

УДК 630:614.841:519.876

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЕРХОВЫХ ЛЕСНЫХ
ПОЖАРОВ С УЧЕТОМ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ
ПРЕГРАД**

Е.А. Халдина

Томский политехнический университет
E-mail: xaldina@sibmail.com

Елена Алексеевна Халдина, студентка кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности Института неразрушающего контроля ТПУ.
E-mail: xaldina@sibmail.com
Область научных интересов: математическое моделирование процессов тепломассопереноса и горения, лесных пожаров и загрязнения окружающей среды.

Лесные пожары являются чрезвычайно сложным и разрушительным природным явлением, возникновение и развитие которых зависят от запаса и влагосодержания лесных горючих материалов, метеорологических условий, рельефа местности и других факторов. Общей целью исследования лесных пожаров является более глубокое понимание данного явления. Математическая модель лесных пожаров разработана на основе анализа известных экспериментальных данных и использования понятий и методов

механики реагирующих сред. В работе проводится теоретическое исследование возникновения и распространения лесных пожаров при наличии противопожарных разрывов. С помощью метода математического моделирования получены распределения температуры и концентрации продуктов пиролиза и горения с течением времени, на основании которых изучаются предельные условия распространения верховых лесных пожаров для различных условий.

Ключевые слова:

Лесной пожар, математическая модель, дискретный аналог, контрольный объем, распространение пожара.

Введение

Ежегодно в России возникают десятки тысяч лесных пожаров, в результате которых сгорает более 1 млн га леса. Еще большее количество леса при этом повреждается, а затем гибнет. Так, тепловое излучение от фронта пожара непосредственно воздействует на камбиальный слой дерева, а это приводит к его гибели. Кроме того, за счет теплопередачи изменяется химический состав и структура, микрофлора и фауна почвы, повреждаются поверхностные корни деревьев.

Ущерб от лесных пожаров не ограничивается стоимостью уничтоженной древесины, которая не превышает 10 % от всех полезных свойств леса (почвозащитных, водоохраных, кислородопродуцирующих, санитарно-гигиенических и других). Различные виды лесных пожаров (низовые, верховые, почвенные и др.) представляют собой опасные стихийные бедствия, приносящие огромный ущерб и создающие угрозу для людей и материальных ресурсов, находящихся вблизи районов их возникновения и развития [1].

Возникновение и распространение лесных пожаров зависят от различных условий (климатических: скорости ветра, температуры окружающей среды, состояния атмосферы и т. д.), рельефа местности, запаса и влагосодержания лесных горючих материалов и других факторов. Одной из наиболее опасных форм лесных пожаров являются верховые, на долю которых приходится 70 % выгоревшей площади и наибольшие убытки [1].

Постановка задачи

Пусть в рассматриваемой области имеется очаг 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). Проинтегрируем трехмерную систему уравнений Рейнольдса для описания рассматри-

ваемого лесного пожара, предложенную в [1], по высоте полога леса. При получении данной математической модели сделаны следующие допущения:

- течение носит развитый турбулентный характер, молекулярным переносом пренебрегаем по сравнению с турбулентным;
- плотность газовой фазы не зависит от давления из-за малости скорости течения по сравнению со скоростью звука;
- среда находится в локально-термодинамическом равновесии;
- известна скорость ветра над пологом леса в невозмущенных условиях;
- газодисперсная смесь бинарна и состоит из частиц конденсированной фазы, а также газовой фазы – компонентов кислорода, газообразных горючих и инертных компонентов;
- характерные размеры лесного массива в горизонтальном направлении превышают высоту полога леса.

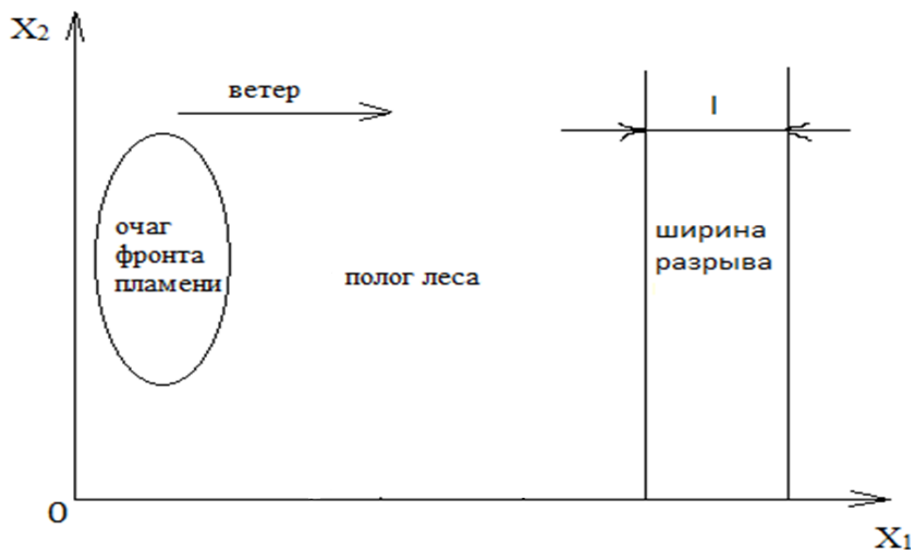


Рис. 1. Схема расчетной области

Математически представленная выше задача сводится к решению следующей системы уравнений:

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

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v'_i v'_j}) - \rho s c_d v_i |v| - \rho g_i - n_i; \tag{2}$$

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

$$\rho \frac{dc_\alpha}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v'_j c'_\alpha}) + R_{s\alpha} - n_\alpha, \quad \alpha = 1, 4; \tag{4}$$

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

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

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3, \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0; \quad (7)$$

$$\sum_{\alpha=1}^5 c_{\alpha} = 1, P_e = \rho_5 RT \sum_{\alpha=1}^5 \frac{c_{\alpha}}{M_{\alpha}}, \mathbf{v} = (v_1, v_2), \mathbf{g} = (0, g).$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5, R_{52} = \nu(1 - \alpha_c) R_1 - R_5, R_{53} = \alpha_6 R_1, R_{54} = \frac{\alpha_4 w}{w + w_*} R_3, R_{55} = 0.$$

В представленной выше системе уравнений начальных и граничных условий используются следующие обозначения: $R_1 \dots R_5, R_{5\alpha}$ – массовые скорости пиролиза лесных горючих материалов, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза, образования сажи, пепла и α -компонентов газодисперсной фазы; t_0 – время формирования очага горения; $c_{pi}, \rho_i, \varphi_i$ – удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные 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_{ν} – 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, ν – коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза; \dot{m} – массовая скорость образования газодисперсной фазы; v_{3*} – характерная скорость вдува из очага лесного пожара; α_4, α_6 – эмпирические константы; g – ускорение свободного падения. 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.

Начальные и граничные условия.

$$t = 0 : v_1 = 0, v_2 = 0, v_3 = 0, T = T_e, c_{\alpha} = c_{\alpha e}, T_s = T_e, \varphi_1 = \varphi_{1e};$$

$$x_1 = -x_{1e} : v_1 = V_e, v_2 = 0, v_3 = 0, T = T_e, c_{\alpha} = c_{\alpha e}, -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + \frac{c U_R}{2} = 0;$$

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

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

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

Для системы уравнений (1–7) с учетом начальных и граничных условий с помощью метода контрольного объема [4] получен дискретный аналог. Для нахождения решения использовался метод SIP [5].

Метод решения и результаты расчетов

Ежегодно проводится комплекс профилактических мероприятий, направленных на снижение пожарной опасности. К таким мероприятиям можно отнести создание в лесу просеки шириной до 20 м, очищенной от горючих материалов, с минерализованной полосой или доро-

гой с целью организации препятствий на пути распространения лесных пожаров и создающий условия для их тушения. Это так называемый противопожарный разрыв, который предназначен для остановки распространения верховых и сильных низовых лесных пожаров.

Противопожарные мероприятия целесообразно осуществлять при закладке лесных культур или формировании (стимулировании хорошего роста и качества) естественных молодняков ценных пород. К долгосрочным и надежным мероприятиям при закладке лесных культур относятся мероприятия по дополнительному расчленению участка сплошными полосами, состоящими из лиственных пород (деревьев или кустарников) шириной не менее 3,5 м, или полосами (особенно важно при формировании ценных хвойных молодняков), образующими клетки 150 × 150 м (вместо высадки лиственных пород допустима грубая минерализация почвы, стимулирующая самосев лиственных пород). Эти мероприятия, независимо от качества контурного противопожарного разрыва, необходимо относить к высшей категории противопожарного устройства конкретного участка.

Показателями, определяющими качество вновь созданных противопожарных разрывов и после ухода, являются: уменьшение их ширины (от проектной), наличие на разрыве горючих материалов (древесного хлама, мусора, порубочных остатков и пожароопасного хвойного подраста), возможность проезда транспортных средств.

В ходе данной работы исследуется такой параметр лесного массива, как ширина противопожарного разрыва различного рода (просеки, дороги, поляны и т. д.). Были проведены численные расчеты для определения значений ширины разрыва, при котором пожар переходит его либо не преодолевает данный разрыв. Также с помощью численных расчетов получено минимальное расстояние разрыва, при котором фронт пожара останавливается и уже не распространяется на дальнейшие участки. Для определения картины процесса возникновения верхового лесного пожара в результате зажигания полога леса от заданного очага горения были проведены численные расчеты на основе изложенной выше математической модели.

В результате численного интегрирования получены поля температур, массовых концентраций компонент газовой фазы и объемных долей компонент твердой фазы. На рис. 2–4 представлены распределения данных функций. На основании изменения распределений изотерм газовой фазы, изолиний концентраций кислорода и продуктов пиролиза с течением времени можно сделать вывод о перемещении фронта пожара по направлению ветра (ось x_1) и его расширении в перпендикулярном направлении ветру по оси x_2 .

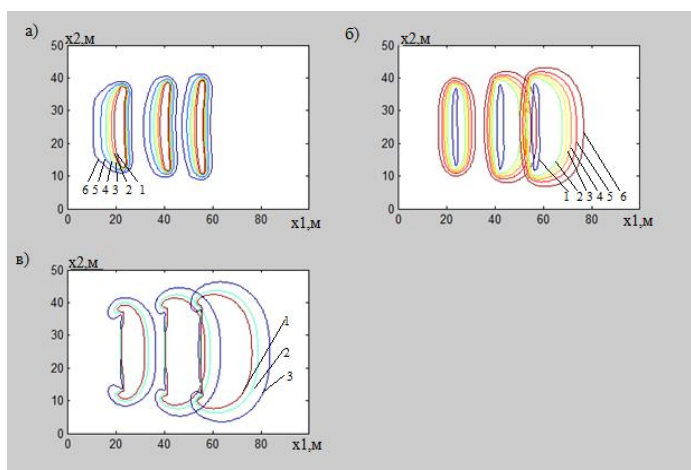


Рис. 2. Распределения изолиний при отсутствии разрыва: а) изотермы газовой фазы \bar{T} ($\bar{T} = T/T_e, T_e = 300 \text{ K}$): 1 – 4; 2 – 3,5; 3 – 3; 4 – 2,6; 5 – 2,0; 6 – 1,5; б) изолинии концентрации кислорода ($\bar{c}_1 = \bar{n}_1 / c_{1e}, \bar{n}_{1e} = 0,23$): 1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 0,6; 4 – 0,7; 5 – 0,8; 6 – 0,9; в) изолинии концентрации продуктов пиролиза \bar{c}_2 ($\bar{c}_2 = \bar{n}_2 / c_{1e}, \bar{n}_{2e} = 0,23$): 1 – 0, 1; 2 – 0,05; 3 – 0,01

На рис. 3 представлены результаты расчетов распространения фронта верхового лесного пожара при наличии противопожарного разрыва в лесном массиве. Размеры фронта пожара в

направлении оси x_2 в окрестности разрыва остаются неизменными, а далее, преодолев разрыв, лесной пожар продолжает распространяться по направлению оси x_1 , совпадающей с направлением ветра, и расширяется в перпендикулярном направлении (по оси x_2). В данном случае ширины противопожарного разрыва недостаточно, чтобы остановить распространение фронта верхового лесного пожара.

Далее увеличим ширину противопожарного разрыва, чтобы определить минимальные размеры противопожарного разрыва, при котором распространение фронта верхового лесного пожара невозможно. Из рис. 4 видно, что после разрыва продвижение фронта пожара прекращается – пожар не преодолевает его. Изотермы газовой фазы и изолинии концентраций кислорода и продуктов пиролиза равномерно распределены только до разрыва.

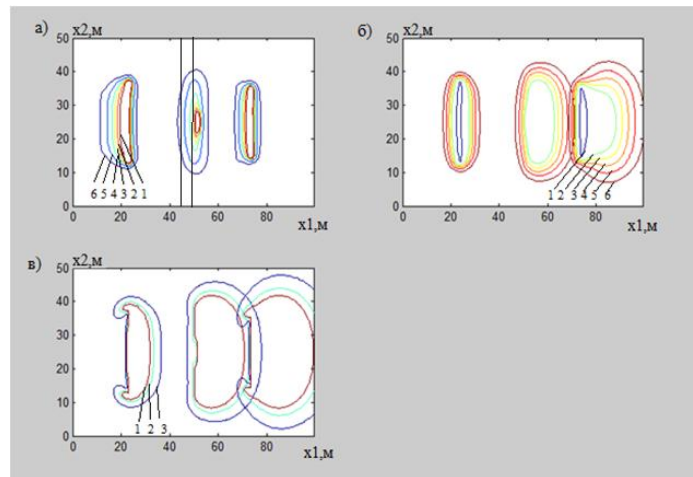


Рис. 3. Распределения изолиний для случая преодоления разрыва фронтом пожара: а) изотермы газовой фазы; б) изолинии концентрации кислорода; в) изолинии концентрации продуктов пиролиза

Во всех предыдущих случаях изучались противопожарные разрывы бесконечной длины. Однако представляет интерес изучение влияния на распространение фронта пожара противопожарных преград конечной ширины (например, поляны)

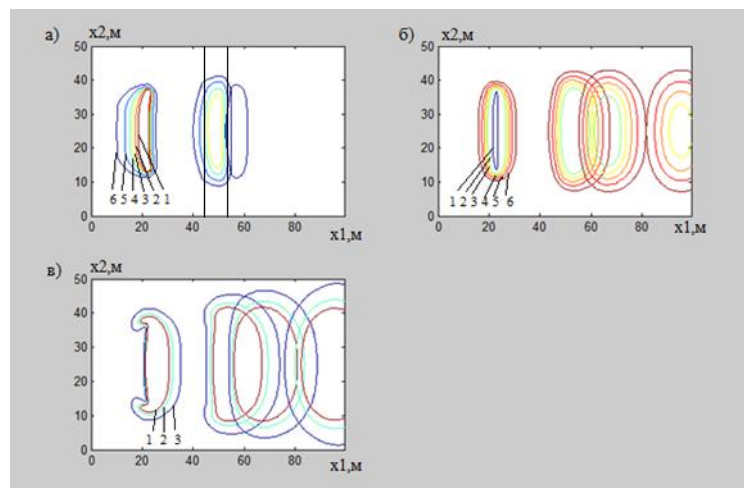


Рис. 4. Распределения изолиний в случае затухания пожара: а) изотермы газовой фазы; б) изолинии концентрации кислорода; в) изолинии концентрации продуктов пиролиза

На рис. 5 показаны результаты расчетов при распространении фронта пожара вокруг поляны при скорости ветра 5 м/с. Скорость ветра совпадает с направлением оси x_1 . Изначально источник пожара имеет форму прямоугольника. Изотермы деформируются под действием вет-

ра, и контур лесного пожара имеет форму полумесяца (рис. 5, а, изотермы I). Когда пожар (рис. 5, а, изотермы II) движется вокруг лесной поляны, он делится на две части. Но после этого два фронта пожара объединяются в единый фронт (рис. 5, а, изотермы III). На рис. 5, б и с представлено распределение концентраций кислорода и горючих летучих продуктов пиролиза в этом случае.

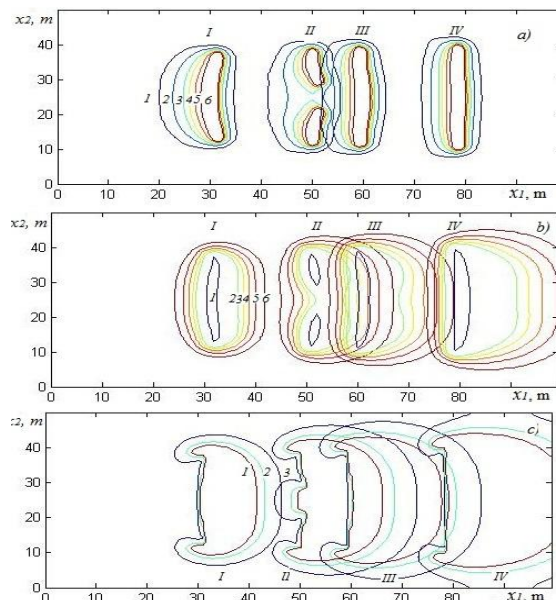


Рис. 5. Распределение изотерм газовой фазы (а), изолиний кислорода (б) и летучих продуктов пиролиза (с)

Выводы

Предложенная в работе методика может быть использована для оценки размеров противопожарных разрывов в зависимости от характеристик лесных массивов и типичных метеоусловий, реализуемых в данной местности.

Проблема борьбы с лесными пожарами — проблема сложная, многогранная и как никогда актуальная. Решение ее требует привлечения и взаимодействия специалистов в различных областях — экологов, лесников, экономистов, пожарных, экообразователей, специалистов по сохранению биоразнообразия и охране здоровья человека и т. д.

Предупреждение возникновения лесных пожаров должно осуществляться посредством лесной пропаганды и агитации, регулирования посещаемости лесов населением, контроля за соблюдением правил пожарной безопасности, организационно-технических и лесоводственных мероприятий, снижающих вероятность возникновения пожаров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. — Новосибирск: Наука, 1997. — 408 с.
2. 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.
3. Перминов В.А. Численное решение задачи о распространении верхового лесного пожара с учетом преград // Контроль. Диагностика. — 2013. — № 13. — С. 102–106.
4. Патанкар С.В. Численные метода решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.
5. Stone H.L. Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations // SIAM Journal of Numerical Analysis. — 1968. — № 5. — P. 530–558.

Поступила 13.11.2013 г.