

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СТЕПНЫХ ПОЖАРОВ

Асылбаев Н.А.<sup>1</sup>, Гималтдинов И.К.<sup>2</sup><sup>1</sup>ГОУ ВПО УГАТУ Стерлитамак, Россия<sup>2</sup>Стерлитамакская Государственная

Педагогическая Академия им. Зайнаб Бишиевой, Стерлитамак, Россия

## 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 7м/с. Ширина волны фронта горения при его высоте 2-3м составляет не более 1 метра.

При степных пожарах гибнут молодые деревья, поэтому степные пожары приостанавливают наступление леса на степь [3]. Таким образом, степные пожары наносят огромный ущерб пастбищам, степной растительности и хозяйственным объектам России, в частности Башкортостану. Поэтому представляет интерес исследование степных пожаров на базе математической модели [2].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть в бесконечном однородном степном массиве расположен очаг повышенной температуры, инициирующий степной пожар. Ось  $x$  связана с направлением ветра, ось  $z$  - вертикально вверх. Начало координат расположено вблизи очага повышенной температуры. Требуется описать дальнейшую эволюцию степного пожара.

Будем полагать, что органическая масса степи в соответствии с моделью, принятой в [2], 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. Для простоты считаем, что  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$  и другие горючие компоненты, входящие в состав летучих продуктов пиролиза можно моделировать одним эффективным

горючим газом с реакционными свойствами оксида углерода [1,2], 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 преобладающий 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 [1,2].

Предположим, что по направлению оси  $z$  все параметры однородны. Тогда уравнения в области степи, выражающие законы сохранения многокомпонентной реагирующей среды в дивергентной форме [1], имеют вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = Q; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho u w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho s c_d u \sqrt{u^2 + w^2} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'u'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{u'w'}); \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho u w}{\partial x} + \frac{\partial \rho w^2}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho s c_d w \sqrt{u^2 + w^2} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'w'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{w'w'}) - (\rho - \rho_0)g; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho c_p T u) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho c_p T w) = \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \cdot c_p \overline{u'T'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \cdot c_p \overline{w'T'}) + q_5 R_5 (1 - \nu_5) - \alpha_\nu (T - T_s) + c_p T Q; \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 -\rho(\overline{u_i' u_j'}) &= \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \cdot K \cdot \delta_{i,j}, \quad i, j = 1, 2 \\
 -\rho(\overline{u_i' T'}) &= \Gamma_t \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad \Gamma_t = \frac{\mu_t}{Pr_t}, \quad Pr_t = 1; \\
 K &= \frac{C_\mu}{C_1^{3/2}} l^2 \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{g}{\theta} \frac{\partial(\theta - \theta_\infty)}{\partial z} Pr_t^{-1} \right\}, \quad C_\mu = C_1 = 0.046; \\
 \mu_t &= \rho \cdot l^2 \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{g}{\theta} \frac{\partial(\theta - \theta_\infty)}{\partial z} Pr_t^{-1} \right\}^{1/2},
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 \theta &= T \left( \frac{1000}{\rho} \right)^{c_p}; \\
 \sum_{i=1}^4 \left( \rho_i \varphi_i c_{p,i} \frac{\partial T_s}{\partial t} \right) &= q_3 R_{3s} - q_2 R_{2s} + \alpha_v (T - T_s) + q_5 R_5 \nu_5; \\
 \frac{\partial}{\partial t} (\rho C_\alpha) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho C_\alpha u) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho C_\alpha w) &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho D_t \frac{\partial C_\alpha}{\partial z} \right) + R_{5\alpha}
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \overline{1,2}, \quad \sum_{i=1}^4 C_\alpha = 1, \quad C_4 = C_4' = const; \\
 p_e &= \rho RT \sum_{i=1}^4 \frac{C_i}{M_i};
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} &= -R_{1s}, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \quad \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1s} - \frac{M_c}{M_1} R_{3w}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0; \quad \varphi_5 = 1 - \sum_{i=1}^4 \varphi_i; \\
 R_{1s} &= k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad R_{2s} = k_2 \rho_2 \varphi_2 T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \\
 R_{3w} &= k_3 s_\sigma \rho C_1 \varphi_3 \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right);
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= (1 - \alpha_c) R_{1s} + R_{2s} + \frac{M_c}{M_1} R_{3w}; \\
 R_5 &= k_5 M_2 T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right) \times \begin{cases} x_1^{0.25} x_2, & x_1 \geq 0.05 \\ x_1 x_2, & x_1 < 0.05 \end{cases}, \quad x_i = \frac{C_i}{\sum_{k=1}^4 \frac{C_k}{M_k} M_i}; \\
 R_{51} &= -R_{3w} - \frac{R_5 M_1}{2 M_2}, \quad R_{52} = (1 - \alpha_c) \nu_\Gamma R_1 - R_5, \quad R_{54} = 0.
 \end{aligned}$$

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;  $C_\alpha$  - 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;

$Pr_t$  - 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 газофазной реакции окисления оксида углерода;

$q_1 = 0, q_2 = 3 \cdot 10^6$  Дж/кг,  $q_3 = 1.2 \cdot 10^7$  Дж/кг,  $q_5 = 10^7$  Дж/кг – тепловые эффекты реакций и процессов пиролиза СГМ, испарения связанной с СГМ воды, горения кокса и окисления летучих горючих продуктов пиролиза;  $C'_4$  - неизменная концентрация инертных компонентов;  $Q$  - массовая скорость образования газовой фазы;  $\alpha_v$  - коэффициент объемного (межфазного) теплообмена;  $v_5 < 1$  - доля теплоты газофазной реакции окисления газообразных продуктов пиролиза, поглощенная конденсированной фазой[1];  $M_\alpha, M_c, M$  - молекулярные массы индивидуальных компонентов, углерода и смеси в целом;  $s = 0.5 м^{-1}$  - удельная поверхность элемента СГМ;  $c_d = 0.03$  - коэффициент сопротивления;  $s_\sigma = 1000 м^{-1}$  - 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 хи-

мических реакций, численные значения которых определяются соотношениями

$$\begin{aligned} \frac{E_1}{R} &= 9400K, \quad k_1 = 3.63 \cdot 10^4 c^{-1}, \\ \frac{E_2}{R} &= 60000K, \quad k_2 = 6 \cdot 10^5 K^{1/2} \cdot c^{-1}, \\ \frac{E_3}{R} &= 10000K, \quad k_3 = 1000c^{-1}, \\ \frac{E_5}{R} &= 11500K, \quad k_5 = 3 \cdot 10^{13} c^{-1}; \end{aligned}$$

$\alpha_c$  - коксовое число СГМ;  $v_\Gamma = 0.7$  - массовая доля горючего газа в общей массе летучих продуктов пиролиза;  $\mu_t, \lambda_t, D_t$  - коэффициенты динамической вязкости, турбулентной теплопроводности и турбулентной диффузии соответственно;

$\rho_1 = 500 кг/м^3$ ,  
 $\rho_2 = 1000 кг/м^3$ ,  $\rho_3 = 200 кг/м^3$ ,  $\rho_4 = 200 кг/м^3$  - 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.

Систему уравнений необходимо решать с учетом начальных и граничных условий:

$$\begin{aligned} T &= T_\Gamma, \quad T_s = T_\Gamma, \quad C_\alpha = C_{\alpha,\Gamma}, \quad x, z \in G, \quad 0 \leq t \leq t_*; \\ T &= T_e, \quad T_s = T_e, \quad C_\alpha = C_{\alpha,e}, \quad x, z \notin G, \quad t = 0; \\ \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= 0, \quad \frac{\partial C_\alpha}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} &= 0, \quad \frac{\partial C_\alpha}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=+\infty} = 0, \end{aligned} \tag{9}$$

Здесь  $G$  - область, соответствующая первоначальному очагу горения;  $t_*$  - время, течение которого в очаге поддерживается температура.

### ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Система уравнений решается методом расщепления по физическим процессам. Суть этого метода состоит в том, что решение исходной системы на каждом временном 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.

Область расчета представляет собой прямоугольник размерами 10м на 5м соответственно по координатам  $x$  и  $z$ . Степной горючий материал за-

нимает область  $\Omega = \{0 \leq x \leq 10\text{ м}; 0 \leq z \leq 1\text{ м}\}$ . В момент времени  $t=0$  на участке  $G = \{0 < x \leq 0.6\text{ м}; 0 < z \leq 1\text{ м}\}$  задается очаг пожара, т.е. температура в этой области больше некоторой критической температуры, которая в дальней-

$$t = 0: u_e = 2\text{ м/с}, w_e = 0\text{ м/с}, C_{1e} = 0.25, C_{2e} = C_{3e} = 0, C_4 = 0.75, \varphi_{1e} = 0.057, \varphi_{2e} = \varphi_{3e} = \varphi_{4e} = 0, \\ \rho = 1.29\text{ кг/м}^3, T_e = 300\text{ К}, T_r = 1200\text{ К}, s = 0.5\text{ м}^{-1}, c_d = 0.03.$$

В результате численного интегрирования системы уравнений (1)-(9), описывающих процесс распространения степных пожаров, с соответствующими начальными и граничными условиями были получены поля температуры газовой и твердой фаз, массовых концентраций компонентов газовой фазы, объемных долей компонентов твердой фазы в различные моменты времени. На рис.1-3 представлены профили температур газовой фазы на плоскости XOZ. Из рис.2 видно, что происходит повышение температуры над очагом пожара. Также происходит дальнейшее распространение огня – фронт пожара находится в 3.5 м от начала отсчета. На 3 рис. фронт пожара находится уже на расстоянии 6 м. Из рис.2,3 следует, что скорость распространения огня 3 м/с. Это значение согласуется с экспериментальными данными[2]. На рис.4, 5 представлены поля скорости при  $t=1\text{ с}$  и  $2\text{ с}$ . Из рис.4 видно, что происходит образование конвективной колонки над фронтом пожара. На рис.5. приведено поле скоростей для установившегося течения в приземном слое атмосферы. Видно, с наветренной стороны фронта пожара образуется крупный вихрь. Поле скоростей согласуется в качественном отношении с экспериментальными данными[1,2]. На рисунках 6-10 даны распределения температуры и поля скоростей в случае неоднородности содержания СГМ - с 2 до 5 м отсутствует СГМ:

шем подержит горение СГМ. Требуется описать распространение пожара при  $t>0$ .

В начальный момент брались следующие числовые значения параметров:

$$\Omega = \{0 \leq x \leq 2\text{ м}, 5\text{ м} \leq x \leq 10\text{ м}; 0 \leq z \leq 1\text{ м}\}.$$

На рис.6 и 7 представлены температуры в моменты времени 1 и 2с. В данном случае сгорает СГМ в области от 0 до 2 м, и конденсированные и летучие продукты пиролиза сносятся ветром над областью, где отсутствует СГМ. В 2с продукты пиролиза достигают следующего слоя СГМ, расположенного от 5 до 10м (рис.7). Далее происходит затухание пожара. Следовательно, при данных условиях отсутствие СГМ шириной в 3м достаточно для прекращения распространения степного пожара. Поле скорости мало отличается от поля скорости, как при однородном распределении СГМ (рис.8). Также видно образование конвективной колонки, направленной по ветру. На рис.9 представлен профиль температуры в  $t=2\text{ с}$  (с 2м до 3м отсутствует СГМ)

$$\Omega = \{0 \leq x \leq 2\text{ м}, 3\text{ м} \leq x \leq 10\text{ м}; 0 \leq z \leq 1\text{ м}\}.$$

Отсутствие СГМ в 1м не достаточно для прекращения распространения пожара в данных условиях. Здесь происходит возгорание следующего слоя СГМ ( $T=1200\text{ К}$ ) и дальнейшее распространение пожара. Поле скоростей в этом случае дано на рис.10.

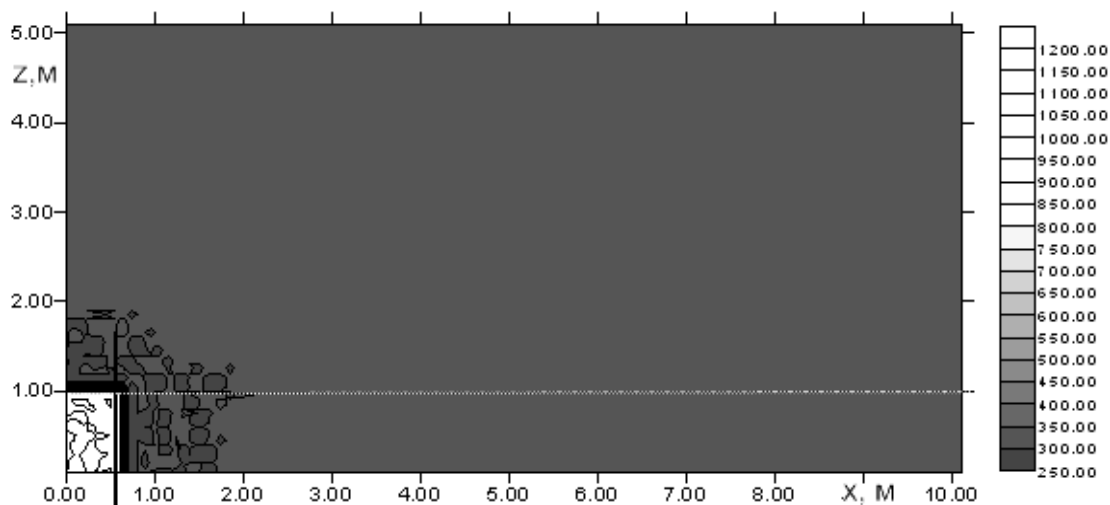


Рис.1. Температура газовой фазы ( $t=0\text{ с}, G = \{0 < x \leq 0.6\text{ м}; 0 < z \leq 1\text{ м}\}$ )

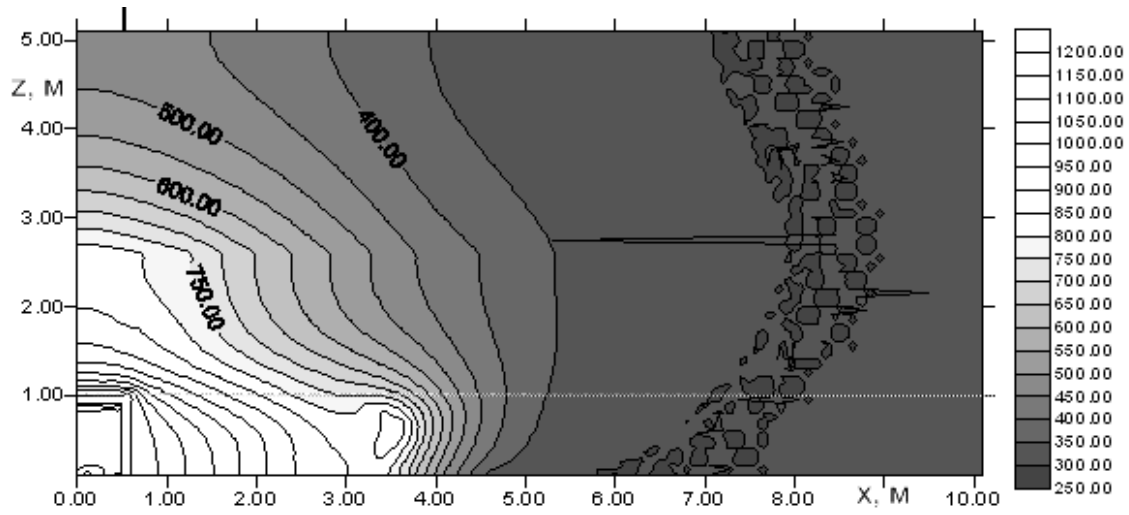


Рис.2 Температура газовой фазы ( $t=1\text{c}$ ,  $G = \{0 < x \leq 0.6\text{m}; 0 < z \leq 1\text{m}\}$ )

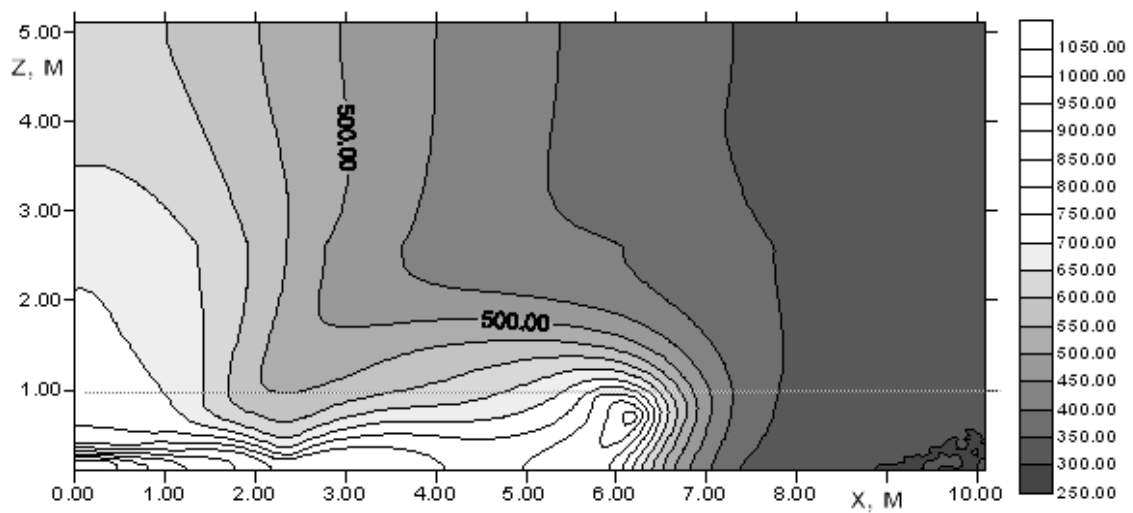


Рис.3 Температура газовой фазы ( $t=2\text{c}$ ,  $G = \{0 < x \leq 0.6\text{m}; 0 < z \leq 1\text{m}\}$ )

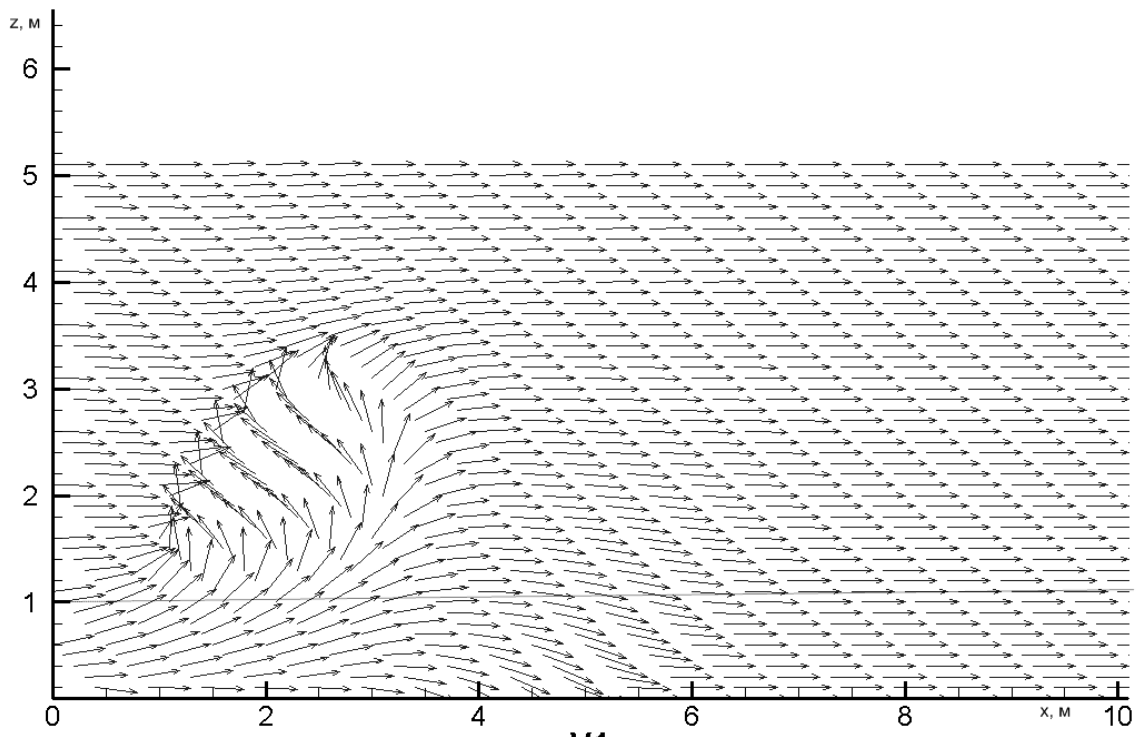


Рис.4 Поле скорости ( $t=1\text{с}$ ,  $G = \{0 < x \leq 0.6\text{м}; 0 < z \leq 1\text{м}\}$ )

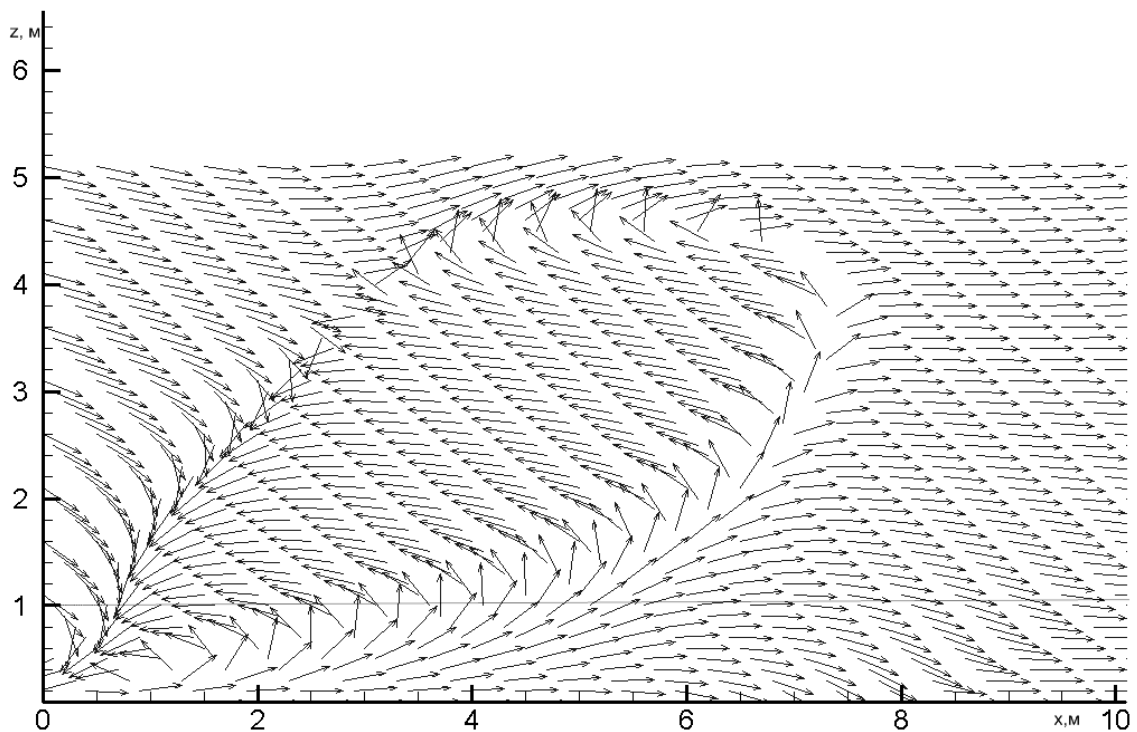


Рис.5 Поле скорости ( $t=2\text{с}$ ,  $G = \{0 < x \leq 0.6\text{м}; 0 < z \leq 1\text{м}\}$ )

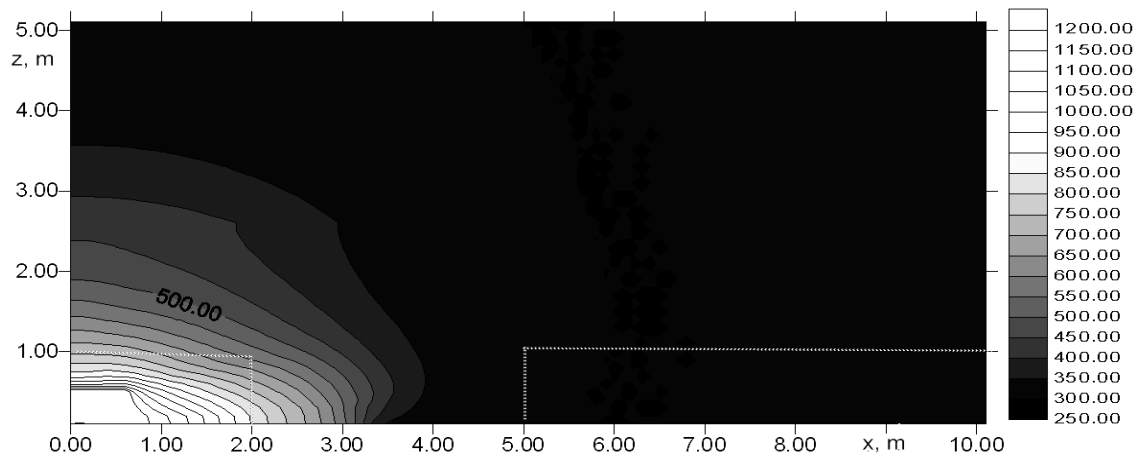


Рис.6 Температура газовой фазы при неоднородном распределении СГМ ( $t=1\text{s}$ ,  $\Omega = \{0 \leq x \leq 2\text{m}, 5\text{m} \leq x \leq 10\text{m}; 0 \leq z \leq 1\text{m}\}$ )

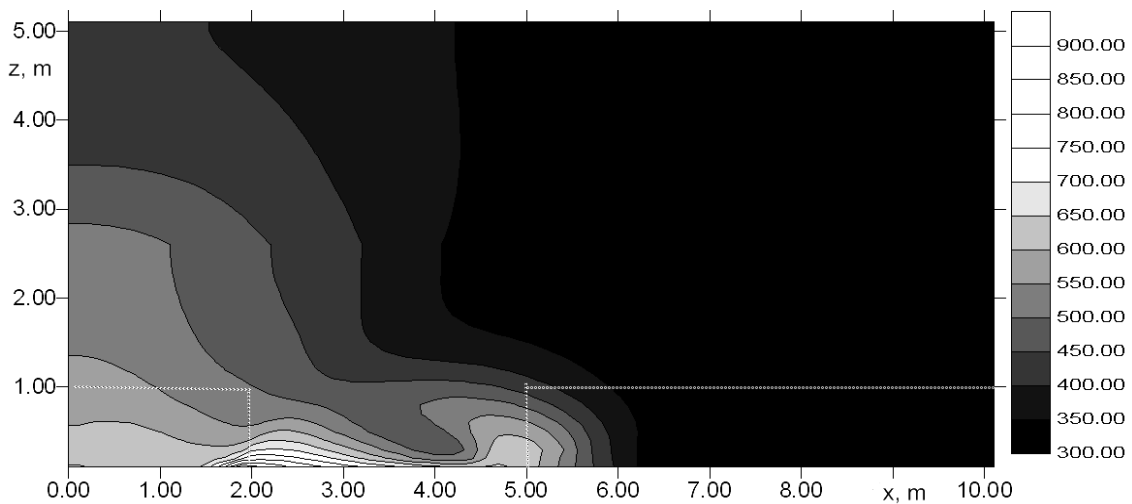


Рис.7 Температура газовой фазы при неоднородном распределении СГМ ( $t=2\text{s}$ ,  $\Omega = \{0 \leq x \leq 2\text{m}, 5\text{m} \leq x \leq 10\text{m}; 0 \leq z \leq 1\text{m}\}$ )

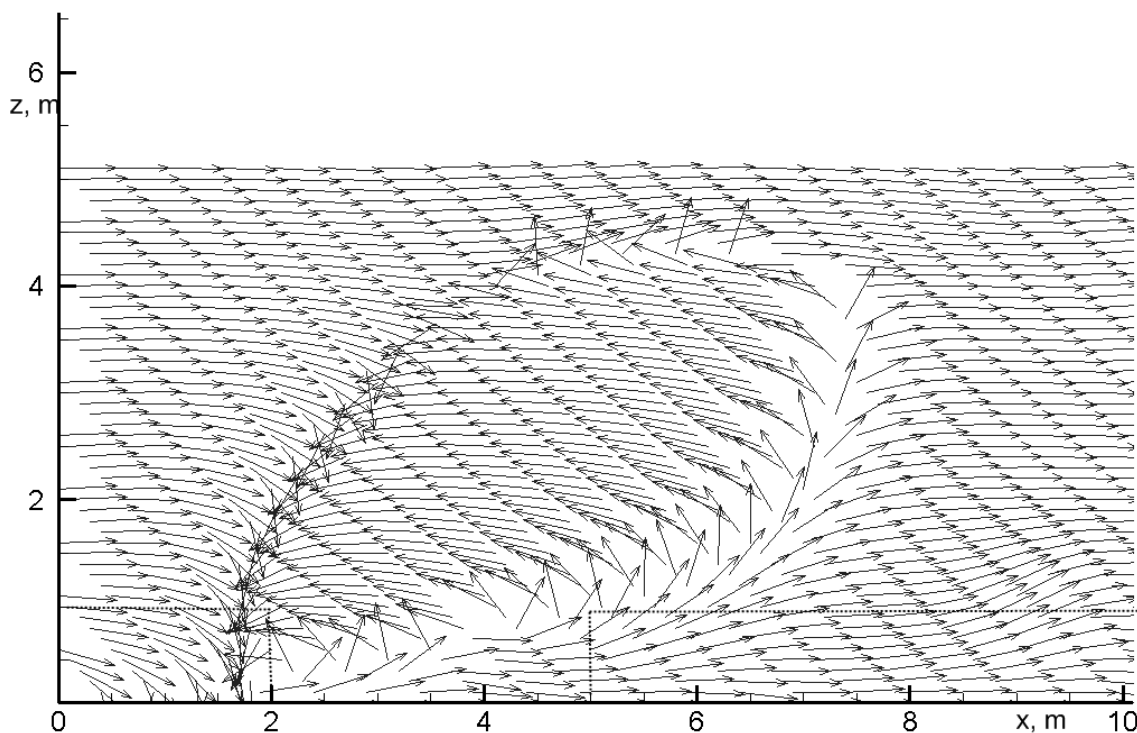


Рис.8 Поле скорости при неоднородном распределении СГМ ( $t=2c$ ,  
 $\Omega = \{0 \leq x \leq 2m, 5m \leq x \leq 10m; 0 \leq z \leq 1m\}$ )

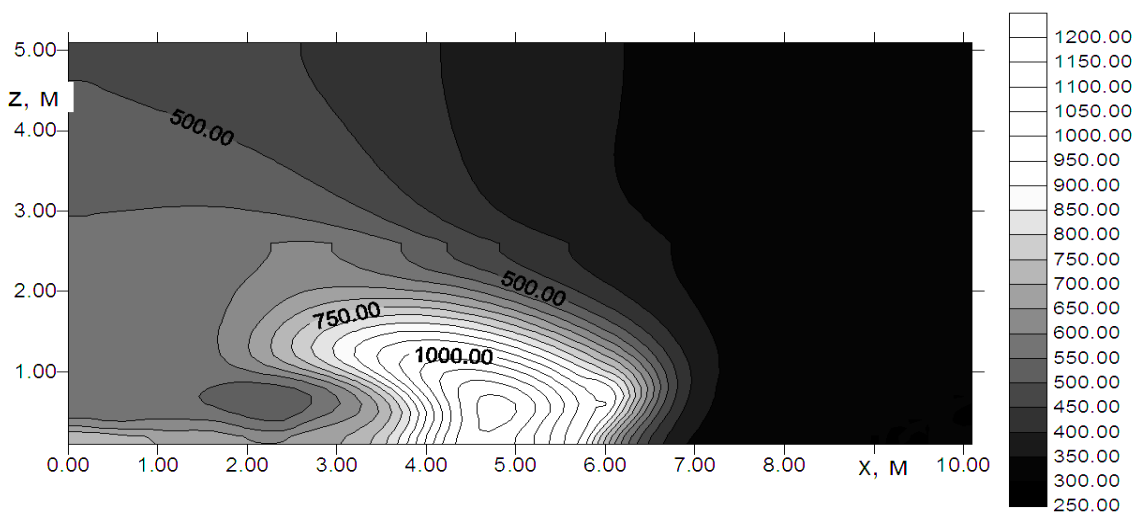


Рис.9 Температура газовой фазы при неоднородном распределении СГМ ( $t=2c$ ,  
 $\Omega = \{0 \leq x \leq 2m, 3m \leq x \leq 10m; 0 \leq z \leq 1m\}$ )



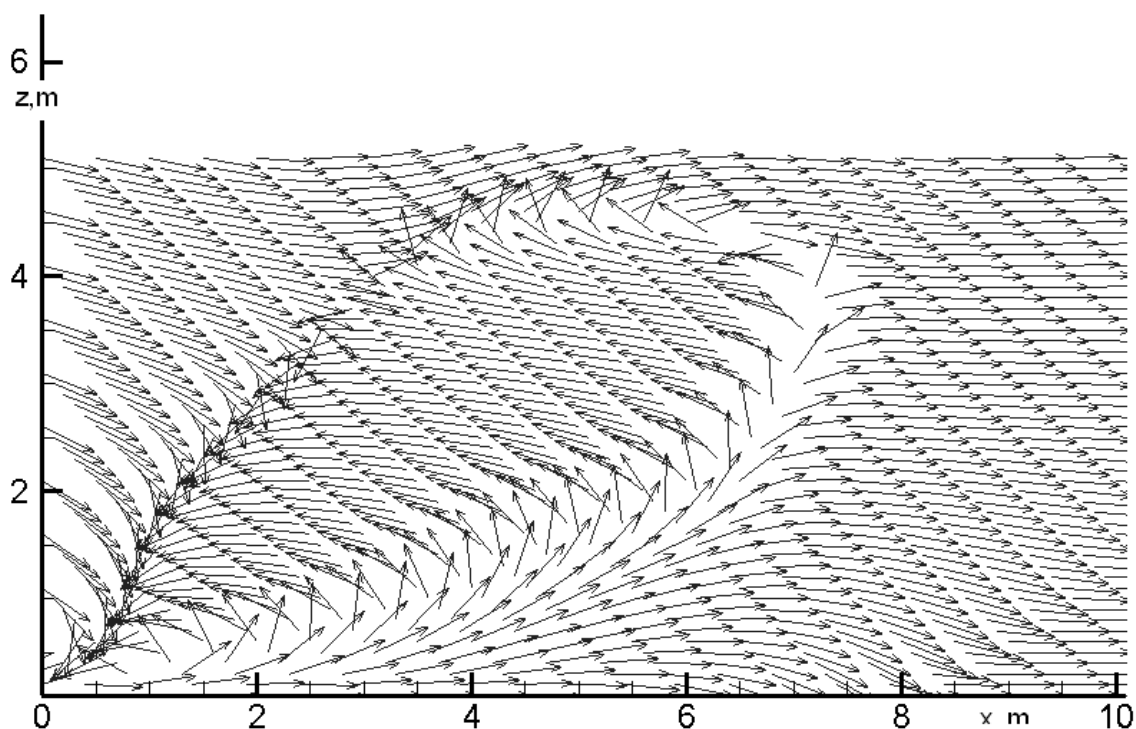


Рис.10 Поле скорости при неоднородном распределении СГМ ( $t=2c$ ,  
 $\Omega = \{0 \leq x \leq 2m, 3m \leq x \leq 10m; 0 \leq z \leq 1m\}$ )

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. 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 код, 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.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации МД-280.2008.1

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.М. Гришин. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. // Новосибирск: Наука СО, 1992, 404с.
2. А.М. Гришин. Общая математическая модель степных пожаров и ее приложение. // Экологические приборы и системы. 2004 -12 С.25-29.
3. А.В. Немков, Е.В. Сапига. Сохранение степных экосистем в условиях заповедного режима. // Вестник ОГУ.- Оренбург, изд-во ОГУ, 2002.3 С.76-83.