

О распространении пожара в однородном степном массиве по наклонной подстилающей поверхности

Асылбаев Н.А., Гималтдинов И.К.

Стерлитамакская государственная педагогическая академия им. З. Бишевой, Стерлитамак

Приведены постановка и результаты численного решения задачи о распространении степного пожара в двумерном случае по наклонной подстилающей поверхности. Система дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями редуцирована к дискретной форме с помощью метода контрольного объема. Сеточные уравнения, возникающие в процессе дискретизации, решаются с помощью численного метода.

1. 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 шириной со скоростью 7 м/с. Ширина волны фронта горения при его высоте 2–3 м составляет не более 1 метра. Степные пожары возникают и в гористой местности. Рельеф местности оказывает сильное влияние на поведение пожаров. Это влияние можно наблюдать в любом пожаре в горной местности, однако, оно очень плохо изучено. При степных пожарах гибнут молодые деревца, поэтому степные пожары приостанавливают наступление леса на степь [2]. Таким образом, степные пожары наносят огромный ущерб пастбищам, степной растительности и хозяйственным объектам России, в частности Башкортостану. Поэтому представляет интерес исследование распространения степных пожаров с учетом рельефа местности на базе математической модели [2].

2. Постановка задачи

Рассмотрим распространение степного пожара, полагая, что подстилающая органическую массу степи поверхность наклонена под углом γ к горизонтальной поверхности. Введем контрольную поверхность, отделяющую зону пожара от остальной части пространства, и обозначим ее Γ_0 . Тогда структуру степного пожара можно изобразить, как показано на рис. 1.

Считается, что: 1) течение носит развитый тур-

булентный характер, и молекулярным переносом пренебрегаем по сравнению с турбулентным; 2) плотность газовой фазы не зависит от давления из-за малости скорости течения по сравнению со скоростью звука [1]; 3) полог растительности считается недеформируемой средой. Предполагается, что полог можно моделировать однородной двухтемпературной многофазной пористой реагирующей средой [1]. Рассматривается так называемый продуваемый степной массив [2], когда объемной долей конденсированной фазы лесных горючих материалов, состоящей из сухого органического вещества, воды в жидко-капельном состоянии и золы, можно пренебречь по сравнению с объемной долей газовой фазы, включающей в себя компоненты воздуха и газообразные продукты пиролиза и горения. Для описания переноса энергии излучением используется диффузионное приближение. Считается, что среда находится в локально-термодинамическом равновесии. Турбулентный конвективный перенос, обусловленный действием силы тяжести, описывается с использованием уравнений Рейнольдса [1]. 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 .

В соответствии с моделью, принятой в [1], будем полагать, что органическая масса полога ле-

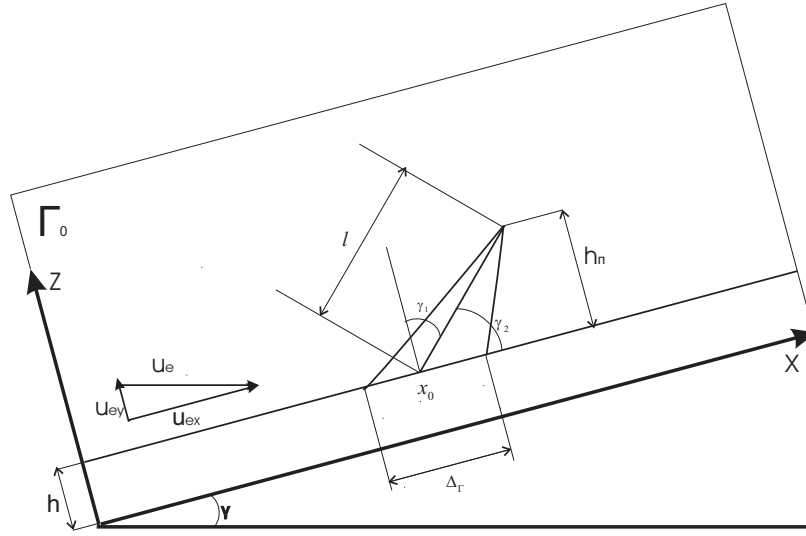


Рис. 1. Схема распространения степного пожара: Δ_Γ — ширина фронта пожара; h — высота полога растительности; u_e — скорость ветра над пологом; γ — угол наклона подстилающей поверхности относительно горизонта

са представляет собой многофазную реакционно-способную пористую сплошную среду, состоящую из сухого органического вещества, воды в жидко-капельном 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], 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 кондукцией, конвекцией и излучением [1]. Над пологом степных растений рассматривается факел пламени. Считается, что этот факел излучает как плоская стенка длиной l , расположенная под углом γ_2 к поверхности полога (рис. 1), величина которого зависит от скорости ветра над пологом степи.

Пусть в момент $t = 0$ в зоне G задается повышенная температура, инициирующая степной пожар; требуется определить динамику распространения степного пожара для $t > 0$.

Система уравнений, описывающих распростра-

нение степного пожара, основана на системе уравнений распространения верховых пожаров и имеет вид [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} &= Q; \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho u w}{\partial z} &= -\rho s c_d u \sqrt{u^2 + w^2} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'u'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{u'w'}) - \sin(\gamma)(\rho - \rho_0)g; \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho u w}{\partial x} + \frac{\partial \rho w^2}{\partial z} &= -\rho s c_d w \sqrt{u^2 + w^2} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'w'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{w'w'}) - \cos(\gamma)(\rho - \rho_0)g; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho c_p T u) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho c_p T w) &= \\ \frac{\partial}{\partial x} (-\rho c_p \overline{u'T'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho c_p \overline{w'T'}) + \\ &+ q_5 R_5 (1 - \nu_5) - \alpha_\nu (T - T_s) + c_p T Q; \\ -\rho \overline{u_i' u_j'} &= \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho K \delta_{i,j}, \quad i, j = 1, 2; \\ -\rho \overline{u_j' T'} &= \Gamma_t \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad \Gamma_t = \mu_t / Pr_t, \quad Pr_t = 1; \\ K &= \frac{C_\mu}{C_1^{3/2}} l^2 \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \right. \\ &\left. - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 - \frac{g}{\theta} \frac{\partial (\theta - \theta_\infty)}{\partial z} Pr_t^{-1} \right\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_\mu &= C_1 = 0.046; \\
\mu_t &= \rho 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 - \right. \\
&\quad \left. - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 - \frac{g}{\theta} \frac{\partial(\theta - \theta_\infty)}{\partial z} Pr_t^{-1} \right\}^{1/2}, \\
\theta &= T \left(\frac{1000}{\rho} \right)^{R/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_\nu (T - T_s) + \\
&\quad + q_5 R_5 \nu_5 + k_s (U_R - 4\sigma T^4); \\
\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^4) + Q_R, \\
Q_R &= \begin{cases} 0.5\sigma T^4 \left(1 + \frac{l \cos(\gamma_2) - (x-x_0)}{\sqrt{(x-x_0)^2 + 2l(x-x_0) \cos(\gamma_2)}} \right), & x > x_0 \\ 0, & x_1 \leq x_0 \end{cases} \\
\frac{\partial \rho C_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial \rho u C_\alpha}{\partial x} + \frac{\partial \rho w C_\alpha}{\partial z} &= R_{5\alpha} + \\
\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), \\
\alpha = \overline{1, 2}, \quad \sum_{i=1}^4 C_\alpha = 1, \quad C_4 = C'_4 = \text{const}; \\
p_e &= \rho RT \sum_{i=1}^4 \frac{C_i}{M_i}; \\
\rho_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial t} &= -R_{1s}, \quad \rho_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \\
\rho_3 \frac{\partial \phi_3}{\partial t} &= \alpha_c R_{1s} - \frac{M_c}{M_1} R_{3w}, \\
\rho_4 \frac{\partial \phi_4}{\partial t} &= 0, \quad \varphi_5 = 1 - \sum_{i=1}^4 \varphi_i; \\
Q &= (1 - \alpha_c) R_{1s} + R_{2s} + \frac{M_c}{M_1} R_{3w}; \\
R_{1s} &= k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \\
R_{2s} &= k_2 \rho_2 \varphi_2 T^{-0.5} \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 \\
&\quad \times \begin{cases} x_1^{0.25} x_2, & x_1 \geq 0, 05, \\ x_1 x_2, & x_1 < 0, 05, \end{cases} \\
R_{51} &= -R_{3w} - \frac{R_5 M_1}{2M_2}; \\
R_{52} &= (1 - \alpha_c) \nu_\gamma R_1 - R_5, \quad R_{54} = 0.
\end{aligned} \tag{1}$$

Здесь $c_{p,i}$, ρ_i , φ_i — удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные доли i -ой фазы много-

фазной 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 , T_s — температура газовой и твердой фаз; 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 , z соответственно; p , p_e — давление в потоке и в невозмущенной области соответственно; R_{1s} — массовая скорость реакции пиролиза сухого лесного горючего материала (ЛГМ); R_{2s} — массовая скорость испарения влаги, связанной с ЛГМ; $R_{3s} = M_c/M_1 R_{3w}$ — 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; $q_1 = 0$, $q_2 = 3 \cdot 10^6$, $q_3 = 1.2 \cdot 10^7$, $q_5 = 10^7$ Дж/кг тепловые эффекты реакций и процессов пиролиза ЛГМ, испарения связанной с ЛГМ воды, горения кокса и окисления летучих горючих продуктов пиролиза; C'_4 — неизменная концентрация инертных компонентов; Q — массовая скорость образования газовой фазы; α_ν — коэффициент объемного (межфазного) теплообмена; $\nu_5 < 1$ — доля теплоты газофазной реакции окисления газообразных продуктов пиролиза, поглощенная конденсированной фазой [2]; M_α , M_c , M — молекулярные массы индивидуальных компонентов, углерода и смеси в целом; $s = 0.5 \text{ м}^{-1}$ — удельная поверхность фитомассы полога; $c_d = 0.03$ — 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 предэкспоненты химических реакций, численные значения которых определяются соотношениями $E_1/R = 9400 \text{ К}$, $k_1 = 3.63 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, $E_2/R = 60000 \text{ К}$, $k_2 = 6 \cdot 10^5 \text{ К}^{1/2}/\text{с}$, $E_3/R = 10000 \text{ К}$, $k_3 = 1000 \text{ с}^{-1}$, $E_5/R = 11500 \text{ К}$, $k_1 = 3 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$; $\alpha_c = 0.06$ — коксовое число ЛГМ; $\nu_\gamma = 0.7$ — 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 $k_{sv} c_{ps} (T_s - T)(1 - \alpha_c) R_1$ характеризует вдув газообразных продуктов пиролиза из конденсированной фазы в газовую [2], степень влияния которого определяется коэффициентом влияния $k_{sv} \leq 1$; $\rho_1 = 500 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$,

$\rho_3 = 200 \text{ кг/м}^3$, $\rho_4 = 200 \text{ кг/м}^3$ — истинные плотности сухого ЛГМ, воды, коксика, золы соответственно; $c_{ps} = \sum_{j=1}^n c_{pj} C_j$ — средняя теплоемкость смеси газообразных продуктов пиролиза; C_j — их доля в общем объеме газа, выделившегося в результате этой реакции; $k_7 c_{p7} (T_s - T) R_2$ характеризует вдув паров воды [2], степень влияния которого на общий тепловой баланс газовой определяется коэффициентом влияния $k_7 \leq 1$; значения $k_{5\nu}$, k_7 и ν_5 определялись в результате математических экспериментов путем согласования расчетных и экспериментальных данных по температуре горения во фронте степного пожара [2].

Систему уравнений необходимо решать с учетом начальных и граничных условий:

$$T = T_r, \quad T_s = T_r = 1200 \text{ K},$$

$$C_\alpha = C_{\alpha,r}, \quad x, z \in G, 0 \leq t \leq t_*$$

$$T = T_e, \quad T_s = T_e, \quad C_\alpha = C_{\alpha,e}, \quad x, z \notin G, \quad t = 0,$$

$$T|_{x=0} = T_e, \quad C_\alpha|_{x=0} = C_{\alpha,e}, \quad u|_{x=0} = u_e \cdot \left(\frac{z}{2}\right)^{1/7},$$

$$w|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x}|_{x=\infty} = 0, \quad \frac{\partial C_\alpha}{\partial x}|_{x=\infty} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}|_{x=\infty} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x}|_{x=\infty} = 0, \quad T|_{z=0} = T_e,$$

$$C_\alpha|_{z=0} = C_\alpha, \quad u|_{z=0} = 0, \quad w|_{z=0} = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}|_{z=\infty} = 0, \quad \frac{\partial C_\alpha}{\partial z}|_{z=\infty} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z}|_{z=\infty} = 0,$$

$$\frac{\partial w}{\partial z}|_{z=\infty} = 0.$$

Здесь G — область, соответствующая первоначальному очагу горения; t_* — время, в течении которого в очаге пожара поддерживается температура.

Данная система уравнений для численного интегрирования была редуцирована к дискретной форме с помощью метода контрольного объема Патанкара–Сполдинга [3]. Сеточные уравнения, возникающие в процессе дискретизации, разрешались с помощью метода переменных направлений. Согласование полей скорости и давления осуществлялось итерационным образом в рамках алгоритма SIMPLE [3].

В результате численного интегрирования системы уравнений, 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. 2, 3 представлены профили температур газовой фазы на

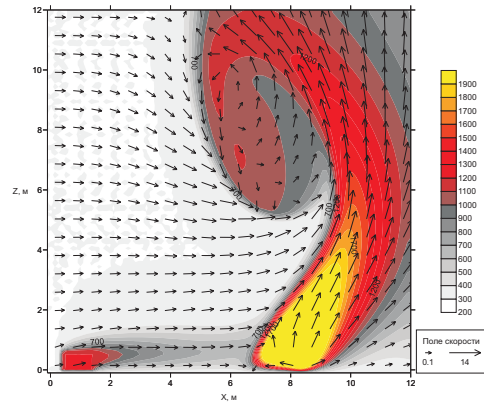


Рис. 2. Температура газовой фазы и поле скорости при скорости ветра 3 м/с, $\gamma = 0$ в момент времени $t = 5 \text{ с}$ ($h = 0.7 \text{ м}$, $\varphi_1 = 0.0014$)

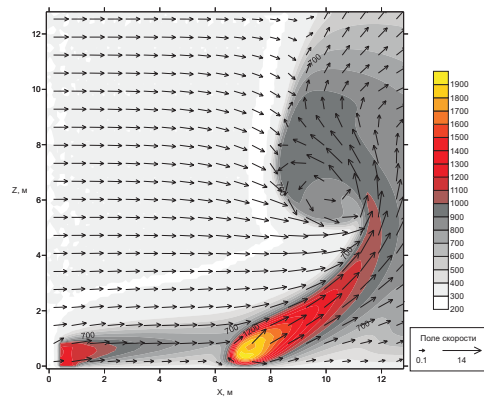


Рис. 3. Температура газовой фазы и поле скорости при скорости ветра 5 м/с, $\gamma = 0$ в момент времени $t = 4 \text{ с}$ ($h = 0.7 \text{ м}$, $\varphi_1 = 0.0014$)

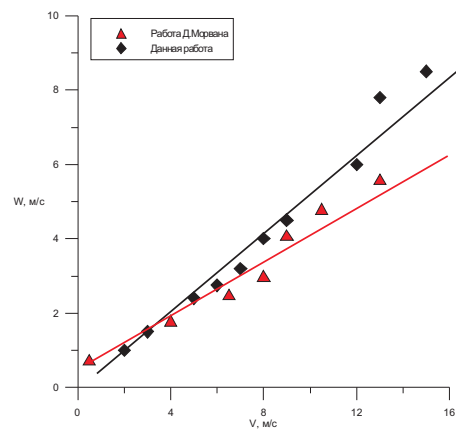


Рис. 4. Сравнение скоростей распространения степного пожара (по оси OX — скорость ветра, по оси OY — скорость распространения степного пожара)

плоскости XOZ при скорости ветра 3 и 5 м/с соответственно. Скорости распространения огня 1.5 и 2.5 м/с, что согласуется с экспериментальными данными [2]. В процессе распространения пожара происходит образование конвективной колонки над фронтом пожара. Возникновение и развитие этого течения обусловлены подъемом нагретых продуктов пиролиза и продуктов сгорания природных горючих материалов в атмосфере. Благодаря этому во фронте пожара возникает уменьшение давления, из-за которого возникает тяга и подсос воздуха из окружающей среды. Видно, что с наветренной стороны фронта пожара образуется крупный вихрь. Разница в скоростях распространения пожара объясняется тем, что при увеличении скорости ветра над пологом растительности происходит отклонение факела пламени ближе к степному горючему материалу (СГМ), тем самым увеличивается тепловой поток от факела пламени и ускоряется процесс сушки и пиролиза СГМ. На рис. 4 приводится сравнение полученных значений скоростей распространения степного пожара в зависимости от скорости ветра с результатами работы D. Morvan «Physical modeling of fire spread in grassland» [4].

На рис. 5, 6, 7 приведены распределения температур газовой фазы и поля скорости при углах наклона подстилающей поверхности $\gamma = 5^\circ$, $\gamma = 20^\circ$, $\gamma = 45^\circ$ относительно горизонтали. При наклоне подстилающей поверхности в $\gamma = 5^\circ$ происходит увеличение скорости распространения пожара в 1.66 раза по сравнению с распространением пожара по горизонтальной поверхности и достигает значения 2.5 м/с. Это объясняется уменьшением углов наклона факела пламени и конвективной колонки к подстилающей растительности поверхности. При наклоне $\gamma = 5^\circ$ происходит небольшое отклонение конвективной колонки, чем при $\gamma = 0^\circ$, а при увеличении угла наклона γ происходит более заметное отклонение конвективной колонки от вертикальной линии — она «прижимается» к СГМ и, тем самым, ускоряется процесс сушки, пиролиза СГМ и воспламенение горючих продуктов пиролиза СГМ. На рис. 8 приводится зависимость скорости распространения степного пожара от угла наклона подстилающей растительности поверхности при скорости ветра 3 м/с.

3. Заключение

На основе общей математической модели лесных пожаров дана математическая постановка задачи о двумерном распространении степных пожаров. Проведенное в работе моделирование контура степного пожара показало, что рассматриваемая модель правильно отражает основные характерные

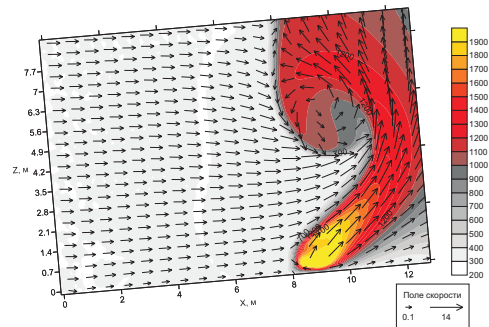


Рис. 5. Температура газовой фазы и поле скорости при скорости ветра 3 м/с, $\gamma = 5^\circ$ в момент времени $t = 4$ с ($h = 0.7$ м, $\varphi_1 = 0.0014$)

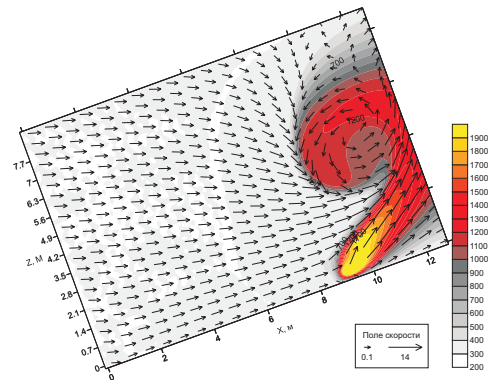


Рис. 6. Температура газовой фазы и поле скорости при скорости ветра 3 м/с, $\gamma = 20^\circ$ в момент времени $t = 4$ с ($h = 0.7$ м, $\varphi_1 = 0.0014$)

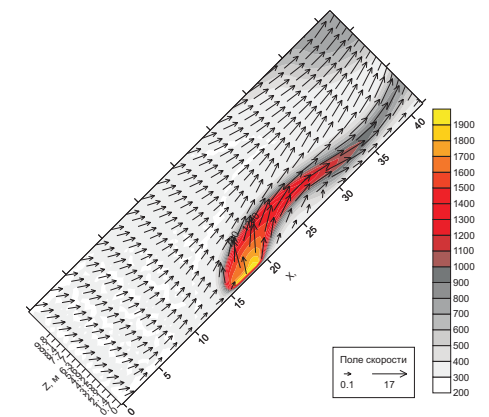


Рис. 7. Температура газовой фазы и поле скорости при скорости ветра 3 м/с, $\gamma = 45^\circ$ в момент времени $t = 4.5$ с ($h = 0.7$ м, $\varphi_1 = 0.0014$)

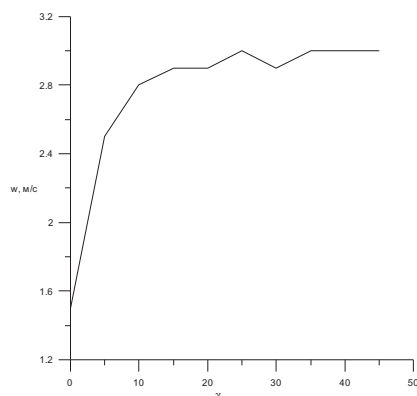


Рис. 8. Сравнение скоростей распространения степного пожара (по оси OX — угол наклона подстилающей поверхности, по оси OY — скорость распространения степного пожара)

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 уче-

том 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 контрольного объема для системы уравнений двумерной двухфазной модели степных пожаров, проведены тестовые расчеты, показывающие, что модель дает качественно правильную картину распространения фронта пожара.

Список литературы

- [1] Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними: Новосибирск.: Наука СО, 1992. 404 с.
- [2] Гришин А.М. Общая математическая модель степных пожаров и ее приложение. Экологические приборы и системы 12: 2004. С. 25–29.
- [3] Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
- [4] Morvan D., Meradji S., Accary G. Physical modelling of fire spread in Grasslands [Text] // Fire Safety Journal. 2009. № 44. P. 50–61.