

М.В. Кустов, к.т.н., ст. преподаватель, НУГЗУ

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА, ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА И ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАНДШАФТНЫХ ПОЖАРОВ

(представлено д-ром техн. наук Соболев А.Н.)

Проведено комплексное исследование влияния скорости ветра, влажности воздушной среды и горючего материала на скорость распространения ландшафтных пожаров. Определена критическая влажность воздуха и горючего материала, при которых прекращается распространение ландшафтного пожара.

Ключевые слова: влажность воздуха, ландшафтный пожар, скорость распространения горения, лесные пожары, торфяные пожары.

Постановка проблемы. Тушение наземных ландшафтных пожаров (НЛП) характеризуется существенными затратами огнетушащего вещества, материальных и людских ресурсов. Трудность ликвидации таких пожаров определяется как большой площадью распространения пожара, так и широким спектром факторов влияющих на развитие и тушение НЛП. Одной из возможностей доставки необходимого количества огнетушащего вещества в зону тушения является искусственное воздействие на облачные атмосферные образования с целью инициирования выпадения осадков над зоной пожара. Основным механизмом тушения с помощью искусственного осадкообразования является охлаждение поверхности горючего материала и зоны горения с повышением их влажности. С целью определения необходимого количества воды в виде атмосферных осадков и интенсивности осадков при тушении НЛП одной из проблем, подлежащих разрешению, является установление критической влажности воздуха и горючего материала, которая обеспечивает успешное тушения ландшафтного пожара.

Анализ последних достижений и публикаций. Вопросам динамики развития и тушения НЛП в последнее время уделяется большое внимание. Основными факторами, влияющими на скорость распространения НЛП являются: рельеф местности, скорость и направление ветра, пожарная нагрузка, влажность воздуха и горючего материала [1, 2]. В работе [3] рассмотрено комплексное влияние этих факторов и получена математическая модель динамики развития и тушения НЛП, которая позволяет определять тактику тушения пожара на основе прогноза его развития. Основными методами тушения НЛП является сброс воды в зону горения с помощью авиации, локализация зоны горения за счет создания разделительных полос, тушение мелких очагов с помощью пожарных автомобилей [4]. Однако автор этой работы аргументировано указывает на низкую эффективность всех

используемых методов тушения ландшафтных пожаров. В связи с этим в работе [5] предложен метод тушения НЛП путем искусственного осадкообразования над зоной пожара. Однако вопрос определения необходимой интенсивности осадков для успешной ликвидации пожара остаётся не решённым.

Постановка задачи и её решение. Целью работы является установление экспериментальным путём зависимости скорости распространения пожара от скорости ветра, влажности воздуха и горючего материала.

К ландшафтными пожарам, относятся пожары, которые охватывают различные компоненты географического ландшафта. Ландшафтные пожары можно разделить на подземные (торфяные), надземные (лесные верховые) и наземные (степные, лесные низовые) [6]. В связи с этим в качестве горючего материала выбраны: древесина (сосна), ветки сосны, трава и торф. Все материалы исследовались на горизонтальную скорость распространения пожара. В случае лесных пожаров необходимо дополнительно провести исследование вертикальной скорости распространения пожара на образцах древесины и веток сосны.

Исследование скорости распространения пламени проводилось согласно методике [7]. Для обеспечения различной влажности воздушной среды исследования проводились в лабораторной камере (рис. 1).

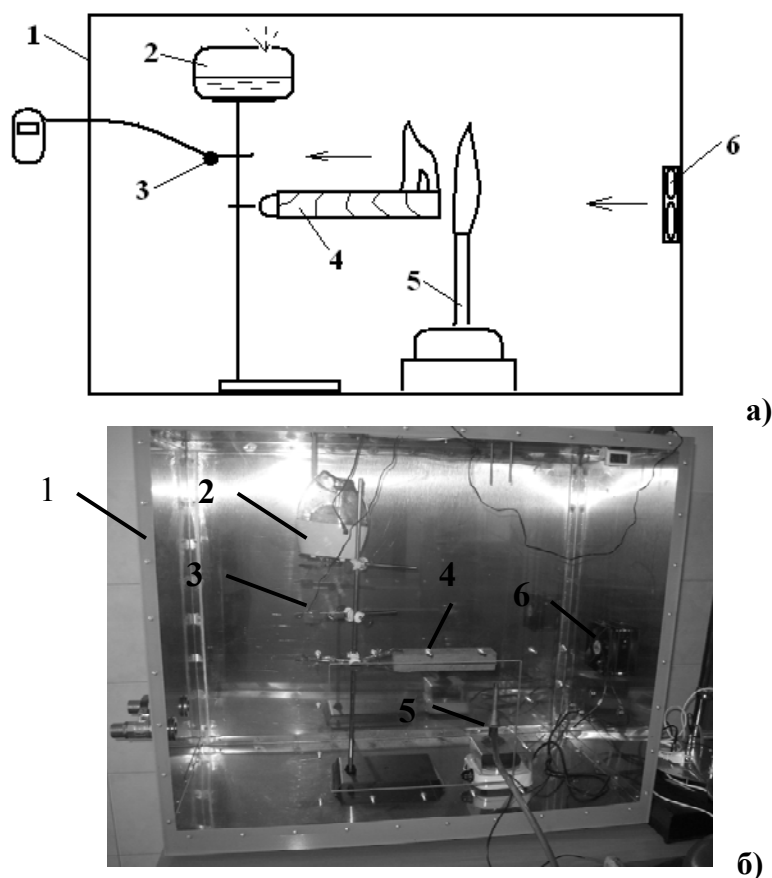


Рис. 1 – Схема (а) и внешний вид лабораторной камеры (б): 1 - камера; 2 – ультразвуковой диспергатор жидкости; 3 – датчик гигрометра; 4 – образец; 5 – горелка; 6 – вентилятор

В качестве источника зажигания использовалась газовая горелка с длиной пламени ≈ 40 мм, размещённая на расстоянии 3 мм от образца на протяжении 3 мин. Скорость распространения пламени определялась по среднему времени (по 3 образцам) прохождения фронта пламени по поверхности участка стандартной длины. Горизонтальный поток воздуха в сторону образца подавался воздушным электровентилятором. Регулировка скорости потока воздуха (ветра) производилось путём изменения скорости вращения электровентилятора.

Влажность воздушной среды изменялась с помощью ультразвукового диспергатора жидкости (рис. 2) и контролировалась лабораторным электронным гигрометром с пределом точности 0,1 % (рис. 3).

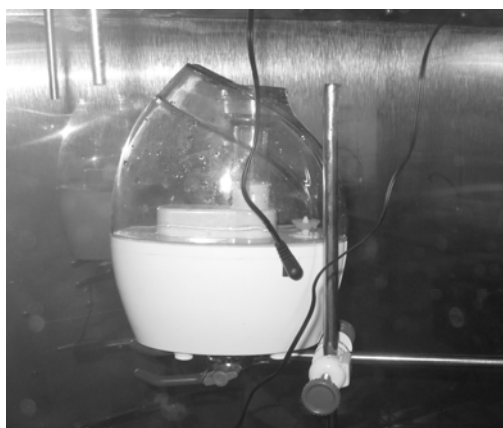


Рис. 2 – Ультразвуковой диспергатор жидкости NU 0802



Рис. 3 – Лабораторный электронный гигрометр

Данный диспергатор (рис. 2) позволяет обеспечить дисперсность воды, соизмеримую с дисперсностью жидкости в атмосферных образованиях (табл. 1).

Таблица 1 – Дисперсность воды при лабораторных экспериментах и в реальных атмосферных образованиях

	$r \cdot 10^{-6}$, м
Ультразвуковой диспергатор	~ 10
Туман	5 – 15
Слоисто-дождевые облака (Nimbostratus, Ns)	10 - 25
Кучево-дождевые облака (Cumulonimbus, Cb)	25-40

Влажность образцов (W_o) определялась согласно [8] путем измерения массы образца (m_1) относительно массы образца после полного высушивания (m_2):

$$W_o = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Образцы древесины, длиной 320 мм, шириной 140 мм, фактической толщиной 10 мм, закреплялись на металлическом держателе в вертикальном и горизонтальном положении (рис. 4 а). Образцы веток сосны имели соразмерные масштабы с древесиной и так же закреплялись в вертикальном и горизонтальном положении с помощью держателя. Степная трава и торф исследовались только на скорость горизонтального распространения пламени. Травяной массив и торф, с размерами образца, представленными выше для древесины, размещались на металлической подложке толщиной 1,5 мм, закреплённой на держателе (рис. 4 б).

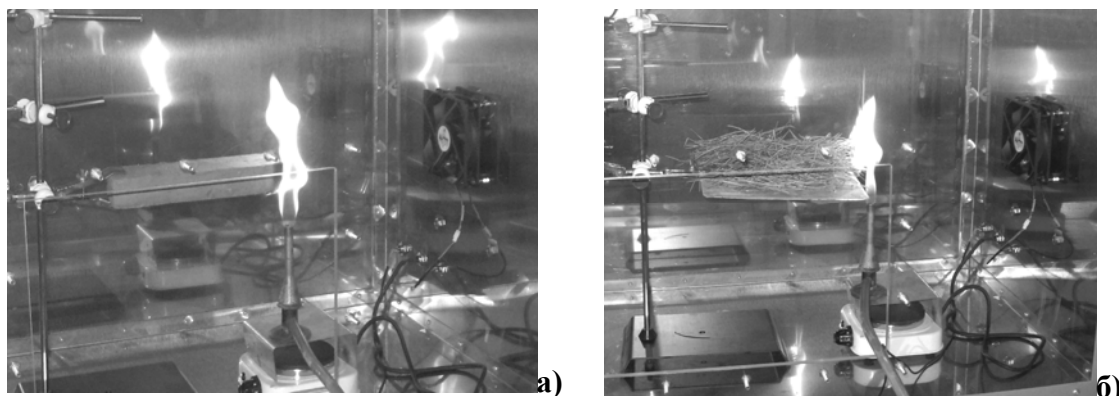


Рис. 4 – Образцы в камере: а) древесина; б) степная трава

С целью реализации данного исследования поставлен эксперимент типа 2^3 [9]. Для построения полинома второго порядка пользовались методом Бокса-Вильсона [10], согласно которому использовали ортогональные планы первого порядка в качестве ядра, на котором потом достраивали конструкцию плана второго порядка. Перевод натуральных переменных в кодированные представлен в табл. 2.

Таблица 2 – Кодирование данных

Уровень и интервал изменения факторов	Влажность образца, %				Влажность воздушной среды, %	Скорость ветра, м/с
	дерево	ветвь	трава	торф		
Нулевой уровень, $x_i=0$	41	42	44	47	59	8
Интервал изменения, δ_i	41	42	44	47	39	8
Верхний уровень, $x_i=1$	82	84	88	94	98	16
Нижний уровень, $x_i=-1$	0	0	0	0	20	0
Кодовое обозначение	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_2	X_3

Верхний уровень значений влажности образцов обусловлен максимальной влажностью образцов, при которой возможен процесс горения данного материала. Верхним уровнем влажности воздушной среды, является максимальная природная влажность атмосферного воздуха. Нижний уровень влажности воздушной среды определяется минимальным значением влажности на территории Украины за последние 10 лет (21%) [11]. Из этого источника так же установлено, что ветер со скоростью > 16 м/с составляет менее 1 % от среднегодового распределения скорости ветра, следовательно это значение выбрано в качестве верхнего уровня.

Матрица двухфакторного эксперимента по определению зависимости скорости распространения пламени по образцу от скорости ветра, влажности воздушной среды и влажности образца приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Ядро центрального композиционного планирования второго порядка для трёх факторов

Эксперимент	$X_1(W_0)$	$X_2(W_{вс})$	$X_3(V_0)$	$V \cdot 10^2, \text{ м/с}$					
				дерево (горизонт.)	дерево (вертик.)	ветви (горизонт.)	ветви (вертик.)	трава	торф
Планирование типа 2^3	-1	-1	-1	3,2	3,7	3,6	4,2	4,6	5,3
	+1	-1	-1	1,3	1,5	1,3	1,7	2,8	3,3
	-1	+1	-1	1,7	2,0	1,6	1,9	2,2	2,6
	+1	+1	-1	0,3	0,5	0,2	0,3	0	0
	-1	-1	+1	4,4	3,5	4,7	4,0	5,1	5,8
	+1	-1	+1	0,9	0,6	1,3	0,8	1,2	1,3
	-1	+1	+1	1,2	0,8	1,5	1,1	1,4	1,6
	+1	+1	+1	0	0	0	0	0	0
Нулевая точка	0	0	0	2,4	2,1	3,0	2,7	5,2	7,3

Для полученных из расчета моделей по критерию Стьюдента проверялась значимость коэффициентов. Доверительный интервал определялся по формуле:

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0.05; f_y)} \sqrt{\frac{s_y^2}{n}}, \quad (2)$$

где: $t_{(0.05; f_y)}$ - 5% - ная точка распределения Стьюдента с f_y – степенью свободы, $t=2,7764$; s_y^2 - дисперсия воспроизводимости (ошибка опыта).

После исключения незначимых коэффициентов регрессии ре-
Влияние скорости ветра, влажности воздуха и горючего материала на скорость распростра- 137
нения ландшафтных пожаров

зультаты моделирования целесообразно представить в виде (3-8):

$$V_{\text{дер.гор.}} = -0.0105 \cdot X_{11}^2 + 0.0131 \cdot X_3^2 - 0.0121 \cdot X_{11} \cdot X_2 - 0.121 \cdot X_{11} \cdot X_3 + 1.621 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.0579 \cdot X_{11} - 0.874 \cdot X_2 + 0.679 \cdot X_3 + 5.15; \quad (3)$$

$$V_{\text{дер.верт.}} = -0.0173 \cdot X_{11}^2 + 0.0124 \cdot X_3^2 - 0.21 \cdot X_{11} \cdot X_2 - 0.086 \cdot X_{11} \cdot X_3 + 2.683 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.257 \cdot X_{11} - 0.344 \cdot X_2 - 0.679 \cdot X_3 + 5.23; \quad (4)$$

$$V_{\text{ветви гор.}} = -0.0925 \cdot X_{12}^2 + 0.312 \cdot X_3^2 - 0.472 \cdot X_{12} \cdot X_3 + 1.621 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.239 \cdot X_{12} - 0.741 \cdot X_2 + 1.028 \cdot X_3 + 6.02; \quad (5)$$

$$V_{\text{ветви верт.}} = 0.083 \cdot X_2^2 + 0.0651 \cdot X_3^2 + 1.396 \cdot X_{12} \cdot X_2 - 0.431 \cdot X_{12} \cdot X_3 + 1.007 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.126 \cdot X_{12} - 1.053 \cdot X_2 - 0.253 \cdot X_3 + 6.28; \quad (6)$$

$$V_{\text{трава}} = -0.165 \cdot X_{13}^2 - 2.034 \cdot X_{13} \cdot X_2 - 0.963 \cdot X_{13} \cdot X_3 + 2.821 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.079 \cdot X_{13} - 0.392 \cdot X_2 + 1.259 \cdot X_3 + 7.03; \quad (7)$$

$$V_{\text{торф}} = 0.32 \cdot X_2^2 + 1.277 \cdot X_3^2 - 0.441 \cdot X_{14} \cdot X_2 + 2.358 \cdot X_2 \cdot X_3 - 1.0276 \cdot X_{14} - 1.157 \cdot X_2 + 1.206 \cdot X_3 + 7.57. \quad (8)$$

Адекватность и воспроизводимость моделей проверялась с помощью критериев Фишера и Кохрена. Проверка дала положительный результат. В соответствии с (3-8) получены уравнения регрессии в натуральных переменных и для примера торфа построена зависимость скорости распространения пламени от влажности образцов и скорости ветра при постоянной влажности воздушной среды, которая соответствует средней влажности в летний период ($W_{\text{вс}} = 55\%$). Результаты представлены на рис. 5.

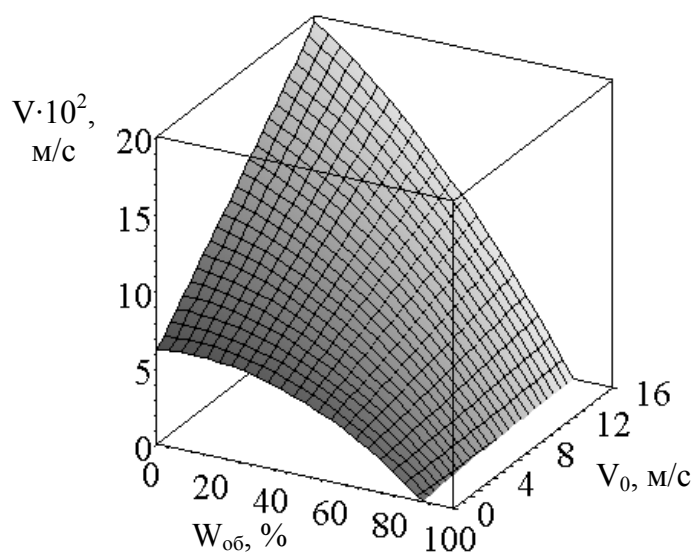


Рис. 5 – Влияние влажности образца торфа и скорости ветра на скорость распространения горения при постоянной влажности воздушной среды

Во второй серии зависимостей (рис. 6) представлено влияние влажности воздушной среды на скорость распространения пламени при постоянной скорости ветра ($V_0 = 5$ м/с) и влажности образцов ($W_{\text{древесины}} = 35\%$; $W_{\text{веток сосны}} = 45\%$; $W_{\text{травы}} = 30\%$; $W_{\text{торфа}} = 40\%$ [12]).

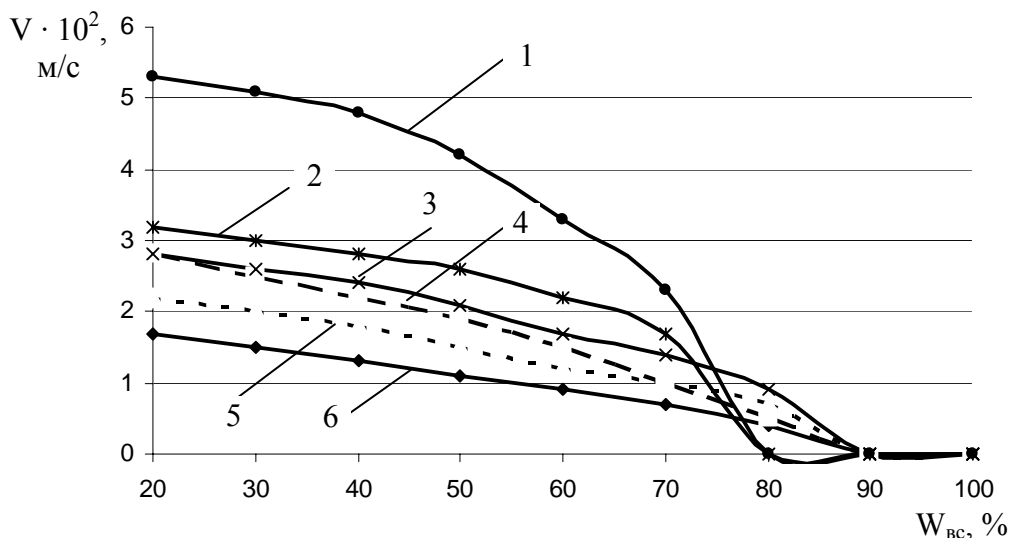


Рис. 6 – Влияние влажности воздушной среды на скорость распространения пламени при постоянной влажности образцов и скорости ветра: 1 – торф; 2 – степная трава; 3 – ветки сосны вертикальные; 4 – древесина вертикальная; 5 – ветки сосны горизонтальные; 6 – древесина горизонтальная

Полученные результаты хорошо согласуются с данными [13] и результатами, полученными в работе [3]. Из анализа моделей (3-8) и рис. 5 - 6 можно сделать вывод, что скорость ветра оказывает существенное влияние только при низкой влажности воздуха и горючего материала, с повышением влажности влияние ветра падает и при определенных значениях, близких к критическим, высокая скорость ветра ($V_0 > 7$ м/с) снижает скорость распространения пламени. Это, вероятно, объясняется эффектом срыва пламени потоком воздуха, что наблюдалось экспериментально.

Данные рис. 6 свидетельствуют о резком падении скорости распространения пламени по поверхности травяного массива и торфа при высокой влажности воздушной среды. Анализируя свойства горючих материалов необходимо отметить, что данный эффект наблюдается у материалов с высокой степенью пористости, что способствует быстрому поглощению атмосферной влаги и, следовательно, резкому снижению скорости распространения пламени.

Анализ результатов эксперимента показывает обратную зависимость скорости горения вертикальных образцов от скорости ветра. Снижение скорости распространения фронта пламени по вертикальным образцам с повышением скорости ветра в горизонтальном на-

правлении объясняется отводом тепла ветром от образца по направлению потока воздуха. По результатам анализа моделей (3-8) следует отметить, что комплексное увеличение влажности горючего материала и воздушной среды снижает показатель критической влажности, при котором прекращается дальнейшее распространение пламени.

Выводы. В работе впервые рассмотрено комплексное влияние скорости ветра, влажности образцов древесины, ветвей сосны, степной травы и торфа, а также влажности воздушной среды на скорость распространения пламени по данным материалам. Экспериментальным путём определены критические значения влажности образцов и воздушной среды, при которых происходит ликвидация горения. Также установлено, что во всех случаях существует область, в которой незначительное увеличение влажности существенно снижает скорость горения. Полученные результаты при наличии данных о параметрах пожара и прогнозе по динамике его развития позволяют определить необходимое количество атмосферной влаги и интенсивность осадков для успешной ликвидации ландшафтных пожаров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коротинський П.Н. Захист природних екосистем України від пожеж / П.Н. Коротинський // Надзвичайна ситуація. – 2002. - №3. – С. 48-51.
2. Кустов М.В. Влияние климатических факторов на процессы развития и прекращения крупных пожаров на открытой местности / М.В. Кустов, В.Д. Калугин, В.В. Коврегин // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ, 2011. – Вып.. 29. – С. 127-135.
3. Тарасенко А.А. Развитие научных основ ликвидации наземных ландшафтных пожаров: Автореф дис.... доктор. техн. наук / УГЗУ. – Харьков, 2010. – 24 с.
4. Курбатский Н.П. Техника и тактика тушения лесных пожаров/ Н.П. Курбатский – М.: Гослесбумиздат, 1962. – 154 с.
5. Кустов М.В. Исследование механизма каплеобразования при тушении пожаров атмосферными осадками / М.В. Кустов // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ, 2011. – Вып.. 30. – С. 139-146.
6. ГОСТ СССР 17.6.1.01-83. Охрана природы. Охрана и защита лесов. Термины и определения: Введ. 01.07.84. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 12 с.
7. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования: Введ. 01.07.92. – М.: Изд-во стандартиформ, 2006. – 68 с.
8. ГОСТ 16483.7-71. Древесина. Методы определения влажности: Введ. 01.01.73. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 8 с.
9. Кренецкий И.И. Основы научных исследований. Уч. пособие

для вузов. – Киев-Одесса, 1981. – 208с.

10. Vox G. E. P. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. / G. E. P. Vox, K. B. Wilson // “Journal of the Royal Statistical Society”. Series B, 1951, 13, № 1, p. 1 – 45.

11. Архів даних погоди Українського гідрометеорологічного центру МНС України. - Режим доступа - http://meteo.gov.ua/ua/past_ukr.

12. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник: в 2-х ч. – 2-е изд. / А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко - М.: Асс. «Пожнаука», 2004 – 713 с.

13. Іванніков В.П. Довідник керівника гасіння пожежі / В.П. Іванніков, П.П. Ключ -М.: Стройиздат, 1987.
puczu.edu.ua

М.В. Кустов

Вплив швидкості вітру, вологості повітря та горючого матеріалу на швидкість поширення ландшафтних пожеж

Проведено комплексне дослідження впливу швидкості вітру, вологості повітря та горючого матеріалу на швидкість поширення ландшафтних пожеж. Визначено критичну вологість повітря й пального матеріалу, при яких припиняється поширення ландшафтної пожежі.

Ключові слова: вологість повітря, ландшафтна пожежа, швидкість поширення горіння, лісові пожежі, торф'яні пожежі.

M.V. Kustov

Influence of speed of the wind, humidity of air and combustible material for speed of distribution of landscape fires

Complex research of influence of speed of a wind, humidity of air and combustible material for speed of landscape fires distribution is conducted. Critical humidity air and a combustible material at which distribution of a landscape fire stops is defined.

Keywords: humidity of air, a landscape fire, speed of burning distribution, forest fires, peat fires.