

УДК 162.3

*Калиновский А.Я., адъюнкт,
Созник А.П., д-р физ.-мат. наук, проф.*

Академия гражданской защиты Украины

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА

Предложена простая аналитическая модель для описания азимутальной зависимости скорости распространения контура низового лесного (степного) пожара. Проведены расчеты годографа скорости для различных горючих материалов.

Постановка проблемы. К настоящему времени проблеме лесных пожаров и пожарной безопасности лесов посвящено большое количество экспериментальных и теоретических исследований (см., напр. [1-7] и ссылки там же). Теоретические методы прогнозирования процесса выгорания при развитии лесного пожара можно условно разделить на два широких класса: локальные и глобальные модели распространения контура [1, 2]. Под глобальностью (в USA, Canada) понимают, согласно терминологии Доррера, оперативно-тактическое прогнозирование на основе упрощенных геометрических моделей, которые отвлекаются от сути процессов горения. Локальные же модели решают проблему описания лесного пожара исходя из уравнений [5], позволяющих учитывать динамику процессов горения. При этом учет вязкости, турбулентности, теплопроводности и излучения, диффузии, конвекции и целого ряда других факторов в сочетании с термодинамическими уравнениями состояния приводит к чрезвычайно сложным интегро-дифференциальным уравнениям. Необходимость задания определенных начальных и граничных условий еще более усложняет решение такой задачи.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время большое внимание уделяется глобальным (экспериментально-аналитическим [4, 7]) моделям.

В этом подходе, опираясь на известные усредненные эмпирические или теоретические значения основных параметров лесных пожаров, рассматривают относительно простые модели, которые позволяют описать распространение кромки пожара. При этом, не вдаваясь в тонкие физические детали процесса развития пожара, желательно учитывать такие основные факторы, как например, направление и скорость ветра, влажность, теплотворную способность и пространственное распределение горючего материала, топографию ландшафта и другие. В частности, широкое распрост-

ранение получили геометрические методы описания контура пожара [1, 2, 4, 6, 8-11].

Постановка задачи и ее решение. Для определения границы выгорания недостаточно знания только скоростей распространения фронтальной V_f , тыловой V_b и фланговой V_{fl} кромки пожара относительно направления скорости ветра V_w . Необходимо также ввести некоторые дополнительные предположения относительно азимутальной зависимости скорости V , то есть рассмотреть зависимость скорости движения контура от азимутального угла ϕ между направлением скорости ветра и направлением распространения кромки пожара. Такая зависимость будет описывать годограф скорости горения [4] или единичный контур горения [10].

Рассмотрим точечный очаг загорания и предположим, что нам известны скорости V_f, V_b, V_{fl} . Как отмечено в [4,8-10], наличие ветра приводит к деформации кругового контура выгорания (при $V_w=0$) в контур эллиптической формы. Исходя из этой гипотезы, будем описывать эллипс (рис. 1) большой осью $AB=2a=V_f+V_b$ и малой полуосью $O'C=b=V_{fl}$.

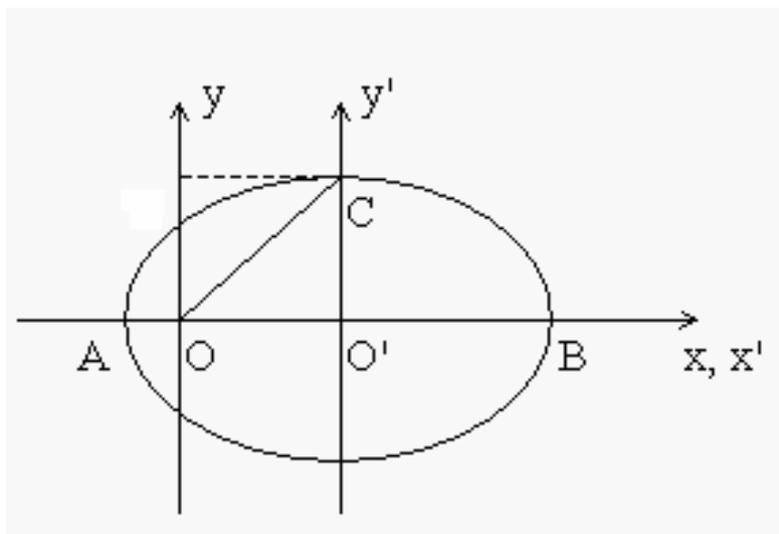


Рис. 1 – К построению годографа скорости $V(V_w, \varphi)$

Тогда в декартовой системе координат $O'X'Y'$ с началом в центре эллипса (рис. 1), получим уравнение:

$$\frac{x'^2}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

В такой системе координат \vec{V}_w параллельна оси OX' . В системе координат с центром в т. О, которая сдвинута вдоль оси OX' на расстояние $OO' = \frac{V_f + V_b}{2} - V_b = \frac{V_f - V_b}{2} = \beta$, уравнение (1) имеет вид:

$$\frac{(x - \beta)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (2)$$

В новой системе координат OXY величины $AO = (V_f + V_b)/2 - ((V_f + V_b)/2 - V_b) = V_b$ и $OB = (V_f + V_b)/2 + ((V_f + V_b)/2 - V_b) = V_f$ определяют скорости V_f и V_b от центра пожара, расположенного в т. О. Подчеркнем, что т. О не совпадает с фокусом эллипса.

Переходя в (2) к полярной системе координат с полюсом в т. О, получаем выражение для годографа скорости кромки пожара

$$V(V_w, \varphi) = \frac{b^2 \beta \cos \varphi + \sqrt{b^4 a^2 \cos^2 \varphi + a^2 b^2 (a^2 - \beta^2) \sin^2 \varphi}}{b^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi}, \quad (3)$$

где φ - полярный угол, а полярная ось совпадает с осью OX .

Данная формула, в принципе, и решает поставленную задачу, описывая искомый годограф скорости, который построен по четырем точкам в виде эллипса. Подставляя в данную формулу известные, из экспериментов для разных типов лесных горючих материалов (ЛГМ) значения V_f , V_b и V_{fl} , получаем годографы скорости распространения лесного низового пожара.

В [3] из экспериментальных исследований получены такие выражения для скоростей распространения низового лесного пожара:

$$\left. \begin{aligned} V_f &= V_0(1 + \alpha)^2 \\ V_b &= V_0(1 - \alpha)^2 \\ V_{fl} &= V_0 = v_0 + kV_w \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{V_w}{\sqrt{V_w^2 + c^2}}, \quad (5)$$

где v_0 - скорость движения огня при $V_w = 0$ м/с, k - коэффициент, учитывающий раздувающее действие ветра, c - коэффициент, связанный с удельной теплоемкостью горючих материалов, м/с. Значение параметров v_0 , k и c зависят от влажности и состава горящего материала.

Подставляя (4), (5) в (3) получаем выражение для годографа скорости

$$V(V_w, \varphi) = V_0 \frac{2\alpha \cos \varphi + (1 + \alpha^2) \sqrt{\cos^2 \varphi + (1 - \alpha^2)^2 \sin^2 \varphi}}{\cos^2 \varphi + (1 + \alpha^2)^2 \sin^2 \varphi}, \quad (6)$$

которое было найдено в [11]. Следовательно, полученная в [11] формула (6), является частным случаем выражения (3).

В [3] приведены числовые значения v_0 , k и c для следующих типов ЛГМ: сухая трава, лишайники, опад хвои и листьев, зеленые мхи. Формулы (4) и (5), а значит и (6), справедливы при $V_w \leq 8$ м/с.

В [9] для случая горения сосняков лишайниково-мшистых и вересковых в результате проведения экспериментальных измерений получены следующие выражения

$$\left. \begin{aligned} V_f &= A + BV_w^2 \\ V_b &= C + DV_w^2 \\ V_{fl} &= E \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где параметры A , B , C , D и E зависят от вида ЛГМ и влажности. Приведенные в [9] величины A , C , и E имеют размерность м/мин, B – с²/(м*мин), D – с/мин, а V_w – м/с, при этом V_f , V_b и V_{fl} – м/мин. Отметим, что формулы (7) справедливы при $V_w \leq 2$ м/с.

Подставляем (7) в (3) получаем следующее выражение для годографа скорости:

$$V(V_w, \varphi) = \frac{F_2 E^2 \cos \varphi + F_1 E \sqrt{E^2 \cos^2 \varphi + (A + BV_w^2)(C + DV_w^2) \sin^2 \varphi}}{2E^2 \cos^2 \varphi + F_1^2 \sin^2 \varphi}, \quad (8)$$

где $F_{1,2} = (A + DV_w^2) \pm (C + DV_w^2)$.

Таким образом, знание значений V_f , V_b и V_{fl} , полученных из экспериментальных или теоретических исследований, позволяет рассчитать согласно (3) годограф скорости распространения низового лесного (или степного) пожара.

Используя выражения (3), (6) и (8) нами рассчитаны годографы $V(V_w, \varphi)$ с параметрами, которые приведены в [3, 9].

На рис. 2 представлены результаты расчетов по формуле (8) при следующих значениях параметров [9]:

- контур 1 – $A=0,30$, $B=0,28$, $C=0,14$, $D=0,08$, $E=0,16$, сосняк лишайниково-мшистий, при $W=20\div 30\%$;
 - контур 2 – $A=0,25$, $B=0,54$, $C=0,20$, $D=0,06$, $E=0,17$, сосняк вересковий, при $W=20\div 25\%$;
 - контур 3 – $A=0,35$, $B=0,67$, $C=0,17$, $D=0,15$, $E=0,19$, сосняк лишайниково-мшистий, при $W=10\div 20\%$;
 - контур 4 – $A=0,30$, $B=0,76$, $C=0,25$, $D=0,09$, $E=0,21$, сосняк вересковий, при $W=10\div 20\%$,
- где W – влажность ЛГМ.

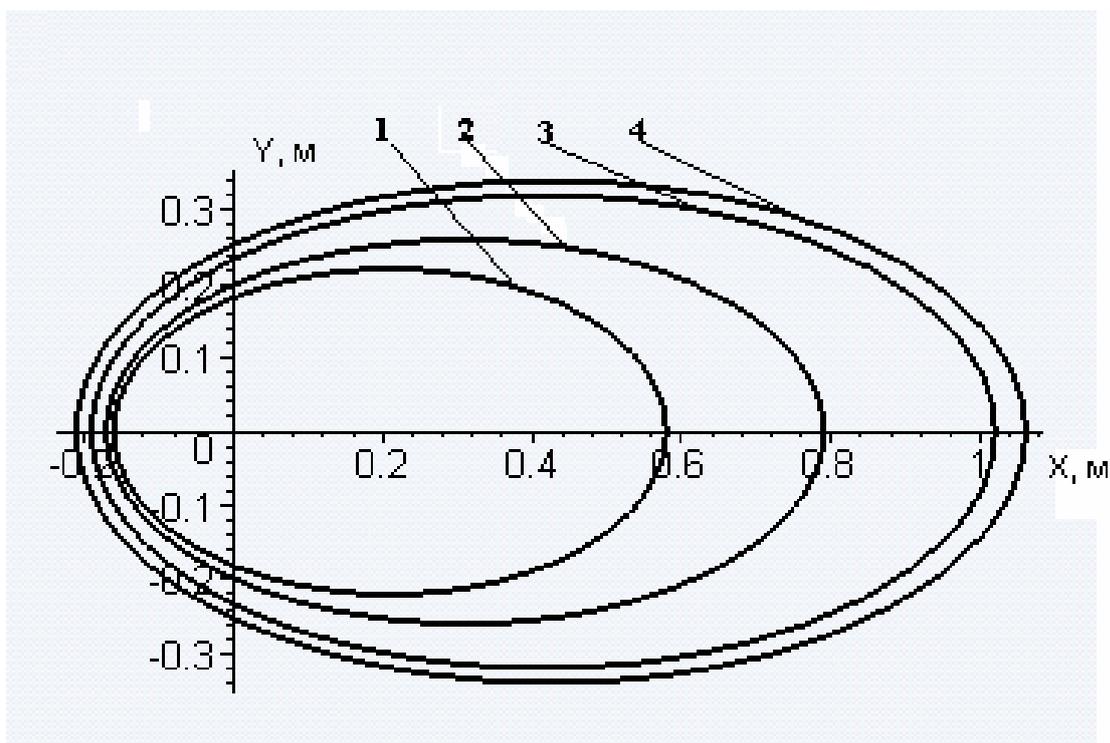


Рис. 2 – Годографы скорости, рассчитанные по формулам (3) и (8) при $V_w=1$ м/с, расстояние по осям в метрах

На рис. 3 изображены годографы скорости лесного низового пожара, рассчитанные по формуле (6) с параметрами [3]:

- контур 1 – $W>50\%$, $k=0,00267$, $c=180$, $V_0=0,3$ м/мин;
- контур 2 – $W=30\div 50\%$, $k=0,0045$, $c=198$, $V_0=0,3$ м/мин;
- контур 3 – $W>50\%$, $k=0,00083$, $c=108$, $V_0=0,3$ м/мин;
- контур 4 – $W=30\div 50\%$, $k=0,00167$, $c=132$, $V_0=0,3$ м/мин;
- контур 5 – $W<30\%$, $k=0,0075$, $c=210$, $V_0=0,5$ м/мин;
- контур 6 – $W<30\%$, $k=0,0033$, $c=144$, $V_0=0,5$ м/мин.

На рис. 2, 3 вдоль осей OX и OY отложены значения скоростей $V(V_w, \varphi)$ в м/мин. Представленные на рис. 2 расчеты показывают зависимость годографа скорости от состояния горючего материала для двух ви-

дов ЛГМ и трех вариантах средней влажности ЛГМ. На рис. 3 приведены расчеты $V(V_w, \varphi)$ при разных значениях влажности и коэффициентов k и c для четырех видов ЛГМ.

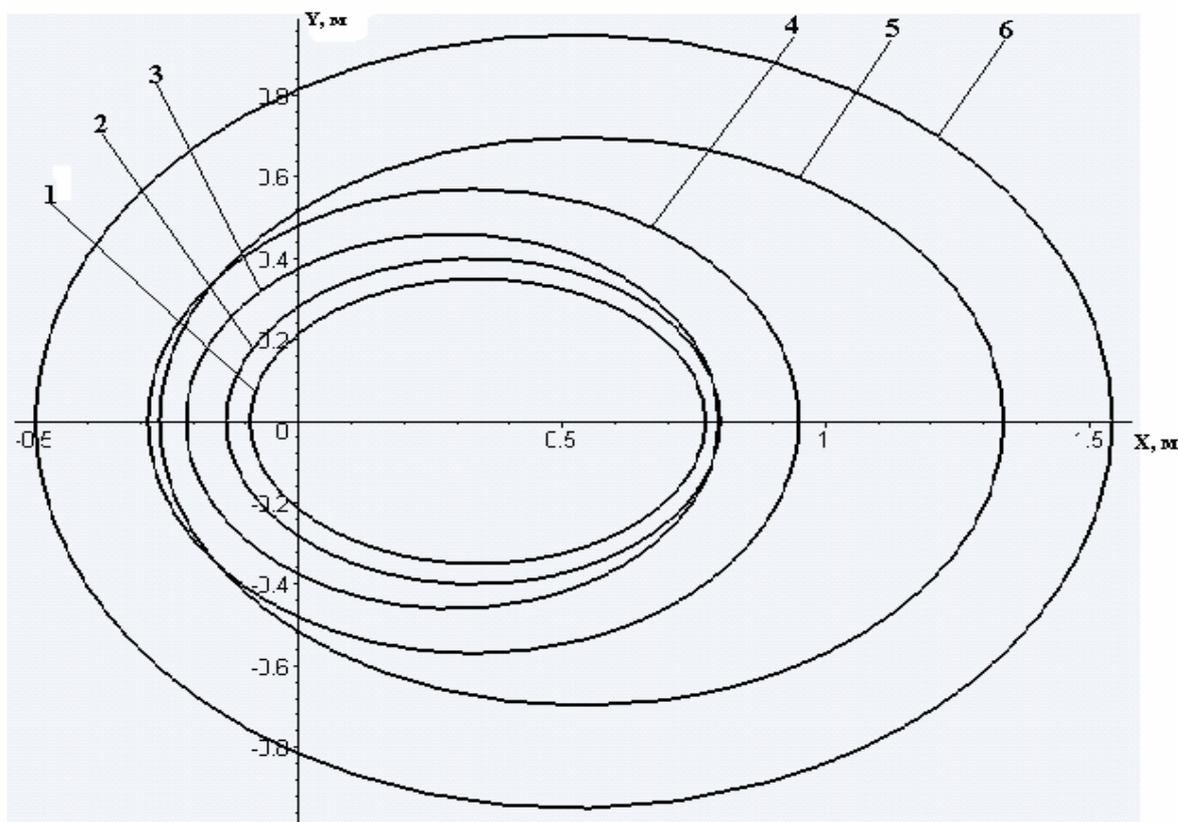


Рис. 3 – Годографы скорости, рассчитанные по формулам (4 - 6) при $V_w=1$ м/с, расстояние по осям в метрах

Выводы. Из результатов расчетов можно сделать следующие выводы. Во-первых, значения $V(V_w, \varphi)$ существенно зависят от параметров модели v_0, k, c [3] и A, B, C, D, E [9] и неявным образом от W . Во-вторых, влияние величины v_0 при данной влажности W , существенное при малых значениях V_w , уменьшается с увеличением V_w , оно больше при $W > 50\%$ и меньше при $W < 30\%$. Однако, главным фактором, влияющим на $V(V_w, \varphi)$, является, очевидно, величина W ; с ее увеличением значение $V(V_w, \varphi)$ значительно уменьшается. При этом увеличение V_w , и W оказывают на значение $V(V_w, \varphi)$ противоположное влияние, так что увеличение скорости ветра V_w , может быть полностью скомпенсировано увеличением влажности W .

Предложенная нами модель (3) годографа скорости $V(V_w, \varphi)$, является универсальной в предположении, что годограф имеет форму эллипса и что известны значения V_{f_2}, V_b и V_{fl} , для конкретного вида ЛГМ. Естествен-

но, модель (3) допускает обобщения и усовершенствования, например, при учете рельефа местности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rothermel R.C. A mathematical Model for fire Spread Predictions in Wildland Fuels. – Ogden: USDA Forest Service Res. Paper, 1972. – INT – H5. – 40p.
2. Van Wagner C.E. Condition for the start and spread of crown fire // Canadian J. of forestry research. – 1977. Vol. 7. – p. 23 – 24.
3. Телицын Г.П. Зависимость скорости распространения низовых пожаров от условий погоды // Сб. тр. ДальНИИЛХ, 1965, Вып. 7.– С. 391 – 405.
4. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. – М.: Лесная пром-ность, 1979. – 160 с.
5. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск.: Наука, 1992.– 408 с.
6. Абрамов Ю.А., Росоха В.Е., Тарасенко А.А. Влияние пространственных флуктуаций пирологических параметров среды на интегральные характеристики низового лесного пожара и условия его тушения. – Харьков: АГЗ Украины, 2004. – 142 с.
7. Абрамов Ю.А., Рева Г.В., Росоха В.Е., Чучковский В.Н. Идентификация моделей скорости распространения фронта лесного пожара и их практические приложения. – Харьков: АГЗ Украины, 2004. – 114 с.
8. Луданов В.В. Применение математических методов и ЭВМ при проектировании и организации оперативных отделений авиационной охраны лесов от пожаров // Авт. дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Красноярск, 1975 г.
9. Коровин Г.Н. Методы расчета некоторых параметров низовых лесных пожаров // Сб. научн.- исслед. работ по лесн. хоз-ву. – М.: Лесная промышленность, 1969. – С. 244 – 262.
10. Комяк В.А., Коссе А.Г., Откидач Н.Я., Шило С.А. Моделирование динамики развития лесного пожара с учетом ветрового воздействия // Проблемы пожарной безопасности. Сб. научн. тр.– Вып. 5. – Харьков: ХИПБ, 1999. – С. 108 – 117.
11. А.Е. Басманов, А.П. Созник, А.А. Тарасенко. Эспериментально-аналитическая модель скорости распространения низового лесного пожара. // Проблемы пожарной безопасности. Сб. научн. тр. Вып. 11. Харьков: Фолио, 2002. – С. 17-25.