

К.О. Фрянова, Д.П. Гербель

(Национальный исследовательский Томский политехнический университет;
e-mail: kofl@tpu.ru)

ИЗМЕНЕНИЯ ПРОТИВОПОЖАРНОГО РАЗРЫВА ОТ СКОРОСТИ ВЕТРА И СВОЙСТВ ЛЕСНОГО МАССИВА

Проведён анализ зависимости критических размеров противопожарных разрывов от основных характеристик лесных массивов и скорости ветра. В результате численного интегрирования получены поля распределения температуры, концентрации кислорода и летучих горючих продуктов пиролиза.

Ключевые слова: верховые лесные пожары, противопожарный разрыв.

K.O. Fryanova, D.P. Gerbel

CHANGING FIRE RUPTURE ON THE WIND SPEED AND PROPERTIES OF FOREST

Analysis of dependence of the critical dimensions of fire ruptures on the main characteristics of forests and wind speed. As a result of the numerical integration of fields was obtained the temperature distribution, oxygen concentration and volatile combustible pyrolysis products.

Key words: upland forest fires, fire rupture.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 12 февраля 2014 г.

Леса играют огромную роль в экономике России. В России самые большие запасы лесов в мире и площадь наших лесов составляет более 800 000 тонн. Лес занимает около 45 % территории России и составляет около 24 % запасов всей планеты.

Леса играют огромную роль в газовом балансе атмосферы и регулировании планетарного климата Земли. Общий баланс для лесов России, рассчитанный Б.Н. Моисеевым составил для углекислого газа 1789064,8 тыс. тонн, а для кислорода – 1299019,9 тыс. тонн. Ежегодно в лесах России депонируется 600 млн тонн углерода. Эти гигантские объёмы миграции газов существенно стабилизируют газовый состав и климат планеты [1].

Основные запасы лесов России концентрируются в Сибири и на Дальнем Востоке, а также на европейском севере. Максимальные проценты лесопокрываемой площади отмечаются в Иркутской области и Приморском крае, несколько ниже они на юге Хабаровского края, юге Якутии, в приенисейской части Красноярского края и в Республике Коми, Вологодской Костромской и Пермской областях. Однако лесистость совпадает с высокими запасами древесины лишь в Приморском крае и, в меньшей степени, на юге Красноярского края. В других регионах, где произрастают наиболее продуктивные леса (на Кавказе, Алтае, Европейском центре), лесистость заметно снижена, причём в значительной степени вследствие деятельности человека.

В результате лесных пожаров ежегодно в России гибнет около 1 млн тонн леса.

Возникновение и распространение лесных пожаров зависят от различных условий: скорости ветра, температуры окружающей среды, состояния атмосферы, рельефа местности и др.

Наиболее опасными являются верховые пожарами. На их долю приходится до 70 % выгоревшей площади. Верховой пожар распространяется по кронам деревьев. При этом чаще всего горит весь древостой. Возникновение и развитие верховых пожаров происходит, в основном, от низовых в древостоях с низкоопущенными кронами, в разновозрастных хвойных, в многоярусных и с обильным подростом насаждениях, а также в горных лесах. Скорость верховых пожаров: устойчивого – 300-1500 м/ч, беглого – 4000-5000 м/ч [2].

Следует отметить, что до сих пор не выяснены до конца механизмы и условия возникновения различных видов лесных пожаров. Тушение лесных пожаров требует больших затрат сил и средств и, в подавляющем большинстве случаев, малоэффективно или невозможно. Экспериментальные методы изучения лесных пожаров являются дорогостоящими и не позволяют проводить полное физической моделирование данного явления, представляют интерес теоретические методы исследования. [3]

Поэтому изучение данного явления с использованием метода математического моделирования помогает разработать профилактические меры по предотвращению и определению возможности возникновения лесных пожаров, ведь математическая модель — это приближенное описание объекта моделирования, выраженное с помощью математической символики.

В данной статье приводятся результаты расчётов возникновения и распространения верхового лесного пожара по осреднённой по высоте полого леса в двухмерной постановке, полученной на основе общей математической модели пожаров [1-3]. Пусть начало системы координат $x_1, x_2, x_3 = 0$ связано с центром источника возникновения лесного пожара, ось Ox_3 направлена вверх, а оси Ox_1 и Ox_2 – параллельно поверхности земли (ось x_1 совпадает с направлением ветра) (рис. 1).

В связи с тем, что горизонтальные размеры лесного массива много больше вертикального размера, общая трёхмерная система дифференциальных уравнений, описывающая процессы тепломассопереноса в лесном массиве [1, 3], может быть проинтегрирована по вертикальной координате x_3 . Осреднение исходных характеристик по высоте полого леса h произведено с целью упрощения математической постановки задачи. Приводя основную систему уравнений, по аналогии с [2], к дивергентному виду [2], проинтегрируем её по высоте от напочвенного покрова до уровня верхней границы полого леса. Считается, что: 1) течение носит развитый турбулентный характер и молекулярным переносом, по сравнению с турбулентным, пренебрегаем; 2) плотность газовой фазы не зависит от давления из-за малости скорости течения по сравнению со скоростью звука; 3) среда находится в локально-термодинамическом равновесии; 4) известна скорость ветра над напочвенным покровом в невозмущённых

условиях; 5) газодисперсная смесь бинарна и состоит из частиц конденсированной фазы, а также газовой фазы – компонентов кислорода, газообразных горючих и инертных компонентов; 6) характерные размеры лесного массива в горизонтальном направлении превышают высоту полога леса.

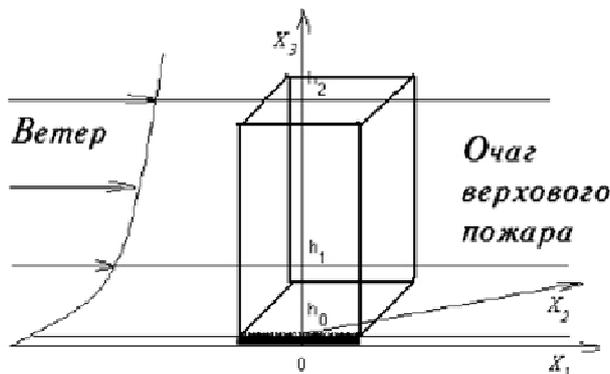


Рис. 1. Схема расчётной области

Данная выше задача сводится к решению следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j) = \dot{m}, \quad j = 1, 2, \quad i = 1, 2; \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v'_i v'_j}) - \rho s c_d v_i |v| - \rho g_i - \dot{m} v_i + (\tau_i^- - \tau_i^+) / h; \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho c_p v'_j \overline{T'}) + q_5 R_5 - \alpha_v (T - T_s) + (q_T^- - q_T^+) / h + k_g (c U_R - 4\sigma T^4); \quad (3)$$

$$\rho \frac{dc_\alpha}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho v'_j c'_\alpha) + R_{5\alpha} - \dot{m} c_\alpha + (J_\alpha^- - J_\alpha^+) / h, \quad \alpha = 1, 5; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_j} \right) - k c U_R + 4k_s \sigma T_s^4 + 4k_g \sigma T^4 + (q_R^- - q_R^+) / h = 0, \quad k = k_g + k_s; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i c_{pi} \Phi_i \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s (c U_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_V (T - T_s); \quad (6)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \quad \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_C R_{1s} - \frac{M_C}{M_1} R_{3w}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0; \quad (7)$$

$$\sum_{\alpha=1}^5 c_{\alpha} = 1, \quad p_e = \rho RT \sum_{\alpha=1}^5 \frac{c_{\alpha}}{M_{\alpha}}, \quad \vec{v} = (v_1, v_2, v_3), \quad \vec{g} = (0, g),$$

$$\dot{m} = (1 - \alpha_c)R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1}R_3 + R_{53} + R_{54},$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2}R_5, \quad R_{52} = v(1 - \alpha_c)R_1 - R_5, \quad R_{53} = \alpha_6 R_1,$$

$$R_{54} = \frac{\alpha_4 w}{w + w_*} R_3, \quad R_{55} = 0;$$

$$t = 0: v_i = 0, T = T_e, c_{\alpha} = c_{\alpha e}, T_s = T_e, \varphi_k = \varphi_{ke}, i = 1, 2, 3; k = \overline{1, 5}; \alpha = \overline{1, 5}; \quad (9)$$

$$x_1 = x_{1e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial c_{\alpha}}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + \frac{c U_R}{2} = 0; \quad (10)$$

$$x_2 = x_{2e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial c_{\alpha}}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} + \frac{c U_R}{2} = 0 \quad (11)$$

$$\rho v_3 = h_0 \dot{m}, T = T_s = \begin{cases} T_e + \frac{t}{t_0}(T_0 - T_e), t \leq t_0 \\ T_e + (T_0 - T_e) \exp\left[-k\left(\frac{t}{t_0} - 1\right)\right], t > t_0 \end{cases} \quad (12)$$

Для определения скоростей, реакций пиролиза, испарения влаги, горения кокса и летучих продуктов пиролиза используются формулы [1].

Значение температуры в очаге возникновения пожара $|x_1| \leq \Delta_x, |x_2| \leq \Delta_y$ задаётся в зависимости от времени внутри расчётной области (рис. 1). В представленной выше системе уравнений, начальных и граничных условиях используются следующие обозначения:

$R_1 - R_5, R_{5\alpha}$ – массовые скорости пиролиза лесных горючих материалов, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза, образования сажи и пепла и образования α – компонентов газодисперсной фазы;

t_0 – время формирования очага горения;

$c_{pi}, \rho_i, \varphi_i$ – удельные теплоемкости, истинные плотности и объёмные доли i -й фазы (1 – сухое органическое вещество, 2 – вода в жидко-капельном состоянии, 3 – конденсированные продукты пиролиза, 4 – минеральная часть, 5 – газовая фаза);

T, T_s – температура газовой и конденсированной фаз;

c_{α} – массовые концентрации ($\alpha = 1$ – кислород, 2 – горючие продукты пиролиза, 3 – сажа, 4 – пепел, 5 – инертные компоненты воздуха);

p – давление;
 U_R – плотность энергии излучения;
 σ – постоянная Стефана-Больцмана;
 k – коэффициент ослабления излучения;
 k_g, k_s – коэффициенты поглощения для газодисперсной и конденсированной фаз;
 α_V – коэффициент обмена фаз;
 q_i, E_i, k_i – тепловые эффекты энергии активации и предэкспоненты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза;
 s_σ – удельная поверхность элемента лесных горючих материалов;
 M_α, M_c, M – молекулярные веса индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси;
 s, c_d – удельная поверхность фитомассы и эмпирический коэффициент сопротивления полого леса;
 c – скорость света;
 v_i – проекции скорости на оси x_i ;
 α_c, v – коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза;
 \dot{m} – массовая скорость образования газодисперсной фазы;
 α_4, α_6 – эмпирические константы;
 g – ускорение свободного падения;
 $\dot{c}^-, \dot{c}^+, \tau_i^-, \tau_i^+, J_\alpha^-, J_\alpha^+, q_T^-, q_T^+, q_R^-, q_R^+$ – переменные, полученные при осреднении характеристик по высоте полого леса.

Индексы "0" и "e" относятся к значениям функций в очаге горения и на большом расстоянии от зоны пожара соответственно. Верхний индекс " ^ " относится к пульсационной составляющей данной величины.

Для численного интегрирования исходной системы уравнений используется метод контрольного объёма.

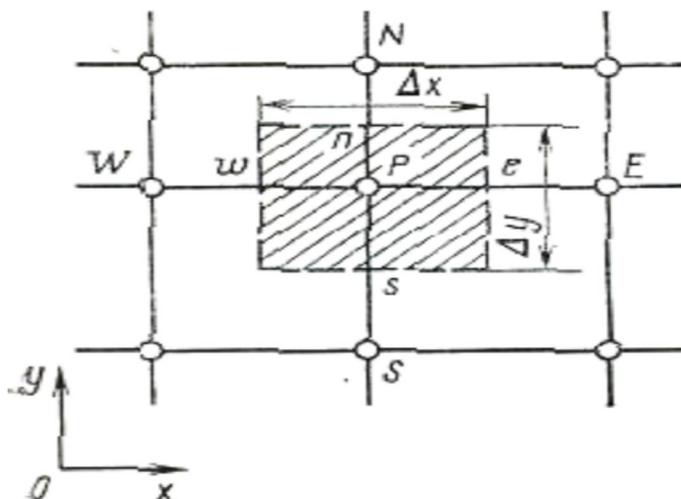


Рис. 2. Контрольный объём (заштрихованная область) для двухмерного случая

Расчётную область разбиваем на некоторое число не пересекающихся контрольных объёмов. Затем исходную систему уравнений интегрируем по каждому контрольному объёму.

Система уравнений (1)-(7) редуцирована к дискретной форме с помощью метода контрольного объёма [4]. Сеточные уравнения, возникающие в процессе дискретизации, разрешались с помощью метода *SIP* [2]. Алгоритм решения приведенной задачи включает в себя расщепление по физическим процессам, то есть вначале рассчитывалась гидродинамическая картина, а затем решались уравнения химической кинетики и учитывались химические источники для скалярных функций. При этом шаг по времени для интегрирования системы обыкновенных уравнений выбирался автоматически. Согласование полей скорости и давления осуществлялось в рамках алгоритма SIMPLE [4].

На основе изложенной математической модели были проведены численные расчёты по определению картины процесса возникновения верхового лесного пожара в результате зажигания полога леса от заданного очага горения.

В результате численного интегрирования получены поля распределения линий равного уровня (изолиний) температуры, концентраций кислорода и летучих горючих продуктов пиролиза при распространении верховых лесных пожаров через противопожарные разрывы. На основе полученных данных нами изучена зависимость критических размеров противопожарных разрывов от основных характеристик лесных массивов и скорости ветра (рис. 3-4).

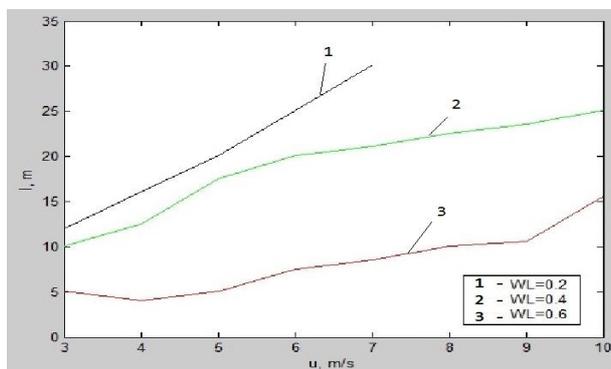


Рис. 3. Зависимость минимальной ширины разрыва от скорости ветра и влагосодержания ЛГМ

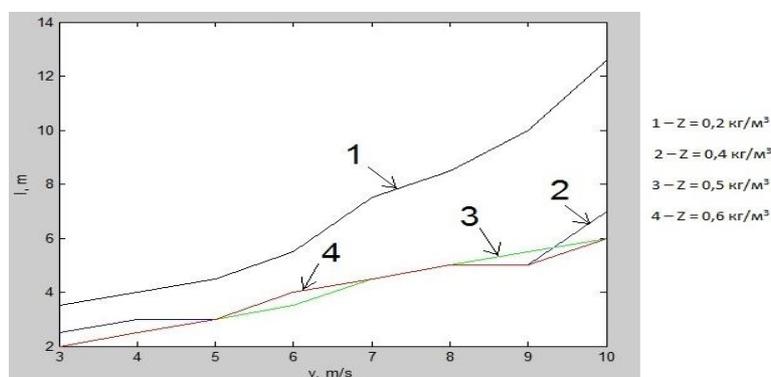


Рис. 4. Зависимость минимальной ширины разрыва от скорости ветра и запасов ЛГМ

Анализируя рис. 3-4 можно сделать вывод, что с увеличением скорости ветра необходимо увеличивать разрыв, а так же чем больше влаги содержится в ЛГМ и чем больше его запас, тем меньшая ширина просеки требуется для предотвращения распространения пожара.

На рис. 5-6 *а* и *б* представлены распределения основных функций для двух случаев преодоления и не преодоления разрывов.

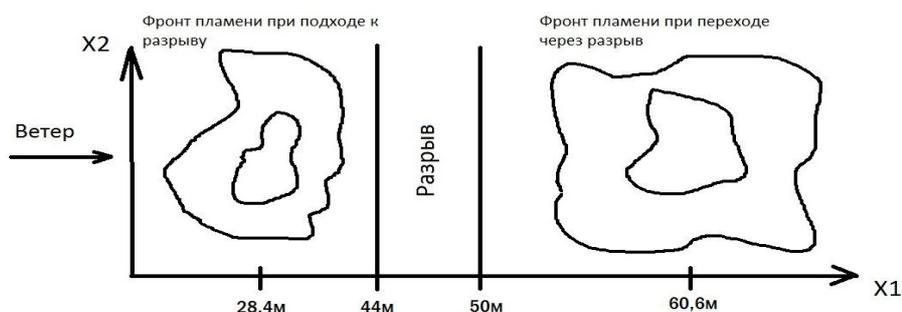
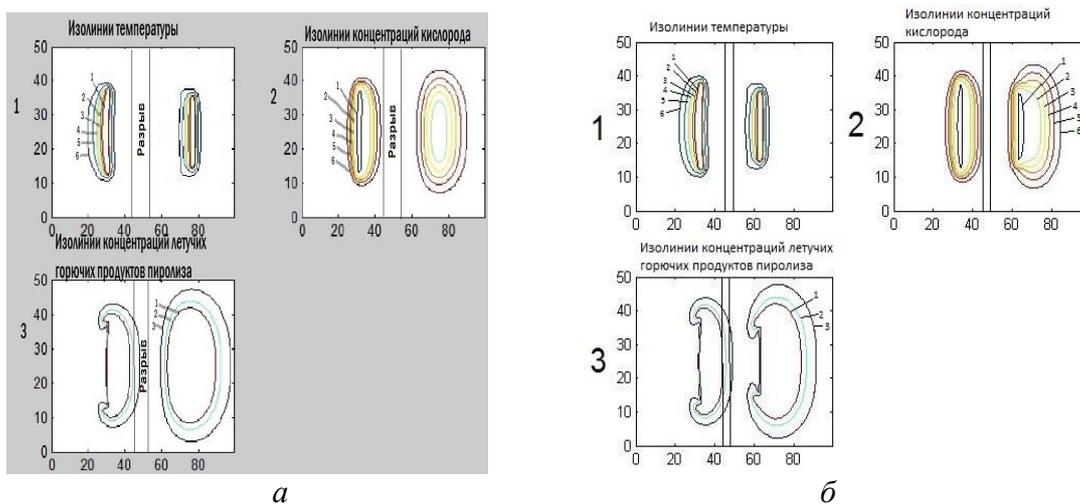


Схема 1. Схема распространения пожара через противопожарный разрыв



Изотермы газовой фазы \bar{T} ($\bar{T} = T/T_e, T_e = 300K$):

1 – 1,5; 2 – 2; 3 – 2,6; 4 – 3; 5 – 3,5; 6 – 4

Изолинии концентрации кислорода ($\bar{c}_1 = c_1/c_{1e}, c_{1e} = 0,23$):

1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 0,6; 4 – 0,7; 5 – 0,8; 6 – 0,9

Изолинии концентрации продуктов пиролиза \bar{c}_2 ($\bar{c}_2 = c_2/c_{1e}, c_{1e} = 0,23$):

1 – 0,01; 2 – 0,05; 3 – 0,1

Рис. 5. Распределения линий равного уровня (изолиний) температуры, концентраций кислорода и летучих горючих продуктов пиролиза:

а – зависимость от влагосодержания ЛГМ;

б – зависимость от запасов ЛГМ

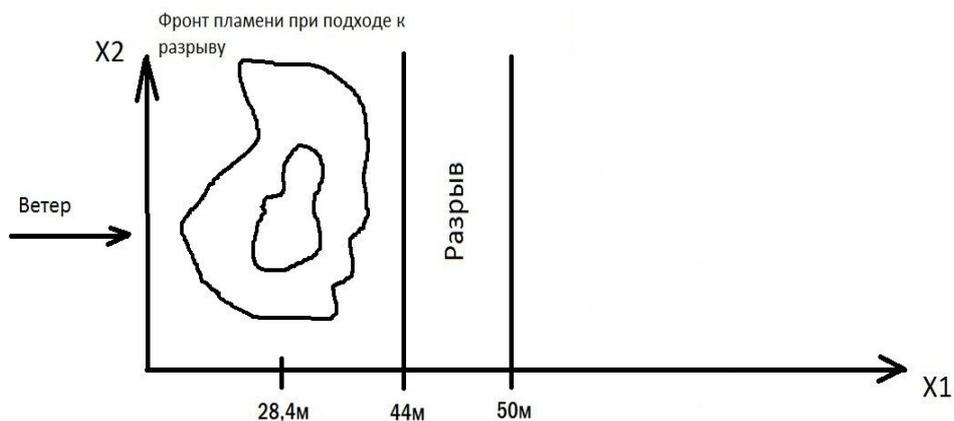
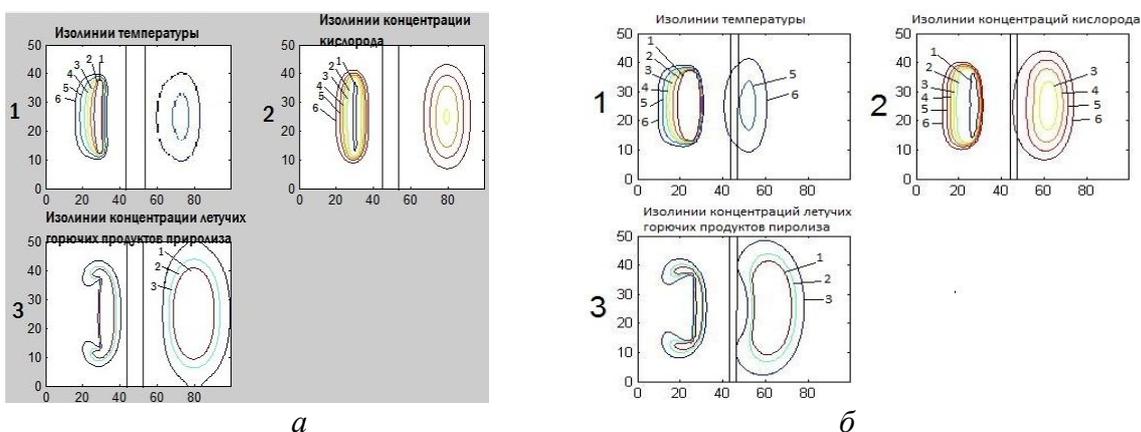


Схема 2. Схема, когда пожар подходит к разрыву, но не переходит через него



Изотермы газовой фазы \bar{T} ($\bar{T} = T / T_e, T_e = 300K$):

1 – 1,5; 2 – 2; 3 – 2,6; 4 – 3; 5 – 3,5; 6 – 4

Изолинии концентрации кислорода ($\bar{c}_1 = c_1 / c_{1e}, c_{1e} = 0,23$):

1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 0,6; 4 – 0,7; 5 – 0,8; 6 – 0,9

Изолинии концентрации продуктов пиролиза \bar{c}_2 ($\bar{c}_2 = c_2 / c_{1e}, c_{1e} = 0,23$):

1 – 0,01; 2 – 0,05; 3 – 0,1

Рис. 6. Распределения линий равного уровня (изолиний) температуры, концентраций кислорода и летучих горючих продуктов пиролиза:

а – зависимость от влагосодержания ЛГМ;

б – зависимость от запасов ЛГМ

Следовательно, с использованием данной математической модели можно получить критические условия распространения верхового лесного пожара при заданных размерах разрыва, иначе говоря, зависимость скорости распространения от скорости ветра, влагосодержания *лесных горючих материалов (ЛГМ)* и их запасов, что, в свою очередь, даёт возможность применять такой метод расчётов для профилактики и разработки новых методик профилактики и борьбы с верховыми лесными пожарами.

При увеличении скорости распространения верхового лесного пожара происходит уменьшение влагосодержания лесных горючих материалов. И соответственно, если увеличивается скорость ветра (скорость движения воздушных масс), то скорость распространения верхового лесного пожара увеличивается. Кроме того, при увеличении скорости ветра необходимо увеличивать ширину разрыва, а меньшему запасу ЛГМ соответствует большая ширина разрыва.

Литература

1. **Гришин А.М., Грузин А.Д., Зверев В.Г.** Математическая теория верховых лесных пожаров // Теплофизика лесных пожаров. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР. 1984. С. 38-75.
2. **Щетинский Е.А.** Тушение лесных пожаров: Пособие для лесных пожарных. М.: ВНИИЛМ, 2002. 104 с.
3. **Perminov V.** Numerical Solution of Reynolds equations for Forest Fire Spread // Lecture Notes in Computer Science. 2002. V. 2329. P. 823-832.
4. **Патанкар С.В.** Численные метода решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.