_1, E_2, E_3, E_5 и k_1, k_2, k_3, k_5 – энергии активации и константы химических реакций, численные значения которых определяются соотношениями $\frac{E_1}{R} = 9400 \text{ К}, k_1 = 3.63 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}, \frac{E_2}{R} = 60000 \text{ К}, k_2 = 6 \cdot 10^5 \text{ К}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}, \frac{E_3}{R} = 10000 \text{ К}, k_3 = 1000 \text{ с}^{-1}, \frac{E_5}{R} = 11500 \text{ К}, k_5 = 3 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}; \alpha_c$ – коксовое число СГМ; $v_\Gamma = 0.7$ – массовая доля горючего

газа в общей массе летучих продуктов пиролиза; μ_t, λ_t, D_t коэффициенты динамической вязкости, турбулентной теплопроводности и турбулентной диффузии соответственно; параметр $k_{s,v} c_{p,s} (T_s - T)(1 - \alpha_c) R_{1s}$ характеризует вдув газообразных продуктов пиролиза из конденсированной фазы в газовую, степень влияния которого определяется коэффициентом $k_{s,v} \leq 1$; $\rho_1 = 500 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_3 = 200 \text{ кг/м}^3$, $\rho_4 = 200 \text{ кг/м}^3$ – истинные плотности сухого СГМ, воды, коксика, золы соответственно; $c_{p,s} = \sum_{j=1}^n c_{p,j} C_j$ – средняя теплоемкость смеси газообразных продуктов пиролиза, где n – количество основных газообразных продуктов пиролиза, C_j – их доля в общем объеме газа, выделившегося в результате этой реакции; $k_7 c_{p,7} (T_s - T) R_{2s}$ характеризует вдув паров воды.

Систему уравнений (1)–(10) необходимо решать с учетом начальных и граничных условий:

$$\begin{aligned} T &= T_\Gamma, T_s = T_\Gamma, C_\alpha = C_{\alpha,\Gamma}, & x, z \in G, 0 \leq t \leq t_s; \\ T &= T_e, T_s = T_e, C_\alpha = C_{\alpha,e}, & x, z \notin G, t = 0; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= 0, \frac{\partial C_\alpha}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial U_R}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} &= 0, \frac{\partial C_\alpha}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = 0, \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = 0, \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = 0, \frac{\partial U_R}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} &= 0, \frac{\partial C_\alpha}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \frac{c}{3k_\Sigma} \frac{\partial U_R}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=+\infty} &= 0, \frac{\partial C_\alpha}{\partial z} \Big|_{z=+\infty} = 0, \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=+\infty} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_{z=+\infty} = 0, \frac{c}{3k_\Sigma} \frac{\partial U_R}{\partial z} \Big|_{z=+\infty} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь G – область, соответствующая первоначальному очагу горения; t_s – время, в течение которого в очаге поддерживается температура T_Γ .

Уравнение (1) представляет собой закон сохранения массы газодисперсной фазы, уравнение (2) – закон сохранения количества движения газодисперсной фазы в проекциях на оси декартовой системы координат. В (2) входят члены, обусловленные силовым взаимодействием газодисперсного потока с костяком пористо-дисперсной среды.

Уравнение (3) выражает закон сохранения энергии в газодисперсном потоке с учетом переноса энергии как конвекцией, так и излучением, а также выделения и поглощения тепловой энергии в результате различных физических и химических процессов.

Уравнения (4) представляют собой выражения для компонент тензора турбулентных напряжений и турбулентного теплового потока. При их записи использовалась обобщенная теория Прандтля, которая следует из K - ϵ модели турбулентности в допущении, что скорость генерации турбулентных пульсаций равна скорости ее диссипации.

Уравнение (6) является законом сохранения энергии в конденсированной фазе, а уравнения (10) описывают кинетику пиролиза и сушки СГМ.

Уравнение (8) – закон сохранения и изменения массы отдельных компонентов в газодисперсном потоке с учетом процессов конвекции и диффузии, а также физико-химических превращений.

Уравнение (9) – уравнение состояния газовой фазы.

Результаты

Система уравнений (1)–(10) с начальными и граничными условиями (11) решается методом крупных частиц. Этот метод состоит в том, что решение исходной системы на каждом вре-

менном шаге $[t_n, t_{n+1}]$ разбивается на этапы, и на каждом из этапов решается подсистема исходной системы уравнений, описывающая тот или иной физический процесс, а начальными данными на каждом этапе служат решения, полученные на предыдущем этапе.

Предложенная математическая модель учитывает основные физико-химические процессы, согласно которым теплота, выделившаяся при сгорании СГМ за счет излучения, свободной и вынужденной конвекции, передается несгоревшему СГМ и расходуется на его прогрев, сушку и пиролиз. Затем газообразные и конденсированные продукты пиролиза сгорают, и процесс повторяется (рис. 1).

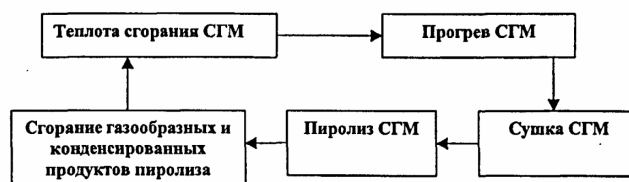


Рис. 1. Схема физико-химических процессов в зоне степного пожара

При моделировании рассматривался прямоугольник высотой 1 м, длиной 50 м. Очаг инициации пожара находился от 0 м до 1 м, высота СГМ $h = 0,5$ м. Скорость ветра считалась равной 3 м/с.

В результате численного интегрирования системы (1)–(10) с начальными и граничными условиями (11) были получены поля температуры газовой и твердой фазы, массовых концентраций компонент газовой фазы, объемных долей компонент твердой фазы в различные моменты времени.

Тестовая проверка модели (1)–(11) производилась сравнением результатов ее численного решения с решением модели, предложенной в работе [Шипулина, Гришин, 2000], где рассматривалась одномерная математическая модель распространения верхового лесного пожара, в приближении постоянной равновесной скорости ветра в пологе леса и раздельной от приземного слоя постановке с учетом двухтемпературности излучения от факела пламени.

На рисунке 2 дано распределение температуры газовой и твердой фаз в момент времени $t = 14$ с. Скорость ветра над пологом леса $u = 3$ м/с. Над зоной горения образуется конвективная колонка (рис. 3). Скорость распространения пожара при этом $w = 2$ м/с.

В фронте пожара вследствие пиролиза СГМ выделяется горючий газ (CO), который потом окисляется (рис. 4), также в зоне горения происходит выделение углекислого газа (рис. 5).

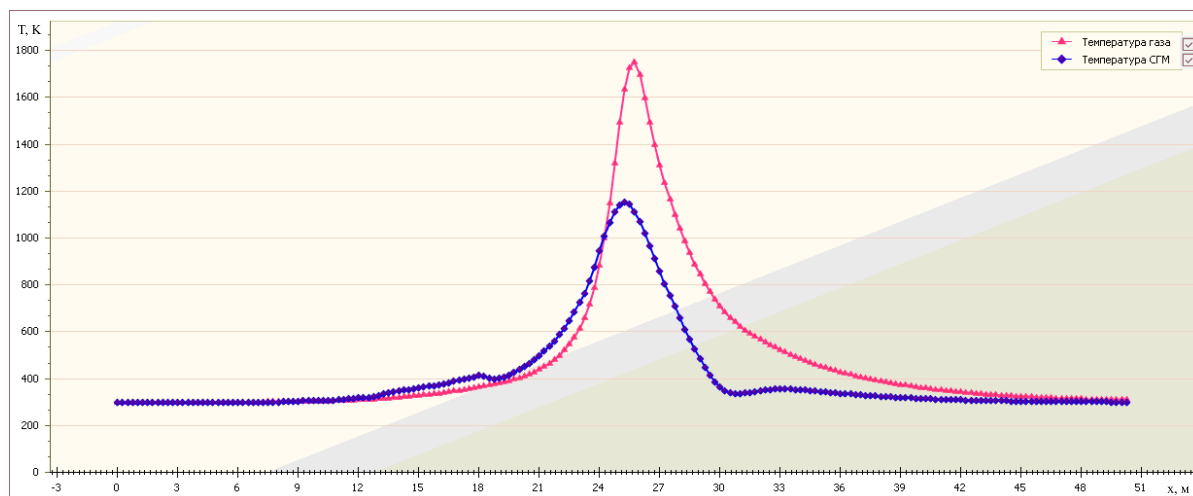
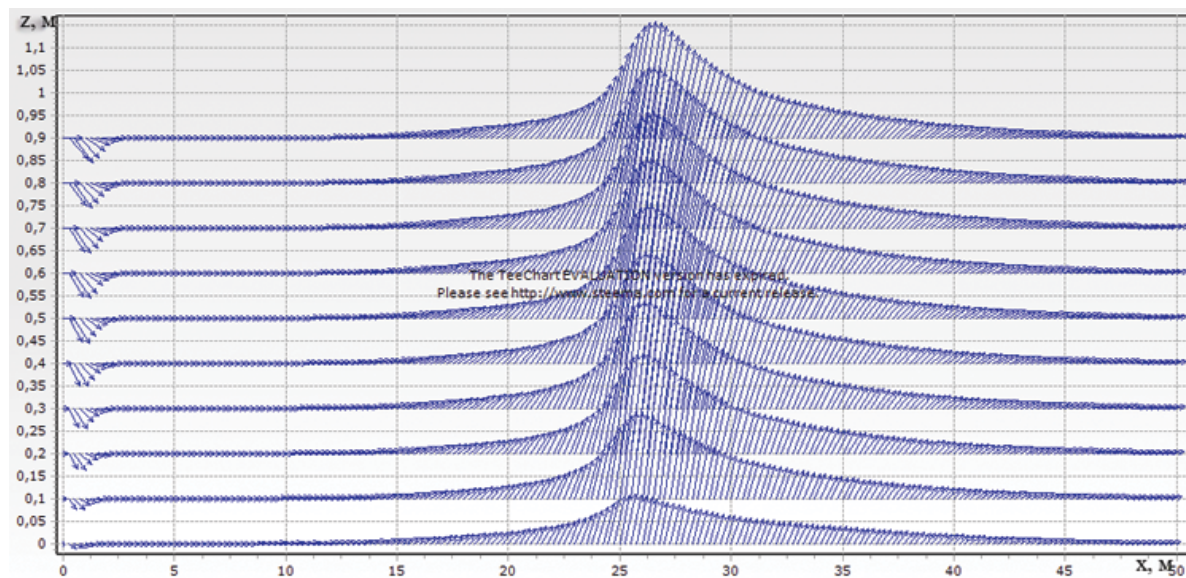
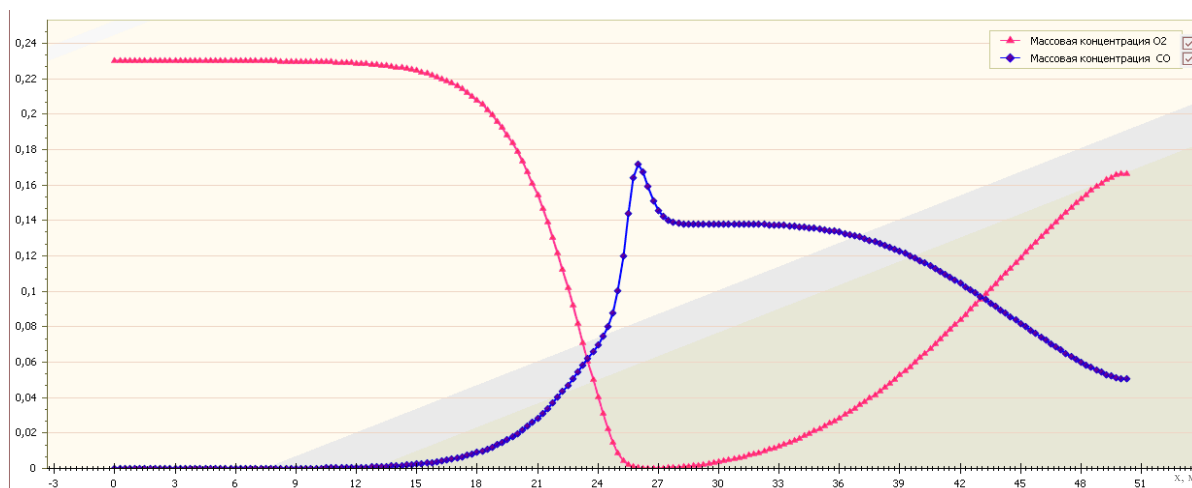
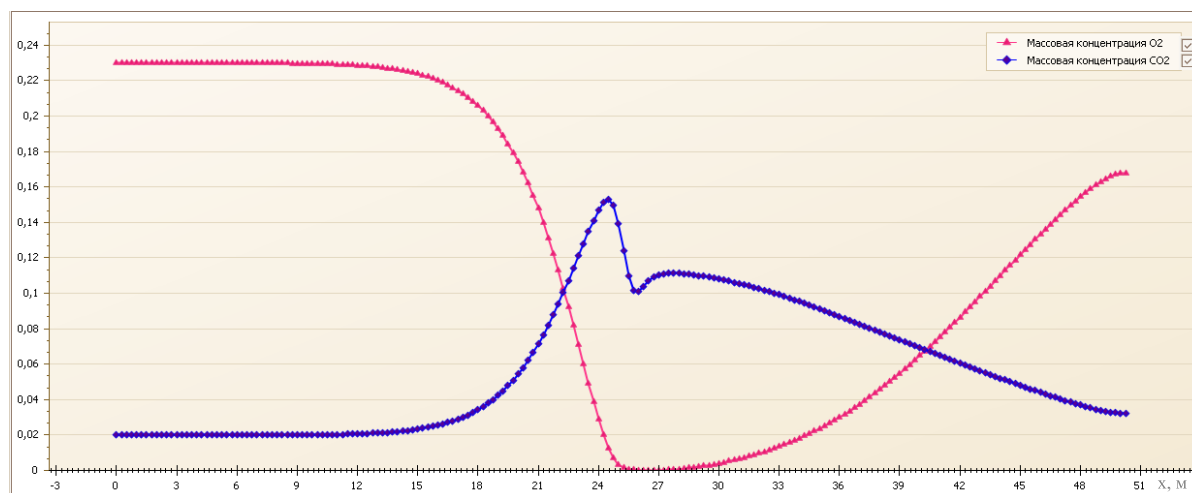


Рис. 2. Температура газовой и твердой фаз ($t = 14$ с, $v = 3$ м/с)

Рис. 3. Поле скорости ($t = 14$ с, $v = 3$ м/с)Рис. 4. Массовая концентрация окислителя и горючего газа ($t = 14$ с, $v = 3$ м/с)Рис. 5. Массовая концентрация окислителя и углекислого газа ($t = 14$ с, $v = 3$ м/с)

При отсутствии ветра на горизонтальной поверхности происходит затухание пожара, так как образуется «собственный ветер», направленный в сторону пожара. Скорость собственного ветра тем больше, чем больше интенсивность пожара [Валендик, 1968]. Возникновение и развитие этого течения обусловлены подъемом нагретых продуктов пиролиза и продуктов сгорания природных горючих материалов в неподвижной атмосфере. Благодаря этому во фронте пожара возникает небольшое уменьшение давления, из-за которого возникает тяга и подсос воздуха из окружающей среды.

Заключение

На основе общей математической модели лесных пожаров рассмотрена математическая постановка задачи о двумерном распространении степных пожаров в области, включающей в себя слой СГМ и приземный слой атмосферы. Проведенное в работе моделирование контура степного пожара показало, что рассматриваемая модель правильно отражает основные характерные особенности пожара. Модель допускает дальнейшее усовершенствование, связанное с учетом различных природных факторов, например, учет наклона подстилающей поверхности. Известно, что критерием истинности теоретических результатов является их согласование с данными наблюдений за характеристиками реальных степных пожаров. Сравнение опытных профилей температуры для степных пожаров с теоретическими показало, что с учетом точности задания исходных данных эти результаты удовлетворительно согласуются друг с другом. Таким образом, в данной работе был предложен алгоритм численного решения системы методом расщепления по физическим процессам, написан программный продукт, реализующий метод крупных частиц для системы уравнений двумерной двухфазной модели степных пожаров, проведены тестовые расчеты, показывающие, что модель дает качественно правильную картину распространения фронта пожара.

Список литературы

- Бурасов Д. М., Гришин А. М. Математическое моделирование низовых и степных пожаров. – Кемерово: Практика, 2006. – 133с.
- Валендик Э. Н. Ветер и лесной пожар. – Москва: Наука, 1968. – 117 с.
- Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука СО, 1992. – 404 с.
- Гришин А. М. Общая математическая модель степных пожаров и ее приложение. – Экологические приборы и системы. – 2004. – № 12. – С. 25–29.
- Немков А. В., Сатига Е. В. Сохранение степных экосистем в условиях заповедного режима. – Вестник ОГУ. – Оренбург: ОГУ, 2002. – № 3. – С.76–83.
- Шипулина О. В., Гришин А. М. Математическое моделирование распространения фронта лесного пожара в однородном лесном массиве и вдоль просеки – Диссертация, Томск, 2000 – 146 с.