

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  $\varphi$  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  $O'C=b=V_{fl}$ .

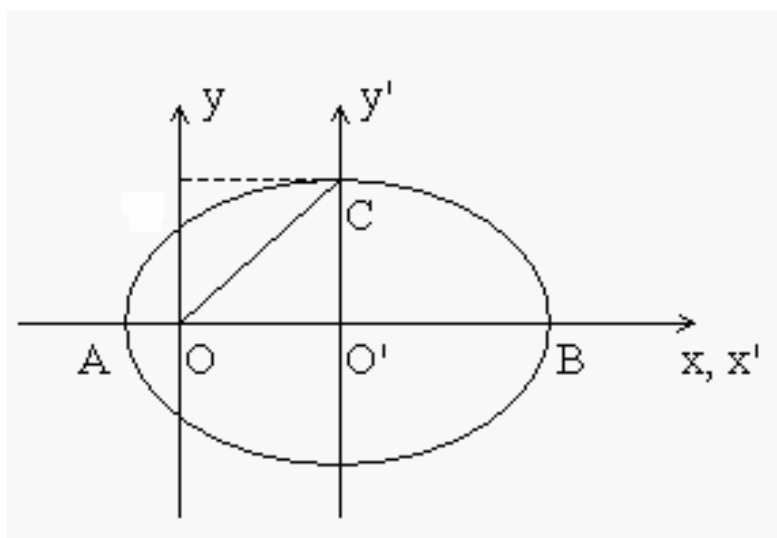


Рис. 1 – К построению годографа скорости  $V(V_w, \varphi)$

Тогда в декартовой системе координат  $OXY'$  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  $\varphi$  - 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,  $B$  – с<sup>2</sup>/(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-мшистый, при  $W=20\div 30\%$ ;
  - контур 2 –  $A=0,25$ ,  $B=0,54$ ,  $C=0,20$ ,  $D=0,06$ ,  $E=0,17$ , сосняк вересковый, при  $W=20\div 25\%$ ;
  - контур 3 –  $A=0,35$ ,  $B=0,67$ ,  $C=0,17$ ,  $D=0,15$ ,  $E=0,19$ , сосняк лишайниково-мшистый, при  $W=10\div 20\%$ ;
  - контур 4 –  $A=0,30$ ,  $B=0,76$ ,  $C=0,25$ ,  $D=0,09$ ,  $E=0,21$ , сосняк вересковый, при  $W=10\div 20\%$ ,
- где  $W$  – влажность ЛГМ.

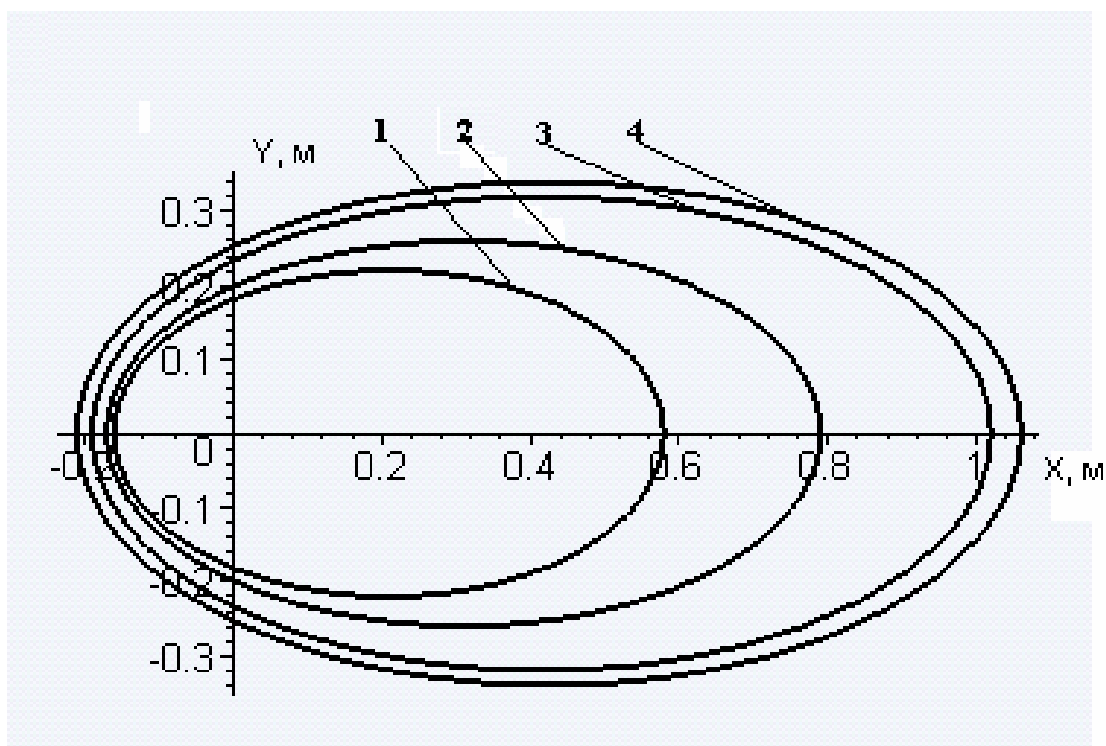


Рис. 2 – Годографы скорости, рассчитанные по формулам (3) и (8) при  $V_w=1$  м/с, расстояние по осям в метрах

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.

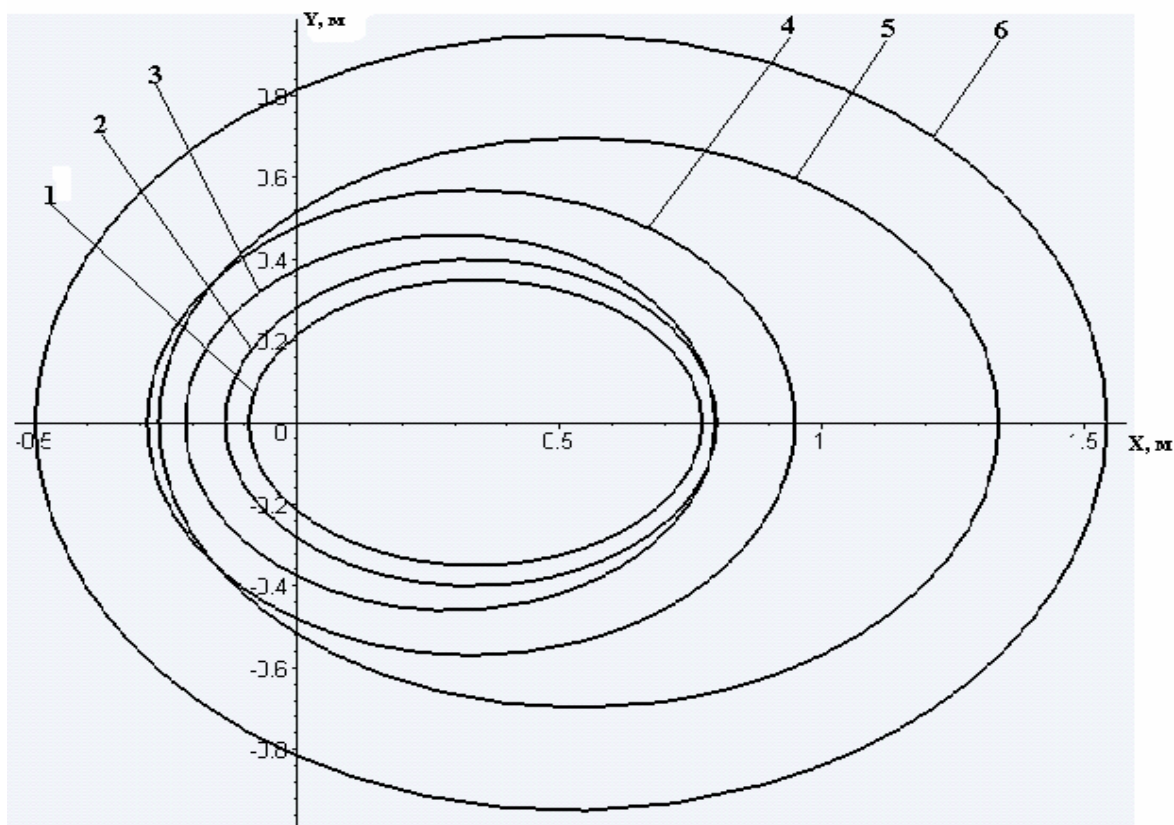


Рис. 3 – Годографы скорости, рассчитанные по формулам (4 - 6) при  $V_w=1$  м/с, расстояние по осям в метрах

**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.