

11 Программа и методика биогеоценотических исследований / Под ред. Дылиса Н.В. – М.: Наука, 1974. – 403 с.

12 РД РБ 02080.023-2005 «Практические рекомендации по диагностике послепожарного состояния насаждений основных лесообразующих пород и ведению в них хозяйства».

13 Мусин, М.З. Определение отпада деревьев до и после пожара и метод повышения пожароустойчивости древостоев в борах Казахского мелкосопочника / М.З. Мусин // Горение и пожары в лесу. – Красноярск. – 1973. – С. 278-300.

14 Усеня, В.В. Лесная пирология / В.В. Усеня, Е.Н. Каткова, С.В. Ульдинович // Учебное пособие для студентов высших учебных заведений по специальности «Лесное хозяйство» / МЛХ РБ, ГГУ им. Ф. Скорины; Институт леса НАН Беларуси. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2011 – 264 с.

15 Цветков, П.А. Пирофитность лиственницы Гмелина с позиций жизненных стратегий / П.А. Цветков // Экология. – 2004. - № 4. – С. 259-265.

#### VITALITY OF TREE SPECIES IN SURFACE FIRE-DISTURBED STANDS

Gordei N.V., Churilo Ye.V., Navojchik A.L.

*This paper centers on the factors that determine resistance of tree species to pyrogenic exposure. The authors have studied the degree of fire-induced damage and heat resistance of forest trees depending on the height of the portion of the stem affected by fire, stem diameter and thickness of the bark.*

Статья поступила в редколлегию 06.04.2012 г.



УДК 630\*432

### ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ОТЖИГОМ

Гусев В.Г.<sup>1</sup>, Усеня В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГБУ «Санкт-Петербургский НИИ лесного хозяйства»  
(г. Санкт-Петербург, Россия)

<sup>2</sup>ГНУ «Институт леса НАН Беларуси»  
(г. Гомель, Беларусь)

*В статье на основании математических моделей выполнен расчет основных технологических параметров тушения различного вида и интенсивности лесных пожаров методом отжига. Дана оценка скорости фронта низового и верхового пожаров в зависимости от наиболее значимых параметров ее распространения. Приведены расчеты*

*минимального расстояния от опорной полосы до фронтальной кромки пожара и необходимого времени для отжига в различных лесорастительных условиях, обеспечивающих успешную локализацию пожара.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Лесные пожары в экстремальные пожароопасные сезоны причиняют существенный материальный и экологический ущерб на территории России, Беларуси, США, Австралии, ряда стран Европы и других государств [1].

Тушение лесных пожаров отжигом на протяжении длительного времени применялось в лесах России, особенно при ликвидации верховых, средней и сильной интенсивности низовых пожаров. Отжиг зарекомендовал себя как очень эффективный способ, позволяющий останавливать распространение пожаров небольшими по численности силами и средствами пожаротушения [2, 3].

Отжиг (встречный огонь) представляет собой заблаговременный пуск огня по напочвенному покрову от противопожарного барьера (опорной полосы) навстречу кромке низового или верхового пожара с целью создания перед его фронтом выжженной полосы напочвенных лесных горючих материалов достаточной ширины, обеспечивающей остановку огня.

При сильном ветре возможен перенос горящих растительных частиц от фронта низового пожара на расстояние 15-20 м, а при верховом пожаре – на сотни метров. Поэтому, если на пути фронтальной кромки пожара не имеется достаточно широкого естественного или искусственного противопожарного барьера, а его быстрое создание невозможно или требует большого количества сил и средств, то для остановки пожара применяется отжиг. При этом самым важным вопросом является на каком минимальном расстоянии от опорной полосы до кромки пожара пуск отжига обеспечит остановку огня.

Практика борьбы с лесными низовыми пожарами показывает, что для остановки низового пожара слабой интенсивности ширина выжженной полосы должна быть не менее 5 м, средней и сильной интенсивности, соответственно, не менее 15 и 20 м. В тоже время пожары, распространяющиеся со скоростью 15-20 м/мин. преодолевали заградительные полосы шириной до 60м. Расстояние от фронтальной кромки пожара до опорной полосы в момент пуска отжига зависит от вида и интенсивности пожара, скорости распространения фронтальной кромки пожара, которые определяются запасом и состоянием лесного горючего материала, и скорости ветра. В связи с этим, при пуске отжига для остановки фронта различного вида и интенсивности пожара необходимо установление минимального расстояния от него до опорной полосы, обеспечивающее успешную локализацию пожара.

#### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для оценочных расчётов скорости фронта низового пожара можно использовать упрощённую математическую модель, полученную путём аппроксимации методом наименьших квадратов результатов расчётов по мо-

дифицированной модели Ротермела [4, 6]. В данной модели скорость фронта низового пожара для равнинной местности аппроксимирована экспонентой, зависящей от двух наиболее значимых параметров: скорости ветра под пологом леса и влагосодержания проводников горения в напочвенном покрове.

$$V = \exp(a_1 + a_2 U + a_3 M + a_4 U^2 + a_5 M^2 + a_6 U M), \quad (1)$$

где

$V$  – скорость фронта низового пожара, м/мин,

$U$  – скорость ветра под пологом древостоя на высоте 2 м, м/с;

$M$  – влагосодержание проводников горения в напочвенном покрове, кг/кг;

$a_1, a_2, \dots, a_6$  – коэффициенты, постоянные для данного вида напочвенного покрова (таблица 1).

Таблица 1 – Значения постоянных коэффициентов

Коэффициент	Основной проводник горения		
	лишайник, растительный опад	зеленый мох	отмершая трава
$a_1$	-0,3939	-0,2519	0,5891
$a_2$	1,046	1,284	1,398
$a_3$	-2,658	-2,658	-6,215
$a_4$	-0,06164	-0,09284	-0,1580
$a_5$	-4,795	-4,795	5,735
$a_6$	-0,035	-0,04444	0,01023

Коэффициенты, приведенные для лишайника, можно использовать при прогнозе скорости фронта низового пожара в сосняках лишайниковых, лишайниково-вересковых, лишайниково-мшистых и рыхлоопадных. При этом влагосодержание напочвенного покрова может изменяться в пределах от 0,09 до 0,41 кг/кг.

Коэффициенты, соответствующие зелёному мху, рекомендуются для прогноза в сосняках мшистых, брусничных, чернично-брусничных, черничных, багульниковых осушенных и для ельников черничных. В данных лесорастительных условиях влагосодержание напочвенного покрова составляет 0,10 – 0,43 кг/кг.

Коэффициенты для отмершего травяного покрова используются при прогнозных оценках скорости фронта низового пожара в древостоях и на вырубках сосняков, ельников, березняков и осинников с травяным напочвенным покровом в весенний или осенний период. Величина влагосодержания напочвенного покрова может изменяться в диапазоне от 0,09 до 0,40 кг/кг.

В.Г. Нестеров, М.В. Гриценко, Т.А. Шабунина [7] для оценки среднего влагосодержания некоторых видов лесных напочвенных покровов по значе-

нию комплексного показателя В.Г. Нестерова предложили гиперболическую функцию вида:

$$m = a/\Gamma + \epsilon, \quad (2)$$

где

$m$  – влагосодержание напочвенного покрова,

$a, \epsilon$  – эмпирические коэффициенты,

$\Gamma$  – комплексный метеорологический показатель.

Значения эмпирических коэффициентов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Эмпирические коэффициенты для различных видов напочвенных проводников горения

Вид проводника горения	$a$	$\epsilon$
Опавшая хвоя, отмершая трава	174,76	0,06
Лишайники	270,68	0,07
Зелёные мхи	636,21	0,08

Для более точной оценки среднего влагосодержания различных видов лесных горючих материалов можно использовать показатель влажности лесного напочвенного покрова ПВ-1 [8-9].

Данный показатель позволяет прогнозировать влагосодержание основного проводника горения (ОПГ) в лесном напочвенном покрове. Зависимость влагосодержания ОПГ в слое лесного напочвенного покрова от величины показателя ПВ-1 представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Влагосодержание основных проводников горения в зависимости от значения показателя ПВ-1 [9]

Значение показателя ПВ-1	Влажность, кг воды / кг сырого вещества					
	тип основного проводника горения					
	лишайники, отмершая трава		зеленые мхи			
			на дренированных почвах		на слабо дренированных суглинистых почвах	
	верхний слой	весь слой	верхний слой	весь слой	верхний слой	весь слой
1	2	3	4	5	6	7
200	0,41	-	-	-	-	-
300	0,28	-	-	-	-	-
400	0,20	0,43	-	-	-	-
500	0,18	0,29	-	-	-	-
600	0,16	0,24	0,43	-	-	-
700	0,16	0,20	0,33	-	-	-
800	0,15	0,18	0,27	-	-	-
900	0,14	0,16	0,24	-	-	-
1000	0,14	0,16	0,22	0,43	-	-
1100	0,14	0,16	0,21	0,35	0,37	-

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
1200	0,13	0,15	0,20	0,32	0,32	0,43
1300	0,12	0,15	0,19	0,29	0,27	0,41
1400	0,12	0,14	0,18	0,27	0,25	0,39
1500	0,12	0,14	0,18	0,26	0,23	0,37
1600	0,12	0,13	0,17	0,25	0,21	0,35
1700	0,11	0,13	0,16	0,23	0,20	0,33
1800	0,11	0,13	0,15	0,23	0,20	0,32
1900	0,11	0,12	0,15	0,22	0,19	0,31
2000	0,10	0,12	0,14	0,20	0,19	0,28
2100	0,10	0,12	0,13	0,20	0,18	0,27
2200	0,10	0,11	0,12	0,19	0,18	0,26
2300	0,10	0,11	0,12	0,18	0,18	0,25
2400	0,10	0,11	0,11	0,17	0,18	0,24
2500	0,10	0,11	0,10	0,16	0,18	0,23
2600	0,09	0,11	0,10	0,15	0,17	0,22

Скорость ветра под пологом древостоя ( $U$ ) рекомендуется оценивать по следующим формулам [10-11]:

$$U_2 = U_1 \lg(z_2/z_1) / \lg(z_1/z_{01}); \quad (3)$$

$$Z_3 = H + 6; \quad (4)$$

$$Z_{03} = 0,13 H; \quad (5)$$

$$U_3 = U_2 \lg(z_3/z_{03}) / \lg(z_2/z_{03}); \quad (6)$$

$$U_4 = \frac{0,31 \cdot U_3}{\sqrt{f \cdot H \cdot \ln \frac{20+1,18H}{0,43H}}}; \quad (7)$$

$$U = K_2 U_4, \quad (8)$$

где

$U_2$  – скорость геострофического ветра на высоте  $Z_2=1000$  м, м/с;

$U_1$  – скорость ветра на открытом месте, измеренная на стандартной высоте  $Z_1 = 10$  м, м/с;

$Z_{01}$  – шероховатость подстилающей поверхности на метеостанции (для травы высотой 2-30 см величина  $Z_{01} = 0,01$  м), м;

$Z_3$  – критическая высота, начиная с которой скорость ветра подчиняется логарифмическому закону, м;

$H$  – высота древостоя, м;

$Z_{03}$  – шероховатость лесного массива, м;

$U_3$  – скорость ветра над пологом древостоя на высоте  $Z_3$ , м/с;

$U_4$  – скорость ветра в пологе древостоя, м/с;

$f$  – доля объема вещества крон в единице объема полога (таблица 4);

$K_2$  – эмпирический коэффициент ( $K_2 = 1,1$ ).

Таблица 4 – Доля объема вещества крон в единице объема полога ( $f$ )

Насаждения	Теньвыносливые		Светлолюбивые	
	молодняки и средневозрастные	спелые и перестойные	молодняки и средневозрастные	спелые и перестойные
Высокополнотные	0,32	0,24	0,16	0,08
Средне- и низкополнотные	0,09	0,07	0,07	0,05

В том случае, если необходимо оценить интенсивность не фронтальной кромки пожара, а кромки, распространяющейся в другом направлении, то используется радиальная скорость  $V_r$ , которая определяется с помощью эмпирической формулы:

$$V_r = V_{\text{exp}} [A(\cos^2 \alpha/2 - 1)], \text{ м/мин}, \quad (9)$$

$$\text{где } A = \begin{cases} 0,113 + 0,376U, & U \leq 11 \text{ м/с} \\ 1,125 + 0,284U, & 11 \text{ м/с} < U < 16 \text{ м/с} \end{cases} \quad (10)$$

$A$  – эмпирический коэффициент, учитывающий изменение формы очага горения в зависимости от скорости ветра;

$\alpha$  – угол между рассматриваемым направлением распространения кромки пожара и направлением ветра;

В частности, скорость фланговой кромки  $V_{\text{фл}}$  низового пожара определяется из (9) при  $\alpha=\pi/2$ , т.е.

$$V_{\text{фл}} = V_{\text{exp}} (-0,5A), \text{ м/мин} \quad (11)$$

Аналогично скорость тыловой кромки  $V_T$  определяется из (8), при  $\alpha=\pi$  и расчётная формула принимает вид:

$$V_T = V_{\text{exp}}(-A), \text{ м/мин} \quad (12)$$

При отжиге навстречу фронту низового пожара его скорость будет равна скорости тыловой кромки пожара ( $V_T$ ). Надёжная остановка огня достигается в том случае, когда ширина выжженной полосы перед фронтом низового пожара слабой интенсивности составит 5 м, средней интенсивности – 15 м и сильной интенсивности – 20 м.

Необходимое время (мин.) для отжига вышеуказанной ширины полос соответственно составит:  $t_1 = 5 \text{ м}/V_T$ ;  $t_2 = 15 \text{ м}/V_T$ ;  $t_3 = 20 \text{ м}/V_T$ .

При пуске отжига требуется учитывать, что минимальное расстояние должно быть обеспечено в момент начала движения кромки отжига по всей её длине. Нормативную скорость пуска отжига с помощью зажигательного аппарата ( $V_o$ ) можно принять равной 1 км/ч (16,67 м/мин) [11]. Время необходимое для пуска отжига ( $t_o$ ) зависит от требуемой длины кромки отжига ( $S, м$ ) и количества участников пожаротушения с зажигательными аппаратами ( $k$ ).

Таким образом:

$$t_o = S/(kV_o) = S/(k \cdot 16,67), \text{ мин} \quad (13)$$

В этом случае минимальное расстояние ( $L, м$ ) от опорной полосы до фронтальной кромки низового пожара при пуске отжига для пожаров слабой, средней и сильной интенсивности соответственно составит:

$$L_1 = (V + V_T)(t_1 + t_o), \quad L_2 = (V + V_T)(t_2 + t_o), \quad L_3 = (V + V_T)(t_3 + t_o), \quad (14)$$

Учитывая равенство (12), получим:

$$L_1 = (V + V_T)(t_1 + t_o) = (V + V \exp(-A))(t_1 + t_o) = V(t_1 + t_o)(1 + \exp(-A)); \quad (15)$$

Аналогично:

$$L_2 = V(t_2 + t_o)(1 + \exp(-A)); \quad (16)$$

$$L_3 = V(t_3 + t_o)(1 + \exp(-A)) \quad (17)$$

Для остановки фланговой кромки низового пожара, с учетом того, что в этом направлении не должно быть переноса горящих частиц, минимальную ширину выжженной полосы можно принять равной 5 м при низовых пожарах различной интенсивности. Тогда:

$$t_{\phi_1} = 5 м / V_{\phi_1} \quad (18)$$

$$L_{\phi_1} = 2V_{\phi_1}(t_{\phi_1} + t_o) = 2(t_{\phi_1} + t_o)V \exp(-0,5A) \quad (19)$$

Остановка тыловой кромки обычно не требует пуска отжига, но если её необходимо остановить этим способом, то достаточно выжженной заградительной полосы шириной 1 м. При этом

$$t_T = 1 м / V \quad (20)$$

$$L_T = (V + V_T)(t_T + t_o) = (V + V \exp(-A))(t_T + t_o) = V(t_T + t_o)(1 + \exp(-A)) \quad (21)$$

Для оценки максимальной скорости фронта распространения устойчивого верхового пожара можно использовать графики её зависимости от индекса

распространения пожара  $ISI$  из национальной системы Канады по оценке и прогнозированию показателей пожарной опасности в лесу. Этот индекс можно определить по следующим формулам:

$$ISI = 0,208 \cdot f(U) \cdot f(m), \quad (22)$$

где  $f(U)$  – функция ветра, определяемая равенством:

$$f(U) = e^{0,05039U} \quad (23)$$

$f(m)$  – функция влажности верхнего слоя напочвенного покрова, определяемая по формуле:

$$f(m) = 91,9 e^{-0,1386m} [1 + m^{5,31} / (4,93 \cdot 10^7)] \quad (24)$$

Скорость фронта верхового пожара в зависимости от индекса  $ISI$  и высоты древостоя может быть рассчитана с помощью графиков (рис.1-2) [13]. Для оценки скорости продвижения тыловой кромки пожара можно использовать формулу (12).

$V, м/мин$

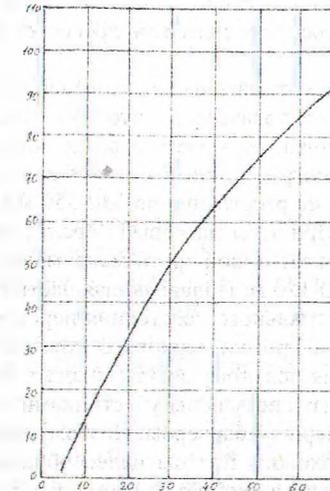


Рисунок 1 – Зависимость скорости лесного пожара от величины индекса  $ISI$  в сосняках с высотой древостоя до 10 м.

V, м/мин

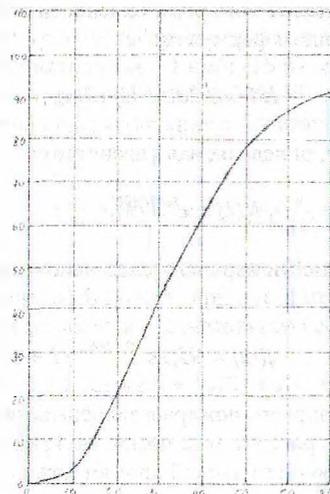


Рисунок 2 – Зависимость скорости лесного пожара от величины индекса ISI в сосняках с высотой древостоя более 10 м.

Расчёты с помощью математических моделей и результаты наблюдений при верховых пожарах показывают, что при сильном ветре отдельные горящие (тлеющие) частицы, отрывающиеся восходящими потоками газов в зоне верхового пожара, могут подниматься конвекционной колонкой и затем переноситься ветром на расстояния до 330-350 м (при отсутствии крупномасштабных вихрей). При этом массовый перенос горящих растительных частиц обычно не превышает одной трети максимального расстояния переноса, то есть не более 110-120 м. Подавляющая часть горящих частиц выпадает в пределах 2/3 максимального расстояния переноса, т.е. на расстоянии до 220 м от фронтальной кромки верхового пожара. На последней трети максимального расстояния переноса могут выпадать только единичные частицы, которые должны быть потушены участниками пожаротушения, находящимися за противопожарным барьером. Поэтому ширину выжженной полосы перед фронтом верхового пожара целесообразно устроить не менее 220 м, которую кромка отжига пройдёт за время  $t_0 = 220/V_r$ , мин.

Таким образом, при пуске отжига для остановки фронта верхового пожара минимальное расстояние от него до опорной полосы ( $L_0$ ) составит:

$$L_0 = (V + V_r)(t_0 + t_0) = V(t_0 + t_0)(1 + \exp(-A)), \text{ м} \quad (24)$$

Необходимо отметить, что представленный метод оценки не учитывает способы ускорения огня отжига (гребёнка, пятнистое поджигание, опежающий огонь, ступенчатый отжиг), которые применяются при наличии широкой опорной полосы или нескольких опорных полос и не очень сильным ветре. Данные способы отжига позволяют сократить минимальные расстояния, рассчитанные предложенным методом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тушение лесных низовых средней и сильной интенсивности и верховых пожаров отжигом является эффективным способом, позволяющим обеспечить остановку распространения пожаров небольшими по численности силами и средствами пожаротушения. Расстояние от фронтальной кромки пожара до противопожарного барьера (опорной полосы) в момент пуска отжига зависит от вида и интенсивности пожара, скорости распространения фронтальной кромки пожара, которые определяются запасом и состоянием лесного горючего материала, и скоростью ветра.

Выполненный на основании математических моделей расчёт основных технологических параметров тушения пожаров методом отжига позволил оценить скорости их фронта в зависимости от наиболее значимых параметров ее распространения.

Для различных лесорастительных условий определены минимальное расстояние от опорной полосы до фронтальной кромки низового и верхового пожара и необходимое время для отжига, обеспечивающие успешную локализацию пожара.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Усень, В.В. Лесная пирология / В.В. Усень, Е.Н. Каткова, С. В. Ульдинович: – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2011. – 264 с.
- 2 Курбатский, Н.П. Локализация сильных лесных низовых пожаров встречным огнём / Н.П. Курбатский, Лесное хозяйство, №3, 1959. – С.52-55.
- 3 Рекомендации по обнаружению и тушению лесных пожаров // Сборник организационно-распорядительных документов по охране лесов от пожаров. – М.: ФСЛХ России, 1997. – С. 27-113.
- 4 Rothermel, R.C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels: USDA Forest service research paper INT-115. – Ogden, Utah, 1972. – 40 p.
- 5 Гусев, В.Г. Упрощённая методика расчёта скорости распространения лесного низового пожара / В.Г. Гусев // Тр. СПбНИИЛХ. – СПб., 2001. – Вып.4(8). – С.208-217.
- 6 Гусев, В.Г. Физико-математические модели распространения пожаров и противопожарные барьеры в сосновых лесах / В.Г. Гусев, – СПб.: «Хромис», 2005. – 199 с.
- 7 Нестеров, В.Г. Использование температуры точки росы при расчёте

показателя горимости леса / В.Г. Нестеров, М.В. Гриценко, Т.А. Шабунина // Метеорология и гидрология-1968.-№9. – С.102-104.

8 Вонский, С.М. Определение природной пожарной опасности в лесу (методические рекомендации) / С.М. Вонский, В.А. Жданко, В.И. Корбут и др. Л., ЛенНИИЛХ, 1975. – 38 с.

9 Вонский, С.М., Определение природной пожарной опасности в лесу: Методические рекомендации / С.М. Вонский, В.А. Жданко, В.И. Корбут и др. - Л.: ЛенНИИЛХ, 1981. – 52 с.

10 Albini, F.A. Estimating wind speeds for predicting wildland fire behavior F.A. Albini, R.G. Baughman // USDA Forest Service Research Paper INT-221. – Ogden - Utah, 1979. – 89 p.

11 Гусев, В.Г. О методе расчёта скорости распространения лесного низового пожара / В.Г. Гусев, И.Ю. Корчунова // Лесные пожары и борьба с ними: Сб. науч. тр. - Л.: ЛенНИИЛХ, 1985. – С. 31-50.

12 Alexander, M.E., Lawson B.D., Stocks B.J., Van Wagner C.E. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System / M.E. Alexander, B.D. Lawson, B.J. Stocks, C.E. Van Wagner Science and Sustainable Development Directorate. Inf. Rep. ST-X. - Ottawa, 1992. – 62 p.

13 Van Wagner, C.E. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System / C.E. Van Wagner, -Forestry Technical Report 35, Canada, Ottawa, 1987. – 37p.

#### KEY TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF FOREST FIRE EXTINCTION BY COUNTER FIRES

*Gusev V.G.<sup>1</sup>, Usenia V.V.<sup>2</sup>*

*Based on mathematical models, the authors computed the key technological parameters of extinction of forest fires of different severity by counter fires and computed the rate of surface and crown fire fronts depending on the most important parameters of fire propagation. Also, the authors calculated the minimum distance between the control burning-out strip and the forest fire frontal border and the time it takes for this measure to be used on different sites to successfully bring the fire under control.*

Статья поступила в редколлегию 06.04.2012 г.

