

УДК 614841.42:630-047.72

## МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Дмитриченко А.С.\*, к. т. н., доцент, Врублевский А.В.\*\*  
\*Белорусский государственный технологический университет  
\*\*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: anv3rad@tut.by

*Разработана методика прогнозирования последствий низовых лесных пожаров, базирующаяся на математической модели Ротермела. Достоинством методики является использование при расчетах только тех входных параметров, которые могут быть определены заранее, без проведения натурных огневых экспериментов, что обуславливает ее важную практическую значимость.*

*The methods of ground fires consequences prognostication has been elaborated basing on the Rotermel mathematical model. The elaborated methods have the advantage of using only those input parameters which can be determined beforehand without carrying out natural fire testing. That stipulates the practical significance of the elaborated methods.*

(Поступила в редакцию 15 апреля 2011 г.)

### ВВЕДЕНИЕ

Лес, если его рассматривать как объект горения, неоднороден по составу горючего материала. Причем данная неоднородность характеризуется неравномерным распределением горючего материала, как по площади леса, так и по высоте. Горючими материалами являются различные группы и виды лесных растений:

- 1) деревья различных пород и поколений; кустарники, образующие подлесок; травянистые растения; мхи и лишайники;
- 2) их морфологические части – хвоя, листья, ветки;
- 3) разновидность растительных остатков – опад, или отмершие части растений, подстилка, которая формируется в результате разложения опада, валежник, торф.

Структура слоя горючих материалов, химический состав, влагосодержание во многом определяют важнейшие для расчета пожаров характеристики горения, такие как полнота сгорания горючего материала, скорость распространения горения, интенсивность тепловыделения и другие характеристики. Наибольшую потенциальную пожарную опасность представляют нижний ярус леса, состоящий из мхов, лишайников, опада и подстилки. Они быстро высыхают, легко воспламеняются и распространяют пламя, создавая благоприятные условия для возгорания менее горючих материалов.

Распространение огня по живому и мертвому напочвенному покрову, а также при благоприятных условиях, перекидываясь на кустарники подлеска, представляет собой лесной низовой пожар, который в определенных ситуациях может перейти в верховой. Условиями, способствующими переходу от низового пожара к верховому, могут быть наличие большого количества горючих материалов, сильный ветер, определенный рельеф. В зависимости от характера распространения пламени верховые пожары могут быть повальными и беглыми. Повальный пожар возникает при большом количестве горючего материала на земле, что позволяет низовому пожару достичь крон деревьев и поджечь их. Причиной беглого пожара является сильный ветер, обеспечивающий продвижение пламени по всему пологу леса с периодическим обгоном и ускорением горения нижних ярусов.

Особую опасность при протекании низового пожара представляет формирование конвективных колонок, способных переносить горящие частицы на большие расстояния за пределы контура пожара, создавая тем самым новые очаги горения. Когда образование очагов носит массовый характер, такие пожары называются пятнистыми. Кроме того, сами горючие

газы, обладая высокой температурой и поднимаясь с определенной скоростью, создают опасность возгорания полого леса, т. е. перехода низового пожара в верховой.

Разработка методики расчета низового пожара и являлось целью настоящей работы.

### СТРУКТУРА МОДЕЛИ НИЗОВОГО ПОЖАРА

Лесной пожар – явление стихийное, его возникновение случайно во времени и пространстве. Он неудобен для детального наблюдения и измерения его параметров. Из-за этого возникает проблема выбора наиболее адекватной и точной математической модели для расчета конкретного пожара. В настоящее время точность моделей обсуждается только на качественном уровне [1–5]. Основными причинами погрешности расчета являются допущения, принятые при создании модели и неточность входных параметров данной модели [2]. Проверка различных моделей после достаточно точного измерения выходных параметров экспериментальных пожаров показала возможность ошибки предсказания скорости распространения пламени по лучшим моделям в среднем несколько десятков процентов [6].

Таким образом, повышение надежности и достоверности в дальнейшем разрабатываемых методик должно идти по следующим направлениям:

1) повышение адекватности создаваемой модели реальному пожару, что не всегда удается в силу сложности механизмов возникновения и развития пожара и, как следствие, усложнение решения системы уравнений;

2) уточнение и развитие информационной базы моделей, включающей большое количество показателей: данные об очаге горения, метеоданные, описание леса, топографические данные, свойства горючих материалов напочвенного покрова и верхнего яруса;

3) улучшение техники измерения параметров лесных пожаров.

Наиболее удачной моделью по расчету скорости распространения огня по лесным горючим материалам при низовых пожарах является модель Ротермела [7]. При построении своей модели Ротермел исходил из того, что скорость распространения пламени пропорциональна отношению теплоты горения материала к теплоте нагрева новых порций горючего материала до температуры воспламенения. Достоинством модели является использование в расчетах только тех входных характеристик, которые могут быть измерены заранее, т. е. теплофизических характеристик материалов. Модель Ротермела, опирающаяся на большой экспериментальный материал, прошла апробацию в полевых условиях [8] и получила дальнейшее развитие в работах других исследователей [9–11].

### МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Методика базируется на модели Ротермела, которая сочетает в себе широкий диапазон применимости с достаточной точностью прогноза.

Все входные параметры модели могут быть определены заранее, без проведения натурных огневых экспериментов, что обуславливает ее важную практическую значимость. Работоспособность модели Ротермела проверялась на большом количестве экспериментального материала, полученного в натуральных условиях.

В практике борьбы с лесными пожарами часто возникает необходимость оперативно оценить последствия пожара через определенный промежуток времени. При этом, как правило, отсутствует детальная информация о данном лесном массиве, и имеются отдельные характеристики некоторых компонентов напочвенного покрова. В этой связи, в разработанной методике многокомпонентный слой напочвенного покрова заменяется однокомпонентным слоем с параметрами, соответствующими средним значениям для многокомпонентного слоя.

Усреднение параметров слоя лесных горючих материалов (ЛГМ) выполняется по отношению

$$\Pi = \sum_{i=1}^n g_i \cdot \Pi_i, \quad (1)$$

где  $\Pi_i$  – показатель (влагосодержание, предельное влагосодержание, плотность, теплота сго-

рания, удельная поверхность)  $i$ -го компонента ЛГМ;

$g_i$  – вес  $i$ -го компонента ЛГМ.

Вес  $i$ -того компонента ЛГМ определяется по соотношению

$$g_i = A_i / A_T, \quad (2)$$

где  $A_i = \sigma_i \cdot \omega_{0i} / \rho_i$  – площадь поверхности  $i$ -го компонента, приходящаяся на  $1 \text{ м}^2$  территории;

$A_T = \sum_{i=1}^n A_i$  – суммарная площадь поверхности всех компонентов.

Средние значения основных характеристик напочвенного покрова приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Средние характеристики напочвенного покрова

Состав	Лишайник	Мох Шребера	Хвоя	Листья	Сухие злаки	Кустарник	Отходы лесозаготовок
Запас горючего, кг/м <sup>2</sup>	1,7	1,0	0,3	0,15		0,225	0,9
Удельная поверхность, м <sup>-1</sup>	2000	2500	6000	11 560	18 170	6560	4920
Теплотворная способность, ккал/кг	4300	4700	4500	4880	4200	4400	
Плотность материала, кг/м <sup>3</sup>	300		512	460	420	512	
Глубина слоя, м	0,12	0,1		0,075	0,5	0,6	0,7
Критическое влагосодержание, кг/кг	0,3	0,5	0,3	0,4		0,2	

Для удобства пользования все величины, входящие в модель Ротермела, приведены к метрической системе единиц.

Исходными данными для прогнозирования последствий пожаров в разработанной методике являются:

- средний запас древесины –  $V_d$ , м<sup>3</sup>/га;
- высота склона –  $H$ , м;
- длина склона –  $L$ , м;
- скорость ветра по данным метеостанции –  $W_{Z10}$ , м/с;
- средняя высота древостоя –  $Z_d$ , м;
- высота полога древостоя –  $\Delta H$ , м;
- объемная плотность полога леса –  $f$ ;
- средний запас ЛГМ –  $\omega_0$ , кг/м<sup>2</sup>;
- высота слоя ЛГМ –  $\delta$ , м;
- влагосодержание –  $M$ , кг/кг;
- предельное влагосодержание –  $M_x$ , кг/кг;
- удельная поверхность ЛГМ –  $\sigma$ , м<sup>-1</sup>;
- плотность ЛГМ –  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>;
- теплота сгорания ЛГМ –  $h$ , Кдж/кг.

Содержание минеральных веществ  $S_T = 0,02$  и коэффициент, учитывающий минеральный состав ЛГМ  $\eta_s = 0,42$  принимаются постоянными. Объемная плотность полога леса определяется по табл. 2.

Таблица 2 – Объемная плотность полога леса

Степень сомкнутости полога	Теньвыносливые		Светлолюбивые	
	Молодые	Спелые и перестойные	Молодые	Спелые и перестойные
Густые	0,32	0,24	0,16	0,08
Редкие	0,09	0,07	0,07	0,05

Одним из самых важных входных параметров модели является скорость ветра на половине высоты пламени. Для пересчета скорости ветра, полученной на метеостанции, на эту высоту в методике используется формула Альбини [2]:

$$W = 0,31W_{z_6} / \left[ \sqrt{fZ_d} \cdot \ln \left[ (20 + 1,18Z_d) / 0,43Z_d \right] \right], \quad (3)$$

где  $W_{z_6} = W_{z_{10}} \cdot [(Z_d + 6) / 10]^{0,28}$  – скорость ветра на уровне 6 метров над кронами древостоя.

Расчет производится по следующему алгоритму.

1. Определяется линейная скорость распространения пламени.

Потенциальная скорость реакции горения

$$r = 0,168\sigma^{1,5} (495 + 9,979 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma^{1,5})^{-1} \cdot \gamma^{(4,239\sigma^{0,1} - 7,27)^{-1}} \times \\ \times \exp \left[ (4,239\sigma^{0,1} - 7,27)^{-1} \cdot (1 - \gamma) \right], \quad (4)$$

где  $\gamma = 3,767 \cdot 10^{-4} \cdot \omega_0 / (\delta\sigma^{-0,8189})$ .

Доля теплового потока, идущая на поддержание процесса горения:

$$\xi = (192 + 0,079\sigma)^{-1} \cdot \exp \left[ (0,792 + 0,376\sigma^{0,5}) \cdot (\gamma \cdot 8,858\sigma^{-0,8189} + 0,1) \right]. \quad (5)$$

Эффективная плотность горючего:

$$\varepsilon = \exp(-452,756 / \sigma). \quad (6)$$

Коэффициент замедления скорости сгорания по влагосодержанию:

$$\eta_m = 1 - 2,59M / M_x + 5,11(M / M_x)^2 - 3,52(M / M_x)^3. \quad (7)$$

Теплота воспламенения:

$$Q = 250 + 1116M. \quad (8)$$

Скорость распространения фронта пожара при отсутствии ветра и склона, м/мин:

$$S_{\text{фр}}^0 = 0,048h\eta_s\omega_0\eta_m r\xi / \left[ (\rho + \rho St)Q\gamma\varepsilon\sigma^{-0,8189} \right]. \quad (9)$$

Коэффициент заполнения слоя ЛГМ:

$$\beta = 8,858\gamma\sigma^{-0,8189}. \quad (10)$$

Средний уклон местности:

$$\operatorname{tg} \varphi = H / L. \quad (11)$$

Коэффициент влияния уклона местности на скорость распространения фронта пожара:

$$\varphi_s = 5,275\beta^{-0,3} \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi. \quad (12)$$

Коэффициент влияния ветра на скорость распространения фронта пожара:

$$\varphi_w = K_1 \cdot K_2, \quad (13)$$

где  $K_1 = \gamma^{-0,715 \cdot \exp(-1,094 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma)}$ ;  $K_2 = 7,47 \cdot \exp(-0,06919\sigma^{0,55}) \cdot (196,848W)^{0,0133\sigma^{0,54}}$ .

Скорость распространения фронта пожара, м/мин:

$$\vartheta_{\text{фр}} = \vartheta_{\text{фр}}^0 \cdot (1 + \varphi_s + \varphi_w). \quad (14)$$

Скорость распространения кромки пожара в произвольном направлении под углом  $\alpha$  к направлению ветра ( $\alpha = 0 \div 2\pi$ ):

$$\vartheta(\alpha) = \vartheta_{\text{фр}} \cdot \exp[A_W \cdot (\cos \alpha - 1)], \quad (15)$$

где  $A_W = 0,785W - 0,106W^2$ ;  $W \leq 3$  м/с.

2. Определяется периметр пожара, площадь пожара и объем поврежденной древесины.

При различных углах  $\alpha$  ( $\alpha = 0 \div 2\pi$ ) определяем координаты контура пожара в фиксированные моменты времени  $\tau$ , мин:

$$\begin{aligned} X(\alpha, \tau) &= (R_0 + \vartheta(\alpha) \cdot \tau) \cdot \cos \alpha; \\ Y(\alpha, \tau) &= (R_0 + \vartheta(\alpha) \cdot \tau) \cdot \sin \alpha. \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\tau_0 \leq \tau \leq \tau_{\text{НТ}}$ ;  $\tau_0$  – время обнаружения пожара;

$R_0$  – радиус начального контура пожара в момент времени  $\tau_0$ ;

$\tau_{\text{НТ}}$  – время начала тушения пожара.

Периметр пожара, м:

$$P = \int_0^{2\pi} [R_0 + \vartheta(\alpha) \cdot \tau] d\alpha, \quad (17)$$

Площадь пожара, м<sup>2</sup>:

$$S = 0,5 \cdot \int_0^{2\pi} [R_0 + \vartheta(\alpha) \cdot \tau]^2 d\alpha. \quad (18)$$

Объем поврежденной древесины, м<sup>3</sup>:

$$V_{\text{П}} = V_d S \cdot 10^{-4}. \quad (19)$$

Важным параметром в модели является влагосодержание напочвенного слоя. Для ее

определения предлагается использовать метод, разработанный [12], который базируется на экспериментальной зависимости влажности от показателя ПВ-1.

Влагосодержание  $M$ , кг/кг определяется по формуле

$$M = m / (100 - m), \quad (20)$$

где  $m$  – относительная влажность ЛГМ, %.

Относительная влажность ЛГМ определяется по табл. 3 в зависимости от показателя влажности напочвенного покрова ПВ-1.

Таблица 3 – Изменение наиболее вероятной влажности напочвенного покрова в зависимости от величины ПВ-1

ПВ-1	300	400	450	500	600	700	800	850	900	1000
m, %	36,5	29,0	25,5	22,5	19,5	17,0	15,0	14,5	14,0	13,5

ПВ-1	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900
m, %	13,5	13,5	13,0	12,5	12,5	12,0	12,0	11,5	11,0

ПВ-1	2000	2100	≥ 2200
m, %	11,0	10,5	10

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коровин, Г. Н. Методика расчета некоторых параметров низовых лесных пожаров / Г.Н. Коровин // Сборник научно-исследовательских работ по лесному хозяйству. – 1969, вып. XII.
2. Albini, F.A. A computer algorithm for sorting field data on fuel depths / F.A. Albini // USDA Forest Service Gen. Tec. Rep. INT-23, Ogden. – 1975.
3. Kourtz, P.H. A model for a Small Forest Fire ... to Simulate Burned and Burning Areas for Use in a Detection Model / P.H. Kourtz, W.G. O'Regan // Forest Science. - 1971. – V. 17, № 2.
4. Lindermuth, A.W / A. W. Lindermuth, J. R. Davis // Predicting Fire Spread in Arizona's Oak Chapparal. USDA Forest Service, Res. Paper RM-101. – Fort Collins. - 1973.
5. Stevenson, A.E. Simulation of Southern California forest fires / A.E. Stevenson, D. A. Shermerhorn, S. C. Miller // In'Transaction of 15-th Symp. on Combustion. Pittsburgh. - 1974.
6. Дорпер, Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров / Г.А. Дорпер // Лесная промышленность. – 1979. – 161 с.
7. Rothermel, R.C. A mathematical model for fire spread predictions in wildland fuels / R.C. Rothermel // USDA Forest Service, Res. Paper INT-115. – Ogden. – 1972.
8. Brown, I.R. Field test of a rate-of-spread model in slash fuels / I.R. Brown // USDA Forest Service, Res. Pap. INT-116. – Ogden. – 1972.
9. Fosberg, M.A. Derivation of the 1 – and 10 – hour Timelag Fuel Moisture Calculation for Fire / M. A. Fosberg, J. E. Deeming // Danger Rating. USDA Forest Service, Res. Not RM-207. - Fort Collins. – 1971.
10. Fosberg, M.A. Fine herbaceous fuels in fire / M.A. Fosberg, M.I. Schroeder // Danger Rating. USDA Forest Service, Res. Not RM-185. - Fort Collins. – 1971.
11. Frandsen, W.H. Using the Effective Heating Numbers as a Weighting Factor in Rothermel's Fire Spread Model / W.H. Frandsen // USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. INT-10. – Ogden. - 1973.
12. Вонский, С.М. Определение природной пожарной опасности в лесу/ С. М. Вонский [и др.] // ЛенНИИЛХ. – Ленинград, 1975.