

докт. сель.-хоз. наук **А.Д. КУЗЫК** / **A.D. KUZYK**¹
канд. физ.-мат. наук **О.А. КАРАБЫН** / **O.O. KARABYN**²

Przyjęty/Accepted/Принята: 22.08.2013;
Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 04.12.2013;
Opublikowany/Published/Опубликована: 20.12.2013;

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА С УЧЕТОМ ВЕТРА И РЕЛЬЕФА

Mathematical Modeling of Forest Fire Spread Taking Into Account Wind and Topography

Model matematyczny rozprzestrzenienia pożaru lasu uwzględniający czynniki wiatru i ukształtowania terenu

Аннотация

Цель: В статье описан результат создания математической модели для определения скорости распространения фронта лесного низменного пожара на плоскости под влиянием уклона, ветра и их совместного действия. Для проверки модели использованы экспериментальные результаты.

Проект и методы: Математическое моделирование производили с использованием методов векторной алгебры и аналитической геометрии с использованием числа Фруда и эмпирических зависимостей, полученных по известным экспериментальным результатам. Экспериментальные исследования скорости распространения пожара проводили в условиях полигона для трех наиболее распространенных видов горючего материала: хвойной подстилки, лиственной подстилки и сухой травы. Горючий материал выбирали с влажностью, близкой к равновесной, укладывали на плоскости, расположенной горизонтально и под углами к горизонту. Действие ветра имитировали с помощью электровентилятора, а скорость контролировали анемометром.

Результаты: Математическое моделирование скорости распространения фронта пожара выполняли с учетом зависимостей числа Фруда от скорости ветра и высоты пламени, угла наклона пламени от числа Фруда. Влияние ветра на скорость распространения фронта пожара описывали соответствующим коэффициентом, значение которого определяется эмпирической зависимостью. Влияние уклона приводило к приведенной скорости ветра, скорости, под действием которой в случае распространения пожара по горизонтальной плоскости пламя отклонилось бы от нормали на такой же угол. В случае распространения пожара под гору коэффициент приведенной скорости ветра следует разделить на косинус угла наклона поверхности, что подтверждено сравнением результатов моделирования с известными экспериментальными и эмпирическими зависимостями. Суммарное влияние ветра и уклона описывается с помощью векторной алгебры. Результаты работы математической модели сравнены с экспериментальными. Хорошее совпадение обнаружено в случае горючего материала – хвойной подстилки, несколько худшее – для лиственной подстилки и удовлетворительное – для сухой травы.

Выводы: Зависимость скорости распространения фронта пожара от совместного действия уклона поверхности и ветра описывается математической моделью, результаты которой хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, особенно в случае хвойной подстилки – горючего материала наиболее пожароопасных хвойных лесов. Применение предложенной модели возможно при создании компьютерных систем моделирования распространения пожаров, используемых противопожарными службами с целью эффективного управления силами и средствами при пожаре.

Ключевые слова: математическая модель, лесной пожар, распространение пожара, фронт пожара, рельеф;

Вид статьи: оригинальная научная статья

¹ Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности; Адрес: Украина, 79000, Львов, ул. Клепаровская, 35; электронная почта: vr@ubgd.lviv.ua; фактический вклад – 70% / Lviv State University of Life Safety; address: Ukraine, 79000, Kleparivska St., 35; e-mail: vr@ubgd.lviv.ua; percentage contribution – 70% / Lwowski Państwowy Uniwersytet Bezpieczeństwa Życia, Lwów, Ukraina; wkład merytoryczny: 70%;

² Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности; Адрес: Украина, 79000, Львов, ул. Клепаровская, 35; электронная почта: Oksana_Karabyn@mail.ru фактический вклад – 30% / Lviv State University of Life Safety; address: Ukraine, 79000, Kleparivska St., 35; e-mail: Oksana_Karabyn@mail.ru; percentage contribution – 30% / Lwowski Państwowy Uniwersytet Bezpieczeństwa Życia, Lwów, Ukraina; wkład merytoryczny: 30%;

Abstract

Objective: The article describes the results of creating a mathematical model aimed to determine the flame spreading velocity of ground forest fire fronts. The model involves a fire front located on a plane under the influence of slope, wind, and their joint action. The experimental results were used for validation of the model.

Project and methods: The mathematical modeling was performed using the methods of vector algebra and analytical geometry as well as the Froude number and the empirical relationships derived from the already known experimental results. Experimental studies on the fire propagation velocity were carried out on the training ground and involved an analysis of three most common types of forest fuels: coniferous litter, leaf litter, dry grass. The combustible material was chosen maintaining its humidity balance and placed on a plane arranged horizontally and at angles to the horizon. The wind action was simulated using the motor blower and the speed was controlled using anemometer.

Results: The mathematical modeling of the speed of the fire front propagation was performed taking into account the dependencies of the Froude number on the wind speed and flame height as well as the angle of the flame on the Froude number. The influence of wind on the spreading velocity of the fire front was described with the corresponding coefficient whose value was determined by the empirical dependence. Influence of slope brought about given wind speed. At such wind speed, during the spread of fire, in the case of the horizontal plane of the flame, the flames would be deviated from the normal at the same angle. In the case of ground fire wind speed coefficient should be divided by the cosine of the angle of the surface to the horizon, which is confirmed by comparing the simulation results with experimental and empirical relationships. The cumulative effect of the wind and the slope was described using vector algebra. The results of the mathematical model were compared with experimental data. Good compliance was noted in the case of combustible material – coniferous litter, a little worse – for leaf litter and satisfactory – for dry grass.

Conclusions: The dependence of the velocity of the ground fire front propagation and the combined effect of wind and slope surface was described by the mathematical model. There is a good correspondence between the data obtained with the use of the model and the experimental results, especially in the case of coniferous litter – combustible material of the most flammable coniferous forests. The application of the proposed model gives an opportunity for the creation of the forest fires spread computer system modelling that will be useful for effective commanding and control of forest fires.

Keywords: mathematical model, forest fire, fire spread, fire front, topography;

Type of article: original scientific article

Abstrakt

Cel: W artykule opisane zostały wyniki opracowania modelu matematycznego do określenia prędkości rozprzestrzenienia się frontu dolnego (ściółkowego) pożaru leśnego na płaszczyźnie pod wpływem stopnia nachylenia powierzchni, wiatru i ich wzajemnych oddziaływań.

Projekt i metody: Model matematyczny tworzony był z użyciem metod algebry wektorów i geometrii analitycznej, liczby Froude'a oraz zależności empirycznych, otrzymanych z dostępnych danych eksperymentalnych. Badania eksperymentalne prędkości rozprzestrzeniania się pożaru przeprowadzono w warunkach terenowych (na poligonie) na trzech najczęściej spotykanych typach materiału palnego: ściółce lasu iglastego, ściółce lasu liściastego i suchej trawie. Materiał palny został wybrany z zachowaniem równowagi jego wilgotności oraz został ułożony na płaszczyźnie poziomej oraz pod kątami. Działanie wiatru imitowane było przy pomocy elektrycznego wentylatora, a prędkość kontrolowano anemometrem.

Wyniki: Model matematyczny prędkości rozprzestrzeniania się frontu pożaru opracowywano z uwzględnieniem następujących zależności: liczby Froude'a od szybkości wiatru i wysokości płomienia; kąta nachylenia płomienia od liczby Froude'a. Wpływ wiatru na prędkość rozprzestrzeniania się frontu pożaru opisano odpowiednim współczynnikiem, którego wielkość określana jest zależnością empiryczną. Wpływ nachylenia doprowadził do podanej prędkości wiatru, pod wpływem której w przypadku rozprzestrzeniania się pożaru na płaskiej płaszczyźnie płomień odchyłałby się od normalnej o kąt wynikający z kierunku nawiewu. W przypadku rozprzestrzeniania pożaru pod górę podany współczynnik prędkości wiatru trzeba podzielić przez cosinus kąta nachylenia powierzchni, co zostało potwierdzone poprzez porównanie wyników modelowania z dostępnymi eksperymentalnymi i empirycznymi zależnościami. Całkowity wpływ wiatru i nachylenia opisany został za pomocą algebry wektorów. Wyniki opracowania modelu matematycznego zostały porównane z wynikami eksperymentów. Dobra zgodność została odnotowana w przypadku materiałów palnych – ściółki iglastej, trochę gorsza – dla ściółki liściastej i zadowalająca – dla suchej trawy.

Wnioski: Zależność prędkości rozprzestrzeniania frontu pożaru od wspólnego oddziaływania nachylenia powierzchni i wiatru opisana jest za pomocą modelu matematycznego, którego wyniki odpowiadają wynikom badań eksperymentalnych, szczególnie w przypadku ściółki iglastej – materiału palnego występującego w lasach najbardziej narażonych na pożary – lasach iglastych. Zastosowanie zaproponowanego modelu jest możliwe przy opracowaniu systemów komputerowych modelowania rozprzestrzeniania pożaru, wykorzystywanych przez służby straży pożarnej w celu efektywnego zarządzania siłami i środkami przy wybuchu pożaru.

Słowa kluczowe: model matematyczny, pożar lasu, rozprzestrzenianie się pożaru, front pożaru, ukształtowanie terenu;

Typ artykułu: oryginalny artykuł naukowy

1. Введение

На распространение пожара существенным является влияние различных факторов: физических свойств горючего материала, скорости ветра и наклона поверхности, по которой распространяется пожар. Эти факторы обуславливают интенсивность горения, высоту пламени и его угол наклона к поверхности распространения пожара. На скорость распространения влияют теплопроводность среды, конвек-

ция воздушных масс, сила и направление ветра [1]. Для ландшафтного пожара в [2] приведена модель его распространения с учетом скорости и направления ветра. Однако эта модель не учитывает того, что влияние факторов существенно меняется в процессе распространения пожара наклонной поверхностью в условиях переменного рельефа. Одновременное учета влияния скорости ветра и угла наклона осуществляли в процессе моделирования распространения пожа-

ра многие исследователи [3-9 и др.]. Однако в [4, 5, 6] одновременное воздействие рассматривали лишь в случаях одинаковых или противоположных направлений ветра и наклона поверхности. В [8] распространения пожара моделировали методом клеточных автоматов на основании метода [3], который одновременно учитывает факторы скорости ветра и уклона в коэффициенте, который является линейной функцией суммы соответствующих параметров. В [7] учет влияния скорости ветра, уклона местности и относительной влажности воздуха на скорость распространения пожара описывается произведением коэффициентов, зависящих от указанных факторов. В [11] описан метод расчета распространения ландшафтной пожара в любом направлении на основании годографов скоростей распространения под действием ветра и рельефа. Но такой метод лишь приближенно описывает скорость распространения пожара, поскольку каждый из факторов действует по-разному и в общем случае эти факторы не являются аддитивными. В [9] вследствие экспериментальных исследований в аэродинамической трубе установлено, что при небольших скоростях (до 2 м/с) и уклонах (до 18°) оба фактора влияют на процесс распространения независимо друг от друга. Проблема описания зависимости скорости распространения пожара от ветра и рельефа является актуальной и требует поиска принципов, которые более тщательно описывают совместное действие обоих факторов на основе физических закономерностей.

Целью статьи является разработка метода определения скорости распространения лесного пожара с учетом влияния ветра и рельефа на угол наклона пламени к плоскости распространения пожара.

2. Методы

В работе использованы методы математического моделирования с применением векторной алгебры и аналитической геометрии с использованием числа Фруда и эмпирических формул, полученных по известным экспериментальным зависимостям. Для проверки результатов моделирования проведены экспериментальные исследования скорости распространения фронта пожара в условиях полигона для трех наиболее распространенных видов горючего материала: хвойной подстилки, лиственной подстилки и сухой травы. Горючий материал выбирали с влажностью, близкой к равновесной, измерение которой производили влагомером МГ-44. Материал располагали равномерным слоем на ровной поверхности (горизонтальной или под углами к горизонту) в форме прямоугольных параллелепипедов длиной 1,8 м и шириной 0,25 м, толщиной, близкой к природным условиям (хвойная подстилка – 4 мм, лиственная – 5 см и сухая трава – 6 см), измеряя геометрические размеры линейкой и измерительной рулеткой. Источником огненного воздействия для поджигания использовали смесь дизельного топлива и древесных опилок. Время регистрировали секундомером. Действие ветра имитировали электровентилятором, а его скорость кон-

тролировали с помощью анемометра метеостанции Kestrel 4000.

3. Результаты

При горении вследствие конвективных процессов пламя поднимается вверх. При отсутствии ветра пламя образует с вертикалью угол $\theta_p = 0^\circ$. Под действием ветра пламя будет отклоняться в направлении ветра. Зависимость угла наклона пламени θ_p от скорости ветра описывает формула [6]

$$\theta_p = \arctg(a \cdot Fr^b) \quad (1)$$

где $a = 1,22$, $b = 0,5$, а Fr – число Фруда, определяемое по формуле

$$Fr = \frac{v_B^2}{gH} \quad (2)$$

где v_B – скорость ветра, м/с, $g = 9,8$ м/с² – ускорение свободного падения, H – высота пламени, м. Параметры a и b в формуле (1) могут быть другими в зависимости от вида и состояния горючего материала. Их определяют экспериментальным методом. Некоторые значения этих параметров приведены в [10].

Во время пожара, распространяемого по горизонтальной поверхности (рис. 1 а), угол между пламенем и поверхностью составляет $\gamma = 90^\circ - \theta_p$, а направление самого быстрого распространения будет определять вектор скорости ветра.

Рассмотрим пожар на наклонной плоскости (рис. 1 б), описываемой уравнением

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (3)$$

где A, B, C, D – коэффициенты, (x, y, z) – координаты точек плоскости, а угол между пламенем и поверхностью плоскости определяется как угол между пламенем и его проекцией на плоскость.

Нормалью плоскости является вектор $\vec{n} = (A, B, C)$. Определим направление пламени вектором \vec{w} . В случае отсутствия ветра пламя будет иметь вертикальное направление вверх, угол θ между векторами \vec{w} и \vec{n} равен углу наклона плоскости к горизонту, а длина вектора \vec{w} равна высоте пламени H . Для пламени высотой H с учетом (1), (2) определяем приведенную скорость ветра v_{Bp} , под действием которой в случае распространения пожара по горизонтальной плоскости пламя отклонилось бы от нормали (вектора \vec{n}) на угол θ . Формула для вычисления величины приведенной скорости ветра имеет вид

$$v_{Bp} = \sqrt{gH} \left(\frac{tg\theta}{a} \right)^{\frac{1}{2b}} \quad (4)$$

а ее направление – параллельное к горизонту и совпадает с проекцией направления уклона плоскости Π к горизонтальной поверхности.

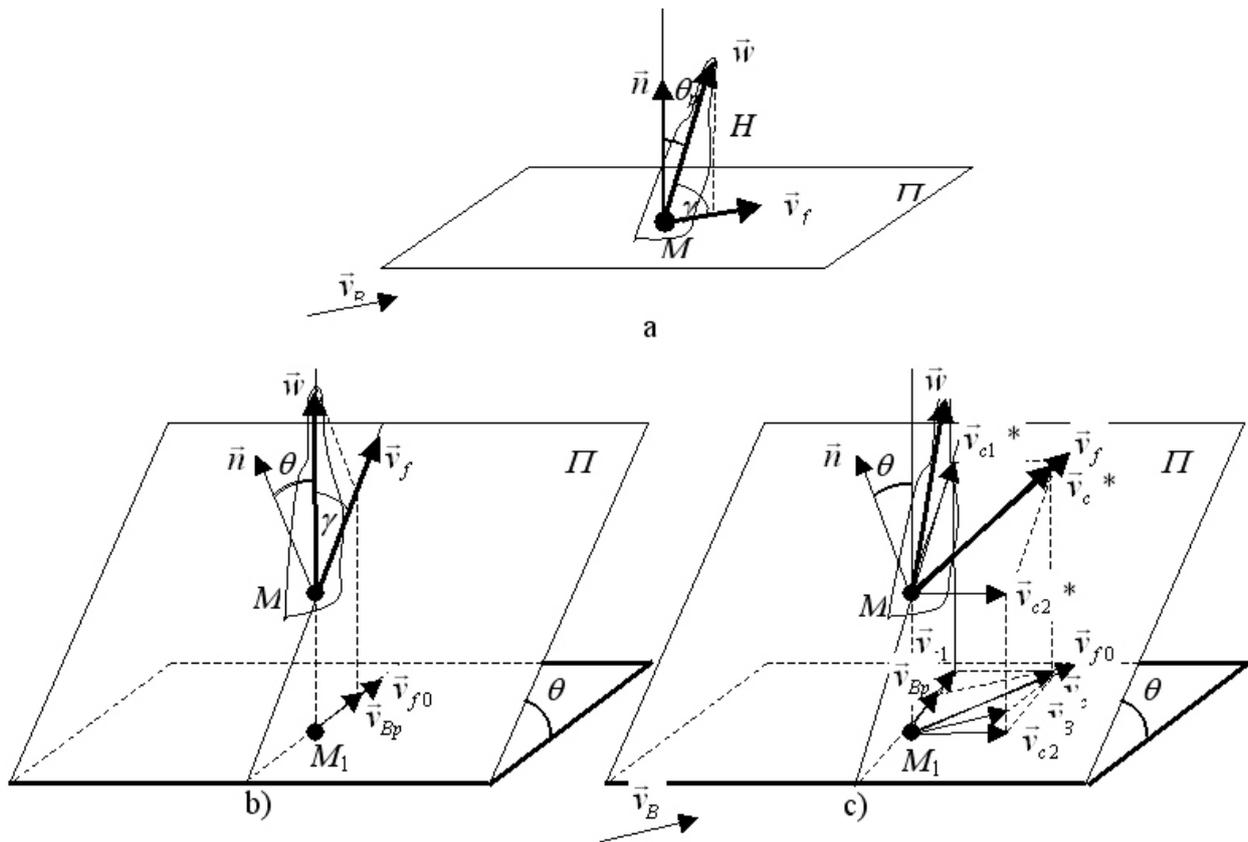


Рис. 1. Направление распространения фронта пожара \vec{v}_f : а) по горизонтальной плоскости под влиянием ветра; б) по наклонной плоскости без учета влияния ветра; в) по наклонной плоскости и с влиянием ветра
Fig. 1. The direction of the fire front \vec{v}_f : a) on a horizontal plane under the influence of wind; б) an inclined plane, excluding the effects of wind; в) an inclined plane and with the influence of wind

Коэффициент влияния скорости ветра v_v на скорость распространения фронта пожара на основании данных, приведенных в [7], с коэффициентом достоверности $R^2=0,9957$ аппроксимирован эмпирической формулой

$$k_v = ce^{d v_v} \tag{5}$$

где $c=0,9893$ и $d=0,4843 \text{ м}^3/\text{с}$. Коэффициент k_v дает возможность определять скорость распространения фронта пожара горизонтальной поверхностью по формуле

$$v_f = k_v v_0, \tag{6}$$

где v_0 – скорость распространения пожара по горизонтальной поверхности без влияния ветра и уклона, м/с, зависящая от вида и свойств горючего материала.

В случае распространения под гору коэффициент влияния приведенной скорости ветра вычисляется по формуле

$$k_v^* = \frac{k_v}{\cos\theta} \tag{7}$$

в которой k_v определяется по формуле (5) с использованием приведенной скорости ветра v_{Bp} вместо v_v . Полученное значение k_v^* используется в формуле (6) вместо k_v . Сравним значения коэффициентов k_v^* для углов θ от 0° до 40° с соответствующими коэффициентами влияния уклона k_θ , приведенными в [7] и [3] (табл. 1). При высоте пламени $H = 3 \text{ м}$ коэффициент корреляции между значениями, вычисленными по формулам (4), (5) и (7) и приведенными в [7] табличными значениями, составляет 0,99, а стандартное отклонение их разностей равно 0,65. При $H = 4 \text{ м}$ в соответствующем диапазоне значений углов уклона θ коэффициент корреляции между значениями, вычисленными по формулам (4), (5) и (7) и формуле [3]

$$k_\theta = 1 + 5,275 \cdot \beta^{-0,3} \text{tg}^2\theta, \tag{8}$$

где β – отношение плотности слоя горючего материала к плотности самого материала (считаем, что $\beta = 0,01$), составляет 0,96, а стандартное отклонение их разностей равно 1,18.

В случае распространения пожара по наклонной плоскости под влиянием ветра (рис. 1 в) на скорость и направление распространения фронта одновременно влияют оба фактора. Поскольку зависимости коэффициентов влияния уклона и приведенной скорости

ветра от угла наклона плоскости θ в диапазоне от 0° до 40° являются близкими между собой, то при одно-временном влиянии ветра и уклона последний можно рассматривать как дополнительный источник ветра и в связи с этим суммировать вектора скорости ветра \vec{v}_B и приведенной скорости влияния ветра \vec{v}_{Bp} .

Поскольку каждый из этих векторов способствует увеличению линейной скорости распространения фронта пожара v_0 в соответствующем направлении, то влияние каждого из них описывают вектора

$$\vec{v}_{B\text{eff}} = (k_v - 1)v_0 \frac{\vec{v}_B}{|\vec{v}_B|} \tag{9}$$

$$\vec{v}_{Bp\text{eff}} = (k_v^* - 1)v_0 \frac{\vec{v}_{Bp}}{|\vec{v}_{Bp}|} \tag{10}$$

одинаково направленные, соответственно, с векторами \vec{v}_B и \vec{v}_{Bp} , где k_v и k_v^* – коэффициенты влияния ветра и уклона, вычисленные по формулам (5) и (7) с учетом (4). Тогда фронт пожара будет распространяться в направлении вектора

$$\vec{v}_c = \vec{v}_{B\text{eff}} + \vec{v}_{Bp\text{eff}} \tag{11}$$

задающего направление суммарного влияния обеих факторов в горизонтальной проекции плоскости Π . Скорость распространения фронта пожара в направлении этого вектора в горизонтальной проекции плоскости Π увеличится на величину $v_c = |\vec{v}_c|$ и буде равна

$$v_{f0} = v_0 + v_c \tag{12}$$

В векторной форме вектор скорости распространения фронта пожара в горизонтальной проекции плоскости записывается в виде

$$\vec{v}_{f0} = \left(1 + \frac{v_0}{|\vec{v}_{B\text{eff}} + \vec{v}_{Bp\text{eff}}|} \right) (\vec{v}_{B\text{eff}} + \vec{v}_{Bp\text{eff}}) \tag{13}$$

а его модуль

$$v_{f0} = v_0 \left(\sqrt{(k_v - 1)^2 + (k_v^* - 1)^2 + 2(k_v - 1)(k_v^* - 1)\cos\varphi} + 1 \right) \tag{14}$$

где φ – угол между векторами \vec{v}_B и \vec{v}_{Bp} . Скорость распространения в направлениях флангов и тыла вычисляется с использованием соответствующих коэффициентов [7, 3]. Но соответственно с [1] можем также считать, что величина модуля скорости распространения пожара в направлении флангов и тыла совпадает со скоростью v_0 . Вследствие этого контур пожара в горизонтальной проекции плоскости Π при условии однородной среды распространения принимает форму эллипса.

На наклонной плоскости Π направление суммарного влияния ветра и уклона задается вектором \vec{v}_c^* , расположенного в этой плоскости, а его проекцией на горизонтальную плоскость является вектор \vec{v}_c . Тогда направление скорости распространения фронта пожара по плоскости Π совпадает с направлением вектора \vec{v}_c^* , а соответствующая скорость распространения вычисляется по формуле

$$v_f = v_{f0} \sqrt{\frac{\cos^2 \phi}{\cos^2 \theta} + \sin^2 \phi} \tag{15}$$

где ϕ – угол между векторами \vec{v}_c и \vec{v}_{Bp} . Скорость распространения в направлениях флангов и тыла опре-

Табела 1

Коэффициент влияния приведенной скорости ветра и коэффициенты влияния уклона на скорость распространения пожара при разных углах наклона плоскости

Table 1

Coefficient of influence of conventional wind speed and coefficients of slope influence on the rate of spread of fire at different angles of inclination of the plane

Угол наклона плоскости θ , градусы / Angle of the plane θ , degrees	Коэффициент влияния приведенной скорости ветра k_v^* (при $H=3$ м / $H=4$ м) / Coefficient of influence of conventional wind speed k_v^* (when $H = 3$ m / $H = 4$ m)	Коэффициент влияния уклона k_θ [7] / Coefficient of slope influence θ_k [7]	Коэффициент влияния уклона k_θ [3] / Coefficient of slope influence k_θ [3]
0.0	0.99 / 0.99	1.0	1.00
10.0	1.45 / 1.54	1.2	1.65
15.0	1.80 / 1.97	1.5	2.51
20.0	2.28 / 2.59	2.0	3.78
25.0	2.99 / 3.55	2.5	5.57
30.0	4.15 / 5.19	4.0	8.00
35.0	6.23 / 8.28	6.0	11.30
40.0	10.45 / 15.05	12.0	15.79

деляется с учетом допущения, что она равна скорости v_0 распространения пожара по горизонтальной поверхности без влияния уклона и ветра. Контур пожара при условии однородности горючего материала в этом случае также приобретает форму эллипса.

Следует заметить, что в случае совпадения направлений влияния уклона и ветра частным случаем формул (14) и (15) является известная зависимость, приведенная в [3].

Проверку математической модели совершенно для результатов проведенных нами экспериментальных исследований распространения пожара по горизонтальной поверхности и плоскости, наклоненной к горизонту под углами $7,5^\circ$ и 15° , без влияния ветра и с его влиянием. В расчетах использовано полученную экспериментальным путем скорость v_0 . Исследовался случай совпадения направления ветра и влияния уклона. Результаты вычислений с использованием предложенной модели и экспериментальные значения приведены в табл. 2.

4. Дискуссия над методами и результатами

В случае распространения горизонтальной плоскостью и под указанными углами наклона к горизонту скорость распространения фронта, полученная с помощью математической модели, хорошо согласуется с результатами эксперимента (рис. 2), а коэффициент корреляции между ними равен 0,98. С учетом влияния ветра со скоростью 1 м/с скорость распространения горизонтальной плоскостью и под углом

к горизонту также достаточно точно описывается математической моделью. Для лиственной подстилки математическая модель дает несколько худшие результаты, а в случае сухой травы результаты удовлетворительные, поскольку эти горючие материалы имеют наиболее неоднородные пространственные плотности. Среднее значение относительной погрешности модели составляет 5,7 %, а максимальная относительная погрешность не превышает 15,9 %.

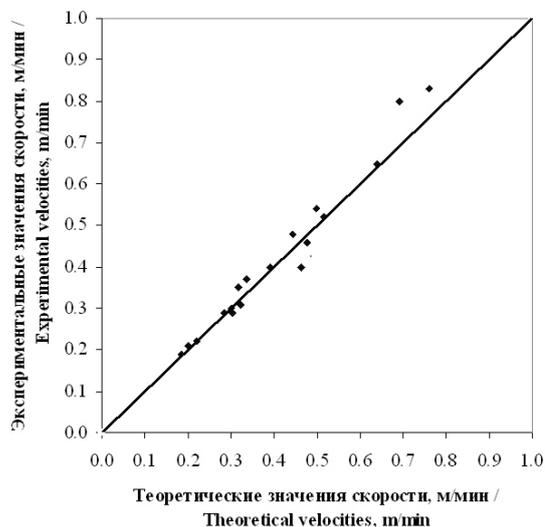


Рис. 2. Зависимость между теоретическими и экспериментальными значениями скоростей распространения фронта пожара

Fig. 2. The relationship between the theoretical and experimental values of the velocities of propagation of the fire front

Табела 2

Скорость распространения фронта пожара под влиянием уклона и ветра

Table 2

The velocity of propagation of the fire front under the influence of slope and wind

Название горючего материала / Name of combustible material	Скорость ветра, м/с / Wind speed, m / s	Угол уклона, градусы / Slope angle, degrees	Скорость распространения пожара, м/мин / Fire propagation velocity, m / min	
			вычисленная по формулам (14)-(15) / calculated by formulas (14) - (15)	полученные экспериментальным путем / experimentally obtained
Хвойная подстилка / Coniferous litter	0	0	0,19	0,19
		7,5	0,20	0,21
		15	0,22	0,22
	1	0	0,30	0,29
		7,5	0,32	0,35
		15	0,34	0,37
Лиственная подстилка / Leaf litter	0	0	0,28	0,29
		7,5	0,30	0,30
		15	0,32	0,31
	1	0	0,46	0,40
		7,5	0,48	0,46
		15	0,50	0,54
Сухая трава / Dry grass	0	0	0,39	0,40
		7,5	0,44	0,48
		15	0,51	0,52
	1	0	0,64	0,65
		7,5	0,69	0,80
		15	0,76	0,83

В случае распространения пожара по слою горючего материала в условиях рельефа, в окрестности каждой точки поверхности следует рассматривать касательную плоскость (3), в которой применять предложенную модель, определяя направление и скорость распространения фронта пожара.

5. Выводы

Зависимость скорости распространения фронта пожара от совместного действия уклона поверхности и ветра описывается математической моделью, результаты которой хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, особенно в случае хвойной подстилки – горючего материала наиболее пожароопасных хвойных лесов. Применение предложенной модели возможно при создании компьютерных систем моделирования распространения пожаров, используемых противопожарными службами с целью эффективного управления силами и средствами при пожаре.

Литература

1. Draizdeil D., Vvedenie v dinamiku pozharov, izdatelstvo Stroizdat, Moskva, 1990.
2. Basmanov A.E., Soznik A.P., Tarasenko A.A., Eksperimentalno-analiticheskaia model skorosti rasprostraneniia nizovogo lesnogo pozhara, „Problemy pozharnoi bezopasnosti”, 11 (2002), 17-25.
3. Rothermel R.C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, Research Paper. INT-115, Publisher US Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station Forest Service, Ogden, Utah, 1972.
4. Boboulos M., Purvis M.R.I., Wind and slope effects on ROS during the fire propagation in East-Mediterranean pine forest litter, „Fire Safety Journal”, 44 (2009), 764-769.
5. Rothermel R.C., Rinehard G.C., Field procedures for verification and adjustment of fire behavior predictions, General Tech. Rep. INT-142, Publisher U.S. Department of Agriculture Intermountain Forest and Range Experiment Station Forest Service, Ogden, Utah, 1983.
6. Weise D.R., Biging G.S., Effects of wind velocity and slope on flame properties, „Canadian Journal of Forest Research”, 26 (1996), 1849-1858.
7. Volokitina A.V., Sofronov M.A., Karnaukhova E.A., Prognozirovanie povedeniia i posledstviu nizovykh pozharov s ispolzovaniem krupnomasshtabnykh kart rastitelnykh goriuchikh materialov, „Lesnoe khoziaistvo”, 1 (2004), 41-43.
8. Ntaimo L., Khargharia B., Zeigler B.R. and Vasconcelos M.J., Forest Fire Spread and Suppression in DEVS, „SIMULATION”, 80, Issue 10 (2004), 479-500.
9. Konev E.V., Vasilenko A.V., Kovalev V.I., Maliutin A.M., O vliianii vetra i krutizny sklona na rasprostranenie kromki lesnogo pozhara, „Lesnoi zhurnal”, 1 (1989), 24-27.
10. Morvan D., Tauleigne V., Dupuy J.L., Flame geometry and surface to crown fire transition during the propagation of a line fire through a mediterranean shrub, In: Proceeding 4th International Conference on Forest Fire Research – 2002 Wildland Fire Safety Summit, Publisher Association for the Development of Industrial Aerodynamics, Coimbra, Portugal, 2002.
11. Tarasenko A.A., Model dinamiki kontura prirodnogo pozhara pod deistviem sovmestnogo vliianiia landshaftno-meteorologicheskikh faktorov, „Problemy pozharnoi bezopasnosti”, 24 (2008), 194–200.

Кузык Андрей Данилович – ученый секретарь Львовского государственного университета безопасности жизнедеятельности. Доктор сель.-хоз. наук, кандидат физ.-мат. наук, доцент. Область научных интересов: теоретические и экспериментальные исследования процессов горения, пожарной опасности лесов и пожароопасных свойств горючих материалов растительного происхождения.

Карабын Оксана Александровна – доцент кафедры прикладной математики и механики Львовского государственного университета безопасности жизнедеятельности. Кандидат физ.-мат. наук, доцент. Область научных интересов: математическое моделирование динамических процессов.