

**УДК 614.84**

*А.Е. Басманов, канд. техн. наук, ст. преподаватель, АПБУ,  
А.П. Созник, д-р физ.-мат. наук, профессор, АПБУ,  
А.А. Тарасенко, ст. преподаватель, АПБУ*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА**

Предложена простая аналитическая модель для описания азимутальной зависимости скорости распространения контура низового пожара. Проведен сравнительный анализ с моделями, предложенными другими авторами. Показано, что рассматриваемая нами модель является более физической и предпочтительной по целому ряду соображений. Рассмотрены также возможные направления усовершенствования модели.

1. К настоящему времени по проблеме лесных пожаров и пожарной безопасности лесов проведено большое количество экспериментальных и теоретических исследований (см., напр. [1-6] и ссылки там же). Теоретические методы прогнозирования процесса выгорания при развитии лесного пожара можно весьма условно разделить на два широких класса: микроскопические и феноменологические.

Микроскопические модели решают проблему описания лесного пожара исходя из уравнений [6], позволяющих учитывать динамику 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.

Поэтому большое внимание уделяется феноменологическим (экспериментально-аналитическим [5]) методам.

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

распространение получили геометрические методы описания контура пожара [1, 3-5, 7-10].

Геометрический подход предполагает решение двух взаимосвязанных задач. Одна из них состоит в построении теоретических моделей динамики движения кромки пожара, то есть в прогнозировании его контура в различные моменты времени [1, 3-5, 7-10]. Решение задачи в таких моделях основывается на использовании определенной каким-либо способом скорости движения кромки пожара. Поэтому другой задачей является моделирование зависимости этой скорости от указанных выше физических факторов развития пожара. Именно вторая задача и рассматривается в данной работе. Нами предложена простая модель описания годографа скорости распространения огня в зависимости от скорости ветра  $\vec{v}_B$  и некоторых других природных факторов. Проведено сравнение результатов расчетов по предложенной модели с результатами, полученными другими авторами [5, 7-9], показано преимущество данной модели и рассмотрены возможности ее усовершенствования.

2. В [4] получены такие выражения для скорости распространения низового лесного пожара

$$\begin{aligned} V_{\text{фр}} &= V_0(1 + \alpha)^2, \\ V_{\text{т}} &= V_0(1 - \alpha)^2, \\ V_{\text{ф}} &= V_0 = v_0 + k v_B, \end{aligned} \quad (1)$$

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

где  $V_{\text{фр}}$ ,  $V_{\text{т}}$ ,  $V_{\text{ф}}$  - скорости распространения фронтальной, тыловой и фланговой кромки пожара относительно направления скорости ветра  $v_B$ ,  $v_0$  - скорость движения огня при  $v_B = 0$ ,  $k$  - коэффициент, учитывающий раздувающее действие ветра,  $c$  - коэффициент, связанный с удельной теплоемкостью горючих материалов. Значение параметров  $v_0$ ,  $k$  и  $c$  зависят от влажности и состава горящего материала, их числовые значения приведены в [1,4].

Естественно, для определения границы выгорания недостаточно знания только скоростей (1), необходимо ввести некоторые дополнительные предположения относительно азимутальной зависимости скорости  $V$ , то есть рассмотреть зависимость от азимутального угла  $\phi$  между направлениями скорости ветра и направлением распространения кромки пожара. Такая зависимость

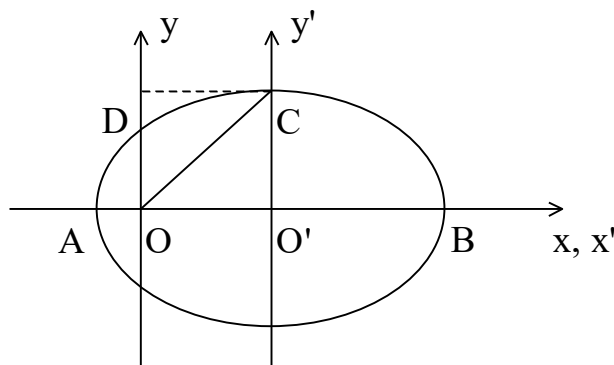
будет описывать годограф скорости горения.

Рассмотрим точечный очаг загорания и учтем (1). Как отмечено в [5,7-9] наличие ветра приводит к деформации кругового контура выгорания (при  $v_B = 0$ ) в контур эллиптической формы. Исходя из этой гипотезы, будем описывать эллипс большой осью  $2a = \frac{V_{\text{фр}} + V_T}{V_0} = 2(1 + \alpha^2)$  и малой осью  $2b$ , величину которой позже свяжем с величиною  $V_{\text{ф}}$ . Для упрощения формул величину  $V_0$  в (1) будем пока опускать. Тогда в декартовой системе координат  $O'x'y'$  с началом в центре эллипса, получим уравнение (рис. 1)

$$\frac{(x')^2}{(1 + \alpha^2)^2} + \frac{(y')^2}{b^2} = 1. \quad (3)$$

В такой системе координат  $\vec{v}_B$  параллельна оси  $O'x'$ . В системе координат с центром в т. О, которая сдвинута вдоль оси  $O'x'$  на расстояние  $OO' = 2\alpha$ , уравнение (3) имеет вид

$$\frac{(x - 2\alpha)^2}{(1 + \alpha^2)^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (4)$$



**Рисунок 1 – К построению годографа скорости  $V(\varphi)$**

В новой системе координат  $Oxy$  величины  $AO = (1 - \alpha)^2 = V_T / V_0$  и  $OB = (1 + \alpha)^2 = V_{\text{фр}} / V_0$  определяют скорости  $V_{\text{фр}}$  и  $V_T$  от центра пожара, расположенного в т. О. Подчеркнем, что т. О не совпадает с фокусом эллипса.

Выбор величины  $b$  зависит от выбора физической модели

пожара. Наиболее естественно, на наш взгляд, определить величину  $b$  фланговой скоростью  $V_{\phi}$ . В этом случае  $b = O'S = 1$  и отношение длины пожара  $2a$  к его ширине  $2b$  равно  $1 + \alpha^2$ . Значение  $\alpha$  зависит от  $v_B$  и от природных условий [4]. Поэтому при  $60 \text{ м/мин} < v_B < 600 \text{ м/мин}$  величина  $1 + \alpha^2$  изменяется от 1 до 2. В частности, при  $v_B = 240 \text{ м/мин}$  и  $c = 198 \text{ м/мин}$  [4, 9] получаем  $1 + \alpha^2 \approx 1,5$ , что несколько меньше отношения 2:1, предлагаемого в [11, 12] и близко к величине для Калифорнийского пожара [6].

Если фланговую скорость определить длиной отрезка  $OD$ , то тогда  $b = (1 + \alpha^2) / (1 - \alpha^2)$  и при указанных выше условиях получим  $2a/2b \approx 0,5$ , то есть вместо эллипса вытянутого вдоль направления ветра получаем сплюснутый эллипс, что конечно, не является физическим.

Наконец, если как и в одном из вариантов в [9], принять за контур выгорания прямоугольник со сторонами  $(V_{\text{ФР}} + V_{\text{T}}) / V_0$  и  $2V_{\phi} / V_0$ , то его площадь  $S_{\Pi} = 4(1 + \alpha^2)$ . Рассматривая эллипс (4) площадью  $S = S_{\Pi}$ , получим  $b = 4/\pi$ . Тогда значение  $2a/2b \approx 1,18$  получается еще меньше, чем 2 : 1.

Проведенный анализ показывает, что эмпирическим соотношениям  $2a/2b$  [11, 12] более соответствует значение  $b = 1$ , которое и выбираем для дальнейших расчетов.

Переходя в (4) к полярной системе координат с полюсом в т. О, получаем выражение для годографа скорости кромки пожара

$$V(\varphi) = V_0 r(\varphi), \quad (5)$$

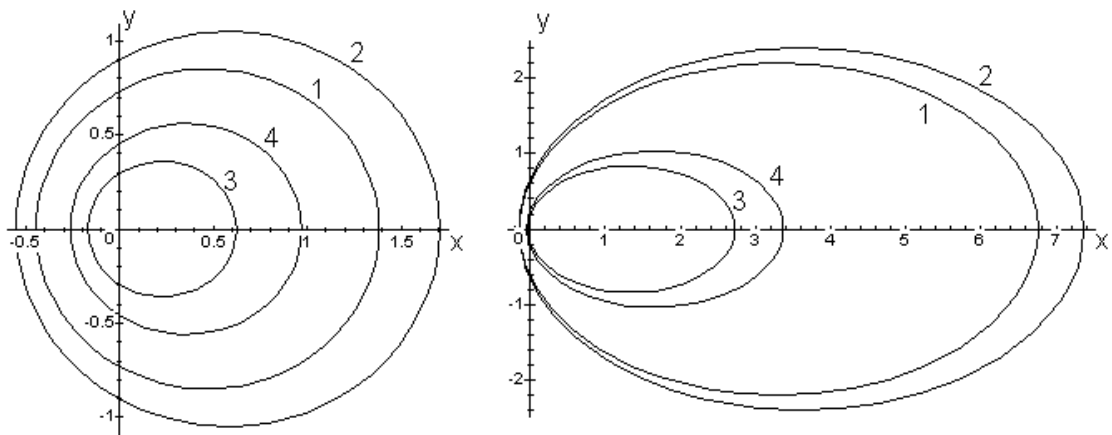
$$r(\varphi) = \frac{2\alpha \cos \varphi + (1 + \alpha^2) \sqrt{\cos^2 \varphi + (1 - \alpha^2)^2 \sin^2 \varphi}}{\cos^2 \varphi + (1 + \alpha^2)^2 \sin^2 \varphi}, \quad (6)$$

где  $\varphi$  - полярный угол, а полярная ось совпадает с осью  $OX$ .

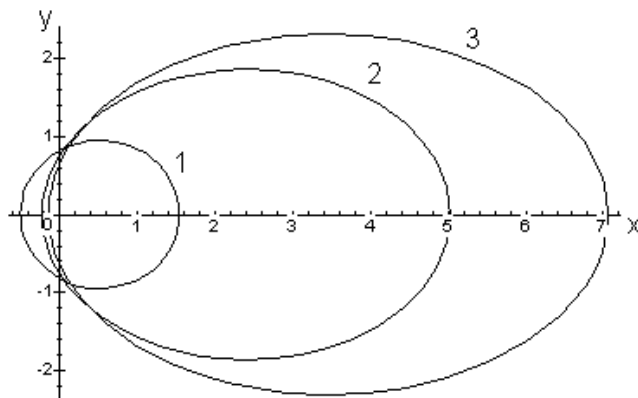
Формулы (5), (6), в принципе, и решают поставленную задачу и описывают искомый годограф скорости.

3. Используя формулы (5), (6), нами проведены расчеты годографов скоростей при некоторых значениях величин  $v_0$ ,  $k$ ,  $c$ , взятых из [1, 4]. Отметим, что значения этих параметров модели существенно зависят от состава и влажности  $W$  горючего материала, при этом  $v_0 = 0,4 - 0,6 \text{ м/мин}$  при  $W < 30 \%$  и  $v_0 = 0,2 - 0,4 \text{ м/мин}$  при  $W > 30 \%$ . Нами рассмотрены случаи горения сухой травы,

лишайника, опада хвои и листьев для  $W < 30 \%$  и  $W > 50 \%$ . Результаты расчетов приведены на рис. 2 с параметрами  $k^{-1} = 133,3$ ,  $c = 210$ ,  $v_0 = 0,4$  (кривые 1) и  $v_0 = 0,6$  (кривые 2) при  $W < 30 \%$  и  $k^{-1} = 375$ ,  $c = 180$ ,  $v_0 = 0,2$  (кривые 3) и  $v_0 = 0,4$  (кривые 4) при  $W > 50\%$  при  $v_B = 60$  (слева) и  $v_B = 240$  (справа). Здесь и ниже все параметры имеют размерность *м/мин*. На рис. 2-4 вдоль осей  $Ox$  и  $Oy$  отложены значения скоростей  $V(\varphi)$  в *м/мин*. Представленные на рис. 2 расчеты показывают зависимость годографа скорости от состояния горючего материала при двух значениях  $v_B$ . На рис. 3 приведены расчеты  $V(\varphi)$  при разных значениях  $v_B$  и средней величине  $v_0 = 0,5$  и  $k^{-1} = 133,3$ ,  $c = 180$ , которые демонстрируют зависимость скорости распространения пожара при однородных условиях от скорости ветра.



**Рисунок 2 – Годограф скорости по модели (5), (6) при скорости ветра  $v_B = 60$  м/мин (слева) и  $v_B = 240$  м/мин (справа)**



**Рисунок 3 – Годограф скорости по модели (5), (6) при скоростях ветра 60 м/мин (кривая 1), 180 м/мин (кривая 2), 240 м/мин (кривая 3)**

Из результатов расчетов можно сделать следующие выводы. Во-

первых, значения  $V(\varphi)$  существенно зависят от параметров модели  $v_0, k, c, v_B$  и неявным образом от  $W$ . Во-вторых, влияние величины  $v_0$  при данной влажности  $W$ , существенное при малых значениях  $v_B$ , уменьшается с увеличением  $v_B$ ; оно больше при  $W > 50\%$  и меньше при  $W < 30\%$ . Однако, главным фактором, влияющим на  $V(\varphi)$ , является, очевидно, величина  $W$ ; с ее увеличением значение  $V(\varphi)$  значительно уменьшается. При этом увеличение  $v_B$  и  $W$  оказывают на значение  $V(\varphi)$  противоположное влияние, так что увеличение скорости ветра  $v_B$  может быть полностью скомпенсировано увеличением влажности  $W$ . Заметим, что формулы (1), (5), (6) не содержат критическое значение влажности  $W_K$ , то есть не отражают тот экспериментальный факт, что при  $W > W_K$  может произойти затухание пожара. При этом с увеличением  $v_B$  и  $W$  отношение  $(V_{\text{фр}} + V_{\text{Т}})/2V_{\text{ф}}$  увеличивается до 2, то есть скорость распространения пожара в направлении оси  $Oy$  уменьшается почти в два раза по сравнению с направлением вдоль оси  $Ox$  (эллипс вытягивается вдоль  $\vec{v}_B$ ). Интересно также отметить, что при  $v_B = 60$  годограф  $V(\varphi)$  мало отличается от кругового, а при  $v_B = 180$  и  $240$  имеет четкую эллиптическую форму, причем с ростом  $v_B$  значение  $V(\varphi = \pi)$  уменьшается в соответствии с (1).

4. Выше отмечалось, что существуют различные аппроксимации для функции  $r(\varphi)$ , то есть различные модели годографа скорости  $V(\varphi)$ , к анализу которых и переходим.

В [5] было показано, что с помощью уравнения эллипса в виде

$$r(\varphi) = \frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon \cos \varphi}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon$  - эксцентриситет, нельзя удовлетворительно описать значения  $V_{\text{фр}}, V_{\text{Т}}, V_{\text{ф}}$ , а значит и годограф  $V(\varphi)$ , так как это уравнение содержит всего один параметр.

Предложенное в [8] уравнение

$$r(\varphi) = a(v_B) + b(v_B) \cos^m \varphi, \quad m = 1, 3, 5, \dots, \quad (8)$$

где  $a + b = 1$ , описывает при  $m = 1$  улитку Паскаля, форма которой при  $|\varphi| > \frac{\pi}{2}$  имеет нефизичную вогнутость. В случае  $m \geq 3$  использование

(8) приводит к тому, что контур пожара пересекает сам себя, то есть возникает “ласточкин хвост” [5], и поэтому выражение (8) не может быть удовлетворительным для описания годографа скорости.

В [3] была предложена зависимость  $r(\varphi)$  в виде “фигуры из двух полуэллипсов с общей осью” [5], а именно

$$r(\varphi) = \begin{cases} \sqrt{\cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}, & 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \\ \sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}, & \frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \pi \end{cases}, \quad (9)$$

где  $a \leq b < 1$ . Простейший анализ и численные расчеты (см. рис. 4) показывают, что при указанных, вполне естественных для годографа ограничениях на параметры  $a$  и  $b$ , ни первое, ни второе из уравнений (9) не описывают эллипсы. Графики этих “эллипсов” представляют собой на самом деле овалы с талией, напоминающие овалы Кассини. Поэтому, как и в случае (8), на годографе возникают нефизичные вогнутости при  $\varphi = \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ , а уравнение (9) следует признать непригодным для описания годографа.

Отметим, что идея годографа в виде непрерывной сшивки двух полуэллипсов с общей осью была использована в [9] в другой по сравнению с (9) формулировке. Однако, хотя в модели [9] и отсутствуют недостатки формулы (9), ее все же трудно признать удовлетворительной из общезначимых соображений о форме годографа. Не смотря на гладкость сшивки (при  $\varphi = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$ ) форма годографа скорости в этой модели больше напоминает треугольник со сглаженными вершинами, нежели, как этого и хотели бы авторы [9], эллипс.

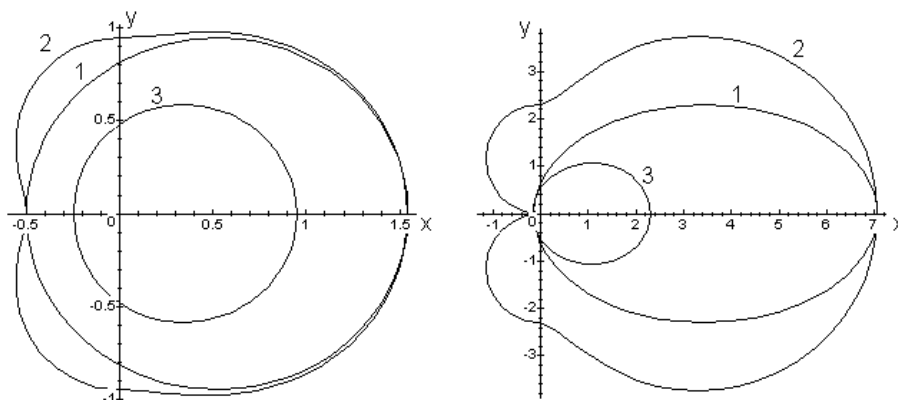
В [5] используется предложенная в [7] модель годографа скорости в виде

$$V(\varphi) = V_0 \exp[a(v_B)(\cos \varphi - 1)], \quad (10)$$

где для  $v_B \leq 180 \text{ м/мин}$  имеем  $a = 0,0131v_B - 0,000293v_B^2$ . Это выражение, приведенное в [5] без всяких пояснений, также не свободно от недостатков. Прежде всего, простой анализ показывает, что при  $96 \text{ м/мин} < v_B < 350 \text{ м/мин}$  форма годографа (10) напоминает улитку Паскаля, то есть имеет при  $\varphi = \pi$  нефизическую вогнутость. Значит, ее применимость имеет более жесткие ограничения по сравнению с условием  $v_B \leq 180 \text{ м/мин}$ . Кроме того, при всех  $v_B < 180 \text{ м/мин}$  отношение продольного размера (вдоль ветра) годографа и поперечного

мало отличается от 1. Отметим также, что с помощью (10) невозможно описать экспериментальную зависимость (1). Это, по нашему мнению, связано с тем обстоятельством, что автор [5] введением понятия индикатрисы  $\chi(\varphi, v_B) = V(\varphi)/V_0$  искусственно разделяет зависимость  $V(\varphi)$  от силы ветра  $v_B$  и его направления  $\vec{v}_B/v_B$ . Действительно, согласно [5] индикатриса должна удовлетворять, в частности, двум условиям  $\chi(0, v_B) = 1$  и  $\chi(\varphi, 0) = 1$ , в соответствии с которыми и выбран вид (10). Из этих условий следует, что  $\chi(0, 0) = 1$ . И хотя формально  $a = a(v_B)$  в (10), из последнего равенства получаем, что индикатриса вдоль ветра не зависит от силы ветра  $v_B$  и всегда равна 1. Таким образом, вся зависимость  $V(0)$  от  $v_B$  переносится на множитель  $V_0$ , а такое разделение не согласуется с (1).

Некоторые результаты расчетов годографа скорости по моделям (5), (6), (9), (10) представлены на рис. 4.



**Рисунок 4 – Годограф скорости при  $v_B = 60$  м/мин (слева) и  $v_B = 240$  м/мин (справа). Кривая 1 – расчет по формуле (5), (6), кривая 2 – по формуле (9), кривая 3 – по формуле (10).**

Для модели (9) в целях ее согласования со значениями  $V_{фр}$ ,  $V_T$ ,  $V_\phi$  в (1) были приняты следующие значения параметров:  $a = (1 - \alpha)^2 / (1 + \alpha)^2$ ,  $b = 1 / (1 + \alpha)^2$ , а  $V_0$  заменено на  $V_0(1 + \alpha)^2$ . На рис. 4 четко видна нефизичность годографа (9), а отмеченная выше вогнутость годографа (10) при  $\varphi = \pi$  и  $v_B = 240$  м/мин мала, и на рис. 4 ее не видно.

5. Предложенная нами модель годографа скорости  $V(\varphi)$  допускает обобщения и усовершенствования в нескольких направлениях. Во-первых, хотя  $V(\varphi)$  в (1), (2) и (5), (6) и зависит от влажности  $W$ , но зависит неявно через параметры  $v_0, k, c$ . Поэтому желательно иметь явную зависимость  $V(\varphi)$  от  $W$ , особенно. как



отмечалось выше, вблизи критического значения  $W_K$  [3]. Во-вторых, при проведении реалистических расчетов необходимо учесть, что  $V(\varphi)$  зависит от угла  $\theta$  склона рельефа [5]. Наконец, безусловно важной является необходимость учитывать зависимость  $V(\varphi)$  от колебаний ветра по направлению и величине  $v_B$ .

В дальнейшем планируется с использованием предложенной модели и учетом перечисленных выше факторов провести расчеты контуров низовых лесных пожаров.

## ЛИТЕРАТУРА

1 Арцыбашев Е.С. Лесные пожары и борьба с ними.– М.: Лесная пром-ность, 1974. – 119 с.

2 Валендик Э.Н. Ветер и лесной пожар.– М.: Наука, 1968.– 118 с.

3 Доррер Г.А., Курбатский Н.П. Математические модели лесных пожаров: основные понятия, класификация, требования // Прогнозирование лесных пожаров.– Красноярск: СО АН СССР, 1978.– С.5 – 26.

4 Телицын Г.П. Зависимость скорости распространения низовых пожаров от условий погоды // Сб. тр. ДальНИИЛХ, 1965, Вып. 7.– С. 391 – 405.

6 Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. – М.: Лесная пром-ность, 1979. – 160 с.

7 Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск.: Наука, 1992.– 408 с.

8 Луданов В.В. Применение математических методов и ЭВМ при проектирование 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 пожаров // Сб. научн.- исслед. работ по лесн. хоз-ву, 1969, Вып. XII.

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 Куценко Л.М., Шоман О.В., Васильев С.В. Передбачення кромки вигоряння при лісовій пожежі методом іміджевої екстраполяції // Проблемы пожарной безопасности. Сб. научн. тр.– Вып. 10. – Харьков: АПБУ, 2001. – С. 98 – 102.

12 Вонский С.М. Интенсивность огня низовых лесных пожаров и ее практическое значение // Сб. тр. ЛенНИИЛХ, 1957, № 52. – С. 108 – 117.

13 Амосов Г.А. Некоторые особенности горения при лесных

пожарах. – Л.: ЛенНИИЛХ, 1958. – 29 с.

Статья поступила в редакцию 18.02.2002 г.