

звеньями в рядах; для елово-дубовых культур, вероятно, целесообразно чередование ряда ели с двумя рядами дуба.

Высокая производительность сосново-еловых и елово-широколиственных насаждений в подзоне широколиственных лесов (400...500, а в ряде случаев 700...800 м³/га) дает основание считать, что работы по искусственному лесовосстановлению в этой подзоне должны производиться на качественно новой основе.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Гроздов Б. В. Типы леса Брянской, Смоленской и Калужской областей.— Брянск, 1950.— 55 с. [2]. Коновалов Н. А. Очерк типов хвойно-широколиственных лесов в Брянском лесном массиве // Тр. Ленингр. общ-ва естествоиспытателей.— 1936.— Т. 65, вып. 3.— С. 372—401. [3]. Кретов Е. С., Богинский Н. И. Особенности морфогенеза культур ели в зависимости от вида и возраста посадочного материала // Лесная геоботаника и биология древесных растений.— Брянск: Приокское кн. изд-во, Брянск, отд-ние, 1974.— Вып. 2.— С. 58—65. [4]. Курнаев С. Ф. Лесорастительное районирование СССР.— М.: Наука, 1973.— 355 с. [5]. Морозов Г. Ф. Учение о типах насаждений.— М.: Сельхозгиз, 1930.— 421 с. [6]. Обновленский В. М. Повышение продуктивности лесных площадей Брянской и смежных областей методами лесных культур // Пути повышения продуктивности лесного хозяйства.— Брянск, 1961.— С. 44—59. [7]. Помогаева В. А. Особенности роста сосны в чистых и смешанных культурах в сложных суббоях учебно-опытного лесхоза БТИ // Матер. науч.-практ. конф. «Организация многоцелевого хозяйства и рационального лесопользования в бассейне р. Десны».— Брянск, 1985.— С. 84—85. [8]. Родин А. Р. Культуры ели на вырубках.— М.: Лесн. пром-сть, 1977.— 168 с. [9]. Родин А. Р. Теоретические и практические аспекты повышения эффективности и качества искусственного лесовозобновления // Лесн. хоз-во.— 1986.— № 1.— С. 32—37. [10]. Рубцов М. В., Мерзленко М. Д. Лесные культуры К. Ф. Тюрмера: Экспресс-инф. Сер. «Лесные культуры, защитное лесоразведение и лесомелиорация».— М.: ЦБНТИлесхоз, 1975.— Вып. 14.— 41 с. [11]. Смирнов С. П. Создание культур сосны и ели на вырубках подзоны южной тайги с временно переувлажненными почвами // Выращивание сосны и ели в культурах.— Пушкино: ВНИИЛМ, 1975.— С. 17—30. [12]. Тарасенко В. П. Опыт восстановления елово-широколиственных насаждений Брянского опытного лесничества // Реф.-тез. сб. науч.-техн. конф. по результатам исследовательских работ за 1956 г.— Брянск: БЛХИ, 1957.— Вып. 2.— С. 34—36.

Поступила 2 октября 1986 г.

УДК 630*432.31

К РАСЧЕТУ СИЛ И СРЕДСТВ НА ОСТАНОВКУ ЛЕСНОГО ПОЖАРА

Э. В. КОНЕВ

ВНИИХлесхоз

Для остановки и локализации лесных пожаров привлекаются значительные трудовые, материальные и финансовые ресурсы. К настоящему времени разработан ряд методик расчета сил и средств на эти цели ([1, 4—6] и др.). Однако контур пожара принимается при этом замкнутым, что не всегда имеет место (например, при крупных лесных пожарах). К тому же в одних методиках не учтено изменение длины кромки пожара в ходе тушения, в других — влияние интенсивности горения на скорость остановки пожара.

Цель нашего исследования — разработать алгоритм, свободный от этих недостатков.

Постановка задачи. Длина горящей кромки лесного пожара L в ходе его остановки изменяется по двум причинам: а) увеличение периметра пожара со скоростью V вследствие естественного распространения огня по лесному покрову; б) уменьшение длины горящей кромки пожара со скоростью остановки V_0 в результате борьбы с огнем. Поскольку по второй причине одновременно растет длина остановленной

кромки L_0 , то процесс остановки лесного пожара может быть описан следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dL}{d\tau} = V - V_0 \quad (1)$$

при начальном условии $L(0) = L_{н}$;

$$\frac{dL_0}{d\tau} = V_0 \quad (2)$$

при начальном условии $L_0(0) = 0$.

Очевидно, что число людей (механизмов), необходимых для остановки и локализации лесного пожара, при прочих равных условиях должно быть пропорционально длине остановленной кромки. Расчет последней, как функции времени остановки τ_0 , начальной длины кромки пожара $L_{н}$ и скорости роста длины контура $V_{н}$, сводится к решению уравнений (1), (2) при условии, что длина горящей кромки пожара в момент окончания остановки $\tau = \tau_0$ обращается в нуль, т. е. что $L(\tau_0) = 0$.

Решение уравнений. Контур лесного пожара с заданной степенью точности всегда можно представить в виде i дуг окружностей радиуса R_i . В этом случае огонь продвигается вдоль радиуса, при заданном отношении $\alpha_i = \frac{L_i}{2\pi R_i}$. Соответственно ее длина должна быть пропорциональна радиусу (в случае развитого пожара он изменяется с постоянной скоростью u_i) и описываться соотношением

$$L_i = \alpha_i 2\pi R_i = \frac{L_{нi}}{2\pi R_{нi}} [2\pi (R_{нi} + u_i \tau)], \quad (3)$$

из которого вытекает, что

$$V_i = \frac{dL_i}{d\tau} = \frac{L_{нi}}{R_{нi}} u_i = \frac{L_i u_i}{R_{нi} + u_i \tau}. \quad (4)$$

Здесь $L_{нi}$ — начальная длина дуги;

$R_{нi}$ — ее начальный радиус.

Для вогнутой дуги u_i берется со знаком минус.

В процессе остановки длина горящей кромки L_i изменяется сильно (до нуля), в то время как ее продвижение обычно невелико и удовлетворяет соотношению $R_{нi} \gg u_i \tau_0$. Поэтому уравнение (1) с учетом (4) может быть записано как (индекс i для простоты опускаем)

$$\frac{dL}{d\tau} = \frac{Lu}{R_{н}} - V_0$$

при начальном условии $L(0) = L_{н}$.

После разделения переменных

$$\frac{dL}{(Lu/R_{н}) - V_0} = d\tau$$

оно легко интегрируется

$$\ln \left(\frac{Lu}{R_{н}} - V_0 \right) \Big|_{L_{н}}^L = \frac{u}{R_{н}} \tau \Big|_0^{\tau},$$

и при $\tau = \tau_0$ взаимосвязь между скоростью остановки пожара V_0 , временем его остановки τ_0 и параметрами отрезка кромки в момент начала остановки имеет вид:

$$V_0 = \frac{L_{н}u}{R_{н}} (1 - e^{-u\tau_0/R_{н}})^{-1}. \quad (5)$$

Поскольку из уравнения (2) при $V_0 = \text{const}$ следует, что $L_0(\tau_0) = V_0 \tau_0$, то из выражений (4), (5) при $\tau = \tau_0$ вытекает следующее соотношение для длины отрезка остановленной кромки пожара:

$$L_0(\tau_0) = V_0 \tau_0 = V_n \tau_0 (1 - e^{-V_n \tau_0 / L_n})^{-1}. \quad (6)$$

Здесь V_n — скорость увеличения длины отрезка контура пожара в момент начала его остановки.

В случае, когда τ_0 мало по сравнению со временем развития пожара $\tau_p \approx L_n / V_n$, т. е. при $\frac{\tau_0}{\tau_p} = \frac{V_n \tau_0}{L_n} \ll 1$, полученное решение после разложения экспоненты в ряд и простых преобразований может быть представлено также как:

$$L_0(\tau_0) = L_n + \frac{1}{2} V_n \tau_0 - \frac{1}{6} V_n^2 \tau_0^2 / L_n + \dots \quad (7)$$

В таком виде оно показывает, что для отрезка в форме дуги окружности длина остановленной кромки $L_0(\tau_0)$ может быть принята примерно равной полусумме длин дуг свободно распространяющегося пожара в моменты $\tau = 0$ и $\tau = \tau_0$:

$$L_0(\tau_0) \approx L_n + \frac{1}{2} V_n \tau_0 = \frac{L_n + L(\tau_0)}{2}, \quad (8)$$

а для прямолинейного отрезка ($R_n = \infty$) — его первоначальной длине

$$L_0(\tau_0) = L_n. \quad (9)$$

Очевидно, что общая длина кромки остановленного пожара может быть найдена затем сложением длин составляющих ее отрезков.

Расчет сил и средств для отрезка контура. На практике часто необходимо остановить часть замкнутого контура или отдельно функционирующую кромку пожара. В этом случае число людей или механизмов для остановки и локализации нетрудно рассчитать при известной длине остановленной кромки как

$$n = \frac{L_0(\tau_0)}{L_1} = \frac{V_0 \tau_0}{V_{01} \tau_0} = \frac{V_0}{V_{01}}. \quad (10)$$

Здесь индексом «1» обозначена длина остановленной кромки L_1 , км или скорость остановки (локализации) пожара V_{01} , км/ч в расчете на одного человека, звено или механизм. Численность звеньев (бригад в случае применения механизмов) и производительность их труда регламентируются действующими нормативами [6].

Указанные нормативы даны для усредненных условий и поэтому могут быть использованы без поправок лишь при косвенных способах остановки пожара, основанных на создании негорючих преград на его пути. При прямом тушении кромки пожара необходимо учитывать дополнительно, что расход агентов должен возрастать, а скорость остановки соответственно убывать в первом приближении пропорционально интенсивности кромки пожара I [2]:

$$\frac{V_{01}}{V_{01}} = \frac{\bar{I}}{I} = \frac{Q \bar{u} \bar{M}}{Q u M},$$

откуда

$$V_{01} = \bar{V}_{01} \frac{\bar{u} \bar{M}}{u M}. \quad (11)$$

Здесь M — запас сгорающих лесных горючих материалов (ЛГМ);
 Q — тепловой эффект их сгорания.

Чертой обозначены значения факторов при стандартизованных, т. е. наиболее удобных для контроля, условиях — штиль, нулевой угол склона, средний класс пожарной опасности, среднестатистические значения параметров ЛГМ.

Примерные значения скорости остановки \bar{V}_{01} и затрат времени на остановку 1 км кромки пожара $\tau_1 = \bar{V}_{01}^{-1}$ для различных способов остановки лесного пожара приведены в табл. 1. Они рассчитаны по данным [6] для усредненных условий с учетом того, что некоторое завышение затрат времени по сравнению со стандартизованными условиями практически полностью компенсируется падением производительности труда по мере остановки пожара. При этом данные для косвенных способов остановки могут быть использованы также для расчетов сил и средств на локализацию лесных пожаров.

Таблица 1

Способы остановки пожара	Звено, чел.	L_0 , м	τ_0 , мин	\bar{V}_1 , ч · звено/км	\bar{V}_{01} , км/(ч × звено)
Прямые					
Захлестывание огня	1	25	4—5	3,0	0,33
Засыпка кромки пожара грунтом	1	10	19,5	32,5	0,03
Тушение кромки пожара химикатом с помощью ранцевой аппаратуры	1	100	3—5	0,7	1,4
Заливка огня водой с помощью мотонасосов	6	100	10	1,7	0,6
Косвенные					
Удаление напочвенного покрова и подстилки граблями	1	100	75	12,5	0,08
Прокладка канавки лопатой	1	100	200	33,3	0,03
Прокладка минерализованных полос:					
тракторным плугом	3	100	2,5—5	0,6	1,7
бульдозером	2	100	12—15	2,25	0,45
шнуровым зарядом	4	100	3—4	0,6	1,7
Создание негорючих химполос с помощью ранцевых опрыскивателей	1	100	8—10	1,5	0,7
Отжиг с помощью зажигательных аппаратов	2	100	2—4	0,5	2,0

Для косвенных способов остановки и локализации соотношение (10) с использованием (8) может быть переписано как

$$n = \frac{L_0(\tau_0)\bar{u}}{\bar{V}_{01}\tau_0\bar{u}} \approx K \left(L_n + \frac{1}{2} V_n \tau_0 \right) \bar{u}, \quad (12)$$

а при непосредственном тушении кромки пожара может быть преобразовано с помощью формул (8), (11) к виду

$$n = \frac{V_0 u M}{\bar{V}_{01} u \bar{M}} = V_0 \tau_0 \frac{u M}{\bar{V}_{01} u \bar{M} \tau_0} \approx K \left(L_n + \frac{1}{2} V_n \tau_0 \right) u (M/\bar{M}), \quad (13)$$

где $K = (\bar{V}_{01} \tau_0)^{-1}$ — коэффициент эффективности принятого способа остановки, звено/[км(м/мин)].

Полученные выражения могут быть использованы для расчета сил и средств на остановку или локализацию пожара, если задано время остановки τ_0 или локализации τ_n . Они могут быть использованы также для расчета времени прямой остановки пожара

$$\tau_0 = L_n \int \left(\frac{n \bar{M} \bar{V}_{01}}{u M} - \frac{1}{2} V_n \right)$$

или времени его косвенной остановки и локализации

$$\tau_o = \tau_n = \frac{L_o(\tau_o)}{n \bar{V}_{oi}},$$

если заданы силы и средства. Значения V_n , км/ч и L_n , км при этом могут быть определены с помощью соотношений (4), (1) как

$$V_n = 0,06 \frac{L_n}{R_n} u \gamma = \beta \gamma \pi u / 3000 \approx 1,1 \beta \gamma u / 1000; \quad (14)$$

$$L_n = L_{об} + V_n \tau_n, \quad (15)$$

где γ — отношение длины реальной кромки пожара к длине заменяющей ее дуги;
 β — угол сектора дуги окружности, град;
 $L_{об}$ — длина отрезка контура в момент его обнаружения;
 τ_n — время доставки людей и техники на пожар.

Параметры γ , \bar{u} , \bar{M} , \bar{M} должны определяться эмпирически. Для ряда ЛГМ значения \bar{u} и \bar{M} даны в работе [3]. Там же приведены полуэмпирические формулы для определения скорости продвижения пожара u .

Таблица 2

$\frac{\Delta L}{L_n} = \frac{V_n \tau_o}{L_n}$	$\frac{n}{n_n} = \frac{\tau_o}{\tau_{он}} = \frac{L_o(\tau_o)}{L_n}$	
	согласно формуле (6)	согласно формуле (8)
0,0	1,0	1,0
0,1	1,05	1,05
0,2	1,10	1,10
0,4	1,21	1,20
0,6	1,33	1,30
0,8	1,45	1,40
1,0	1,58	1,50

В табл. 2 приведены результаты расчетов с помощью соотношений (6) и (8) относительного увеличения n при заданном τ_o или τ_o при заданном n по сравнению с их значениями n_n и $\tau_{он}$ при остановке отрезка контура первоначальной длины L_n как функции отношения $\frac{\Delta L}{L_n} = \frac{L - L_n}{L_n}$. При расчетах учтено, что в соответствии с приведенными выше соотношениями значения n при заданном τ_o и τ_o при заданном n возрастают пропорционально длине остановленной кромки пожара.

Как следует из данных табл. 2, действительное время остановки пожара может значительно превышать рассчитанное по начальному контуру, а погрешность расчетов при использовании приближенной формулы (8) составляет менее 5 % вплоть до значений $\frac{\Delta L}{L_n} = 1$.

Расчет сил и средств для контура пожара. При определении сил и средств на остановку всего лесного пожара необходимо учитывать, что интенсивность горения вдоль его контура, как правило, переменна и что часто он состоит из отдельно функционирующих частей. Поэтому необходимо сначала разбить начальный контур на отдельные одинаковые по условиям горения отрезки, выполнить для каждого из них расчеты согласно предыдущему разделу, а затем просуммировать полученные данные.

В случае замкнутого контура простой гладкой формы для оценочных расчетов часто достаточно подразделить контур на фронт, фланги и тыл при помощи абриса или аэроснимка пожара. При этом можно воспользоваться рядом правил и придержек.

При выделении тактических частей пожара можно использовать угол φ между направлением ветра и перпендикуляром к касательной контура, приняв, что для фронта пожара $\varphi \leq 60^\circ$, а для тыла — $\varphi \geq 100^\circ$. Первое значение соответствует точке, в которой скорость продвижения пожара равна средней арифметической скорости движения фронта и

фланга, а второе — точке, начиная с которой скорость продвижения огня становится постоянной.

Для определения характерных углов на абрисе удобно использовать транспортир. Его центр необходимо вести вдоль линии контура, а нулевую линию устанавливать перпендикулярно. С помощью циркуля нетрудно часть контура на абрисе заменить окружностью. Меняя его шаг, необходимо выбрать центр окружности таким образом, чтобы отклонения контура пожара вверх и вниз от искомой дуги были примерно одинаковы.

Для определения угла β достаточно найденный центр соединить прямыми линиями с крайними точками дуги и измерить угол между ними. Зная его, нетрудно вычислить затем V_n по формуле (14) и длину остановленной кромки по формуле (8). Значение коэффициента γ легко определить с помощью курвиметра как отношение длины кромки пожара к длине заменившей ее дуги окружности.

В случае контура сложной формы для расчета сил и средств на остановку пожара также может быть использован описанный алгоритм. При этом контур пожара необходимо разбивать на большее число отрезков, а для вычислений целесообразно применять ЭВМ, оснащенные устройствами и матобеспечением для обработки графической информации.

Таким образом, формулировка дифференциальных уравнений остановки лесного пожара и их решение на основе замены отрезка контура дугой окружности приводят к простому алгоритму расчета сил и средств на остановку и локализацию пожара, который позволяет в то же время учесть форму контура (в частности, возможность его распада на отдельные функционирующие кромки), а также увеличение длины контура за время остановки и изменение интенсивности горения вдоль контура пожара.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Альбини Ф. А., Коровин Г. Н., Горювая Е. Н. Математический анализ процесса тушения лесного пожара // Лесные пожары и борьба с ними: Сб. науч. тр.— Л.: ЛенНИИЛХ, 1978.— С. 61—78. [2]. Конев Э. В. Физические основы горения растительных материалов.— Новосибирск: Наука, 1977.— 240 с. [3]. Конев Э. В. Анализ процесса распространения лесных пожаров и палов // Теплофизика лесных пожаров.— Новосибирск: ИГФ СО АН СССР, 1984.— С. 99—125. [4]. Методика расчета численности рабочих, вооруженных ранцевой аппаратурой, для тушения лесных низовых пожаров.— Л.: ЛенНИИЛХ, 1971.— 26 с. [5]. Телицын Г. П. Расчет объема работ, скорости и продолжительности локализации лесного пожара // Лесн. хоз-во.— 1965.— № 4.— С. 44—47. [6]. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров.— М.: Гослесхоз СССР, 1976.— 111 с.

Поступила 19 марта 1987 г.