



ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 614.841.42

С.Н. Орловский, Л.Н. Бердникова

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И СРЕДСТВ ПОЖАРОТУШЕНИЯ ПРИ БОРЬБЕ С ЛЕСНЫМИ ПОЖАРАМИ

S.N. Orlovsky, L.N. Berdnikova

THE OPTIMIZATION OF FIRE EXTINGUISHMENT TECHNIQUES AND MEANS IN FOREST FIRE FIGHTING

Орловский С.Н. – канд. техн. наук, доц. каф. безопасности жизнедеятельности Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: orlovskiysergey@mail.ru

Бердникова Л.Н. – канд. с.-х. наук, доц. каф. безопасности жизнедеятельности Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: Vlaga26@mail.ru

Orlovsky S.N. – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Chair of Life Safety, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk. E-mail: orlovskiysergey@mail.ru

Berdnikova L.N. – Cand. Agr. Sci., Chair of Life Safety, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk. E-mail: Vlaga26@mail.ru

Предложена методика оптимизации технологий тушения лесных низовых пожаров и средств механизации для их выполнения на основе минимизации затрат на тушение и экологического ущерба. Разработан метод определения набора оптимальных технологий тушения лесных пожаров. Выявлены технические средства, применение которых позволит локализовать и потушить лесной пожар с максимальной эффективностью. Выведены исходные аналитические формулы, позволяющие по параметрам пожара и технологии его тушения рассчитывать сроки тушения и размеры выгоревших лесных площадей. Обоснован конкретный список оборудования для тушения лесных пожаров в зависимости от параметров их развития. Отфильтрованы несущественные параметры пожаров для решения задачи оптимизации технологий тушения очагов горения высокой, средней и низкой интенсивности. Метод определения оптимальных технологий базируется на выведенных формулах расчёта оптимальных технологий тушения и расчётов затрат на вы-

полнение работ. Используется полный перебор вариантов и нейросетевой алгоритм. Применение нейросетей позволило не учитывать несущественные параметры пожаров и получить простые формулы для решения задачи с учетом анализа встречаемости технологий тушения. В массиве полученной при выполнении расчётов информации выбраны оптимальные технологии тушения в соответствии с заданными критериями. В результате применения нейросетей выявлены несущественные параметры пожаров и получены простые формулы для решения задачи набора наиболее оптимальных технологий. Использование оптимизированных технологий тушения низовых лесных пожаров на различных стадиях их развития позволит службам лесной охраны организовать выполнение работ с рациональным количеством сил и средств, а также с минимальными затратами и ущербом.

Ключевые слова: методика, оптимизация, технологии тушения, лесные пожары, механизация, эффективность, ущерб.

The methodology of optimization of technologies of extinguishing of forest basilar fires and facilities of mechanization is offered for their implementation on the basis of minimization of expenses on extinguishing and ecological damage. The method of determination of set of optimal technologies of extinguishing forest fires has been worked out. Technical means which application will allow localizing and extinguishing forest fire with maximum efficiency have been revealed. Initial analytical formulas allowing in parameters of the fire and technology of its suppression to count the terms of suppression and the sizes of the burned-out forest areas are shown out. The concrete list of the equipment for extinguishing of forest fires depending on the parameters of their development is set out. Insignificant parameters of the fires for the solution of the problem of optimization the technologies of suppression of the centers of burning of high, average and low intensity are filtered. The method of definition of optimum technologies is based on shown out formulas of calculation of optimum technologies of suppression and calculations of costs of performance of work. Full search of options and neural network algorithm is used. The application of neuronets allowed not to pay attention to insignificant parameters of the fires and to receive simple formulas for the solution of the task taking into account the analysis of occurrence of technologies of suppression. In the array of information received when performing calculations optimum technologies of suppression according to the set criteria. As a result of application of neuronets and simple formulas for the solution of set problem of the most optimum technologies are received. The use of optimized technologies of suppression of local forest fires at various stages of their development will allow services of forest protection to organize the performance of work with rational number of forces and means and also with minimum expenses and damage.

Keywords: methodology, optimization, technologies of extinguishing, forest fires, mechanization, efficiency, damage.

Введение. Одним из массовых факторов, приводящих к массовой гибели лесов и нарушениям окружающей среды, выбросам огромных количеств углекислого газа и поглощению чистого кислорода, являются лесные и степные пожары. Причиной пожаров может быть как естественный, так и антропогенный фактор. Огонь степных пожаров часто переходит в лесные массивы, уничтожая их. Также возможны ситуации повреждения

сельскохозяйственных угодий и угрозы для населенных пунктов [1].

Одной из важных природоохранных задач является оперативный мониторинг действующих пожаров, обеспечивающий быстрое определение характеристик очагов (координаты, площадь и т.д.) и принятие мер по их ликвидации.

Цель исследований. Разработать методику оптимизации технологий пожаротушения при борьбе с лесными пожарами.

Задачи исследований. Выявить технические средства, применение которых позволит локализовать и потушить лесной пожар с максимальной эффективностью. Вывести исходные аналитические формулы, позволяющие по параметрам пожара и технологии его тушения рассчитывать сроки тушения и размеры выгоревших лесных площадей. Обосновать конкретный список оборудования для тушения лесных пожаров в зависимости от параметров их развития. Отфильтровать несущественные параметры пожаров, что позволит получить простые формулы для решения задачи оптимизации технологий тушения очагов горения высокой, средней и низкой интенсивности (с высотой пламени соответственно: 1,5 м; до 1,5 м; выше 0,5; до 0,5 м) [2].

Методы исследований. Из ряда последовательно осуществленных тактических операций, таких как остановка фронта пожара, локализация пожара, дотушивание, окарауливание, складывается тушение лесного пожара.

Самой трудоемкой операцией при тушении пожара считается локализация, которая связана с проходкой вокруг пожара замкнутого контура. Технология тушения – это сочетание конкретного набора технических средств с методом локализации. Существуют сотни различных технологий тушения, но все можно условно разбить на две большие группы, с существенно разными затратами:

- с доставкой по воздуху;
- доставкой лесных пожарных и оборудования наземным транспортом.

Вторая группа технологий делится еще на две:

- с тушением пожара непосредственно с воздуха;

- высадкой бригады пожарных к очагу горения.

В первом приближении все технологии тушения делятся на три типа. Для оптимального определения варианта применяемой технологии тушения на данном пожаре достаточно уметь точно моделировать его развитие. Под словами «точно

моделировать» подразумевается в данном случае расчет для каждого момента времени скорости распространения горения, интенсивности пожара, вида пожара, геометрии горящей кромки. Из этих параметров, например, скорость распространения лесного пожара варьирует в больших пределах в зависимости от рельефа местности, влажности и температуры воздуха, количества и вида горючего материала, времени суток, атмосферного давления, скорости ветра и других факторов.

Для анализа технологий авторами был составлен список лесопожарных орудий и агрегатов в количестве 41 шт. Для каждой позиции списка рассматривались варианты применения и способы доставки, по которым рассчитывались показатели эффективности применения [2].

Также определялись скорости движения горения от очага до места базирования технических средств пожаротушения и лесных пожарных. Всего для анализа было выбрано 180 технологий. Для включения в список новых средств технологий или механизации для них следует рассчитать приведенные затраты на доставку и эксплуатацию к месту лесного пожара. Рассматривалось 180 технологий тушения и 16 различных пожаров.

Вся задача разбивается на два этапа. Сначала определяется набор технологий, которые могут применяться в данном регионе. Затем для конкретного пожара определяется одна или несколько наиболее оптимальных технологий.

Пожар считаем потушенным, если он локализован, т.е. распространение его на новые площади прекращено. Технология тушения – это сочетание метода локализации с конкретным набором технических средств. Методы локализации могут быть следующими [1]:

– прямой (П) – гасится вся горящая кромка вокруг всего пожара;

– косвенный – путём прокладки заградительной полосы (К). Полоса прокладывается на расстоянии D_1 от горящей кромки. Ширина заградительной полосы устанавливается на основе опыта в зависимости от параметров пожара. Эту ширину должно обеспечить применяемое техническое средство;

– косвенный путём отжига (Ко). Прокладывается заградительная полоса, и от этой полосы производится отжиг. Необходимо, чтобы встречный огонь прошёл расстояние не меньше D_0 до встречи с горящей кромкой. Ширина полосы отжига D_0 зависит от параметров пожара. Технологию будем считать оптимальной, если для неё минимальны затраты (Z).

Будем рассматривать только низовые лесные пожары на ранней стадии их развития: с низкой (н), средней (с) и высокой (в) интенсивностью. Интенсивность определяется по высоте пламени: соответственно до 0,5 м; от 0,5 до 1,5 м; больше 1,5 м.

Модель пожара – эллипс с эксцентриситетом e . Точечный источник пожара находится в одном из фокусов эллипса [3].

Тушение пожара – это обход всего пожара по горящей кромке (при прямом методе) или параллельно ей на некотором от неё расстоянии (при косвенных методах).

Обозначения: V_ϕ – скорость фронта пожара (м/мин); V_p – скорость увеличения периметра пожара (км/ч); V_l – скорость локализации пожара (км/ч); V_d – скорость доставки бригады пожарных к месту пожара (км/ч); L – расстояние до пожара (км); I_n – интенсивность пожара – низкая, средняя, высокая (**н, с, в**); I – интенсивность пожара, с которой может справиться данная технология (**н, нс, нсв, св, с, в**); C_l – удельная стоимость локализации пожара (руб/ч); C_d – удельная стоимость доставки к пожару бригады пожарных (руб/ч); T_0 – время от момента загорания до выезда бригады (ч); T_d – время доставки бригады к пожару (ч); $T_d = L / V_d$; T_{dmax} – максимальное время доставки к пожару, возможное для данной технологии (ч); T_l – время локализации пожара (ч); D_1 – расстояние от заградительной полосы до горящей кромки (20 м); D_0 – ширина полосы отжига – длина пути, пройденного встречным огнём (10 м); Z – затраты на тушение пожара (руб.); e – эксцентриситет эллипса пожара ($0 \leq e < 1$).

Потушенный пожар отличается по форме от первоначального эллипса. Время локализации определяется по формуле [4]

$$T_l \approx \frac{V_p \cdot (T_0 + T_d + \tau)}{V_l - V_p}, \quad (1)$$

где
$$V_p = 0,12 \cdot V_\phi \cdot K. \quad (2)$$

$$K \approx \frac{\pi}{2(1+e)} \left(1,5 + 1,5 \cdot \xi - \sqrt{\xi} \right); \quad \xi = \sqrt{1-e^2}; \quad (3)$$

$$1 < K \leq \pi;$$

$\tau = 0$ – при прямом методе;

$$\tau = \frac{D_1}{60 \cdot V_\phi} \text{ – при методе заградительных полос; } \quad (4)$$

$$\tau = \frac{D_o}{30 \cdot V_\phi \cdot (1 - e)} - \text{при методе отжига.}$$

Параметр τ обозначает следующее: после того как замкнутый контур вокруг пожара пройден и если пожар продолжает свободно распространяться, то ему необходимо время τ , чтобы коснуться проложенной полосы.

Затраты (Z) определяются на основе вычисленных T_∂ и T_Γ [5]

$$Z = 2 \cdot T_\partial \cdot C_\partial + T_\Gamma \cdot C_\Gamma. \quad (5)$$

Для каждого пожара заданы параметры: e , V_ϕ , L , T_∂ , I_Γ ; перечень технологий, для каждой из которых известны: V_Γ , V_∂ , C_Γ , C_∂ , $T_{\text{дmax}}$, μ , I . Здесь μ – это метод локализации (П – прямой, К – заградительной полосы, Ко – отжига).

Первоначально делается оценка всех исходных предложенных технологий. Для этого перебирается большое количество возможных пожаров. По каждому пожару для каждой технологии вычисляется Z . По каждому пожару, после сортировки технологий по возрастанию Z , берутся первые (не более 5) наиболее оптимальные техноло-

гий, причём такие, чтобы Z в этом списке не отличались более чем в P раз (предлагается брать $P = 2$). Затем для каждой из исходных технологий определяется встречаемость (q): сколько раз данная технология попадает в список оптимальных во всех рассчитанных пожарах. Чем выше встречаемость, тем нужнее технология. Все рассчитанные пожары разбиваются на классы по технологиям. Затем решается задача определения номера класса по параметрам пожара при помощи нейросетевого алгоритма. Классификация и нейросетевая схема подбираются индивидуально по конкретным практическим данным.

Результаты исследований и их обсуждение. Был выбран Ангарский регион – самый пожароопасный в Красноярском крае. Количество исходных технологий – 96 (табл.). Были проведены расчёты по 432 основным и 12 дополнительным пожарам. Параметры пожаров варьировались в следующих пределах: e от 0,1 до 0,95; V_ϕ от 1 до 10 м/мин; L от 10 до 250 км; T_∂ от 2 до 20 час; I_Γ от н до в. После расчетов ненулевая встречаемость была у 23 из 96 технологий, наибольшая – у технологии № 41.

Технологии тушения лесных пожаров Ангарского региона

Номер	Техническое средство	V_Γ , км/ч	V_∂ , км/ч	C_Γ , руб/ч	C_∂ , руб/ч	$T_{\text{дmax}}$, ч	Метод	I	q
14	АЛП-0,2 ВН-22,А,П,1	1,97	25	66	88	6	П	Н	25
37	ЛК-3,С,о,10	0,6	180	221	8836	2	Ко	НСВ	36
39	МТ-1,мото,о,1	1,5	30	66	46	6	Ко	НСВ	151
40	МТ-1,А,о,2	3	25	132	88	6	Ко	НСВ	211
41	МТ-1,А,о,4	6	25	264	88	6	Ко	НСВ	275
42	МТ-1,В,о,3	4,5	160	198	22725	2	Ко	НСВ	8
43	МТ-1,С,о,2	3	180	132	8836	2	Ко	НСВ	98
44	ВЛП-20,мото,П,1	1,2	30	38	46	6	П	Н	45
45	ВЛП-20,А,П,5	6	25	190	88	6	П	Н	100
47	ВЛП-20,С,П,4	4,8	180	152	8836	2	П	Н	41
51	ВЛП-20,С,о,10	5	180	1990	8836	2	Ко	СВ	72
52	ВЛП-2.5, мото, П, 2	2	30	66	92	6	П	Н	68
53	ВЛП-2.5,А,П,5	5	25	165	88	6	П	Н	99
56	ВЛП-2.5,С,о,4	4	180	1598	8836	2	Ко	СВ	70
58	РЛО-М,А,П,10	0,9	25	215	88	6	П	НС	1
70	АЛП-0.2 плуг, А, о, 1	2,25	25	183	88	6	Ко	НСВ	57
71	Лоп. пар.,С,о,10	0,4	180	353	8836	2	Ко	НСВ	33
73	ВВ пар.,С,о,5	0,75	180	11084	8836	2	Ко	НСВ	1
80	МТ-ЛБ,Х,К,2	12	40	1490	838	6	К	НС	7
81	МТ-ЛБ,Х,о,2	12	40	1490	838	6	Ко	В	7
86	АТ-Т,Х,К,1	4	30	941	75	6	К	НС	5
90	ВПЛ-149,Х,К,1	6,2	40	514	323	6	К	НС	69
95	ВПЛ-149,Х,К,2	12,4	40	1028	646	6	К	НС	36

Все пожары по набору оптимальных технологий были разделены на классы четырёх типов (А, В, С, D).

Тип А – по сочетанию номеров первых пяти технологий. Все пожары разбились при этом на 65 классов.

Тип В – формируется из классов типа А – так, что порядок номеров технологий становится не важным. Количество классов типа В равно 41.

Тип С получается путём укрупнения типов А и В. В отдельный класс типа С объединяются пожары, у которых на первом месте стоят вполне определённые номера технологий. Здесь всего 3 класса. Класс № 1 – если на первом месте стоит технология 39 или 41. Класс № 3 – на первом месте технология 44 или 45. Класс № 2 – все остальные пожары. В первой технологии класса № 2С обязательно есть авиация. В первой технологии классов № 1С и № 3С авиации нет. При анализе пожаров класса № 2С оказалось, что все они имеют удаление (L) больше 180 км.

Тип D получается путём детализации типа С. Класс № 1С разбивается на два, класс № 3С тоже на два, в соответствии со своим номером первой технологии. Класс № 2С остаётся без изменений. Таким образом, для типа D всего 5 классов.

Далее делались попытки определения номера класса по входному вектору параметров пожара на основе двухслойной нейронной сети [6], которую можно представить формулой

$$Y = \sum_{i=1}^N a_i \sin \left(\sum_{k=1}^M b_{ki} X_k \right) \quad (6)$$

где Y – после округления до целого числа должно быть равно номеру класса; N – количество нейронов, подбирается так, чтобы это было минимальное число, при котором задача решается; M – длина входного вектора (первоначально $M = 5$); X_1, \dots, X_5 – входной вектор (параметры пожара); a, b – коэффициенты.

Коэффициенты находились по исходной обучающей выборке (первоначально это 432 пожара) путем минимизации среднеквадратического отклонения заданных номеров классов от рассчитанных по формуле (6). Минимизация проводилась методом сопряжённых градиентов. После определения матрицы коэффициентов – этапа обучения – проводилось тестирование по дополнительным пожарам.

Задача определения номера класса по формуле (6) решилась успешно только для классов типа

С. После удаления входных параметров, для которых подобраны коэффициенты близки к нулю (несущественные параметры пожара), длина входного вектора (M) стала равна 2, $X_1 = L$, $X_2 = I_{\Pi}$. Количество нейронов (N) равно 4. Тестирование по дополнительным пожарам прошло без ошибок. При детальном рассмотрении оказалось, что в класс № 1С попадают только пожары со средней и высокой интенсивностью, а в класс № 3С – с низкой интенсивностью.

Далее успешно решились ещё две задачи классификации на основе формулы (6):

1) разбиение класса № 1С на два: № 1D и № 2D; при этом $N=6$, $M=4$, $X_1=L$, $X_2=T_0$, $X_3=K$, $X_4=V_P$; несущественным параметром пожара здесь является интенсивность I_{Π} ; обучение проводилось по 216 пожарам, относящимся к классу № 1С; тестирование по 8 дополнительным пожарам прошло без ошибок;

2) разбиение класса № 3С на два: № 4D и № 5D; при этом $N=5$, $M=5$, $X_1=L$, $X_2=T_0$, $X_3=I_{\Pi}$, $X_4=K$, $X_5=V_P$; обучение проводилось по 108 пожарам, относящимся к классу № 3С; тестирование по 3 дополнительным пожарам прошло без ошибок.

Общая схема определения оптимальной технологии получается следующей:

1. Если $L > 180$ км, то пожар относится к классу № 3D; наиболее оптимальные технологии тушения для него могут быть с номерами 43, 47, 51, 42, менее оптимальные, но достаточно эффективные, – с номерами 37, 56, 71, 73.

2. Если $L \leq 180$ км и интенсивность (I_{Π}) средняя или высокая, то пожар относится к классу № 1С; для него наиболее оптимальными могут быть технологии № 39 или № 41, на втором – пятом местах технологии с номерами 40, 43, 58, 70, 80, 81, 86, 90, 95.

3. Если $L \leq 180$ км и интенсивность (I_{Π}) низкая, то пожар относится к классу № 3С; для него наиболее оптимальными могут быть технологии № 44 или № 45, на втором – пятом местах технологии с номерами 14, 39, 40, 41, 47, 52, 95.

4. Если пожар относится к классу № 1С, то на основе четырёх параметров (L , T_0 , K , V_P) и матрицы из 30 коэффициентов по формуле (6) определяется номер класса типа D; если новый класс № 1D, то оптимальная технология – № 39, на втором – пятом местах могут быть технологии с номерами 40, 41, 58, 70, 86; если новый класс № 2D, то оптимальная технология – № 41, на втором – пятом местах могут быть технологии с номерами 39, 40, 43, 70, 80, 81, 90, 95.

5. Если пожар относится к классу № 2С, то

на основе пяти параметров (L , T_0 , I_p , K , V_p) и матрицы из 30 коэффициентов по формуле (6) определяется номер класса типа D; если новый класс № 4D, то оптимальная технология – № 44, на втором – пятом местах могут быть технологии с номерами 14, 39, 45, 52, 53; если новый класс № 5D, то оптимальная технология – № 45, на втором – пятом местах могут быть технологии с номерами 40, 41, 47, 53, 95.

6. При необходимости номер оптимальной технологии может быть уточнён путём перебора небольшого количества вариантов технологий и расчёта Z.

Выводы. Разработана методика оптимизации технологий тушения низовых лесных пожаров для конкретного пожароопасного региона, несмотря на казавшуюся первоначально сложной исходную задачу. Это стало возможным во многом благодаря применению нейросетевого алгоритма.

Оптимальность определялась по затратам, но её в принципе можно определять и по экономическому или экологическому ущербу. Усовершенствованием общей постановки задачи и приближением её к реальности может стать переход на произвольную форму пожаров и добавление новых параметров: например, уклонов местности. С применением приведенной выше методики можно решать следующие задачи:

1) при обнаружении лесного пожара из имеющихся вариантов производить оперативный выбор оптимальных технологий его тушения;

2) для данной выбранной технологии и данного лесного пожара прогнозировать время тушения и затраты, размеры нанесенного ущерба и выгоревших лесных площадей;

3) производить анализ на применимость существующих технологий и определение необходимого оптимального набора технологий тушения пожаров для данного лесопожарного региона;

4) определять эффективность применимости проектируемых или планируемых к приобретению лесопожарных машин, оборудования, технологий их использования и доставки к очагу горения в принятых лесорастительных условиях.

Литература

1. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров / Федеральная служба лесного хозяйства России. – М., 1995. – С. 84–85.

2. Орловский С.Н. Борьба с лесными, степными и торфяными пожарами / Красноярск. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2016. – 299 с.
3. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. – М.: Лесн. пром-сть, 1979. – 160 с.
4. Доррер Г.А., Ушанов С.В. Математическое моделирование процессов распространения лесных пожаров и борьбы с ними // Изв. вузов. Лесной журнал. – 2000. – № 2. – С. 31–36.
5. Комиссаров С.В., Орловский С.Н., Ряполов В.Я. Подход к оптимизации тушения лесных пожаров // Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: тр. III Всерос. науч.-практ. конф. Т. 2. – Красноярск, 2003. – С. 130–134.
6. Нейроинформатика / А.Н. Горбань, В.Л. Дунин-Барковский, А.Н. Кирдин [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1998. – 296 с.

Literatura

1. Ukazanija po obnaruženiju i tusheniju lesnyh požarov / Federal'naja služba lesnogo hozjajstva Rossii. – M., 1995. – S. 84–85.
2. Orlovskij S.N. Bor'ba s lesnymi, stepnymi i torfjanymi požarami / Krasnojarsk. gos. agrar. un-t. – Krasnojarsk, 2016. – 299 s.
3. Dorrer G.A. Matematicheskie modeli dinamiki lesnyh požarov. – M.: Lesn. prom-st', 1979. – 160 s.
4. Dorrer G.A., Ushanov S.V. Matematicheskoe modelirovanie processov rasprostraneniya lesnyh požarov i bor'by s nimi // Izv. vuzov. Lesnoj zhurnal. – 2000. – № 2. – S. 31–36.
5. Komissarov S.V., Orlovskij S.N., Rjapolov V.Ja. Podhod k optimizacii tusheniya lesnyh požarov // Problemy zashhity naselenija i territorij ot chrezvychajnyh situacij prirodnogo i tehnogennogo haraktera: tr. III Vseros. nauch.-prakt. konf. T. 2. – Krasnojarsk, 2003. – S. 130–134.
6. Nejroinformatika / A.N. Gorban', V.L. Dunin-Barkovskij, A.N. Kirdin [i dr.]. – Novosibirsk: Nauka, 1998. – 296 s.