

УДК 614. 84

Ю. А. Абрамов, д-р техн. наук, профессор, проректор АГЗУ

А.Е. Басманов, к-т техн наук, ст. преподаватель, АГЗУ.

А. А. Тарасенко, ст. преподаватель, АГЗУ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТУШЕНИЯ НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА ПРИ УЧЕТЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГОРЮЧЕЙ СРЕДЫ

В работе рассмотрено влияние пространственной неоднородности горючей среды на интегральные характеристики низового лесного пожара. Учет данного влияния позволяет повысить эффективность оперативно-тактических мероприятий проводимых в условиях недостатка сил и средств пожаротушения.

Постановка проблемы. Проводником горения низового лесного пожара является горючий материал наземного яруса. Пространственная неоднородность распределения его пирологических характеристик приводит к отклонению формы пожара от правильной. Известно, что на начальном этапе область пожара подобна эллипсу, а позже эта форма претерпевает изменения. При этом рост периметра области пожара опережает линейный рост, т.е. растет изогнутость кромки. Изогнутость проявляет себя на разных масштабах, и, в том случае, когда масштаб превышает некоторую величину, игнорирование роста периметра пожара приводит к занижению объема локализационных работ, что в свою очередь снижает эффективность проводимых оперативно-тактических мероприятий.

Анализ публикаций. Описание периметра области пожара, учитывающее изгибы во всем диапазоне возможных масштабов кратко приведено в работе [1], где контур пожара моделируется фрактальной линией. Статистические характеристики контура пожара, развивающегося под случайным воздействием ветра рассмотрены в [2]. Расчет объема работы по тушению кромки пожара приводится в [3], при этом не учитывается динамика формы пожара. Основные тактические приемы тушения приведены в [4, 5]. Построение локализационных кривых при пассивных методах тушения рассмотрено в [6].

При этом нигде не рассматривается влияние неоднородности слоя на параметры контура и оптимизация приемов активного тушения.

Постановка задачи. Повышение эффективности тушения низового лесного пожара связано с нахождением оптимального местоположения и направления движения сил пожаротушения вдоль контура пожара. С этой целью необходимо получить математическую модель длины периметра пожара, развивающегося в условиях неоднородной горючей среды.

Модель длины периметра пожара.

Рассмотрим низовой лесной пожар, развивающийся по неоднородному слою. Масштаб неоднородностей при этом таков, что детерминировано задать их нельзя, т.е. они описываются вероятностным образом.

В этом случае радиус области пожара представляет собой случайный процесс с дисперсией $\sigma_r^2(t)$, растущей со временем [7]

$$\sigma_r(t) = \sqrt{\frac{2 \sum_{K=1}^n [(V'_{x_K})_{x_K=MX_K}]^2 (\sigma X_K)^2}{\tilde{\alpha}}} \left(t + \frac{e^{-\tilde{\alpha}t}}{\tilde{\alpha}} - \frac{1}{\tilde{\alpha}} \right), \quad (1)$$

где

$$\tilde{\alpha} = \sum_{K=1}^n \left(\frac{V}{r_k \left(1 + \exp \left[\frac{r_k - z_{кр}}{A \cdot z_{кр}} \right] \right)} + \frac{V r_k}{z_{кр}^2 \left(1 + \exp \left[\frac{z_{кр} - r_k}{A \cdot z_{кр}} \right] \right)} \right). \quad (2)$$

Здесь X_K - значение K-ой пирологической характеристики (MX_K – среднее, $(\sigma X_K)^2$ - дисперсионное значения), V – скорость распространения низового лесного пожара, t – время, r_k - радиус корреляции K-ой пирологической характеристики, $z_{кр}$ – критическое расстояние воспламенения, $A=0,05$.

Рост дисперсии кромки приводит к увеличению ее излома. Очевидно, что не всякие изгибы кромки влияют на объем выполняемых работ, а лишь те, масштаб которых превышает ширину воздействия того или иного используемого тушащего средства.

Для вычисления длины контура пожара необходимо определить степень излома (изрезанности) кромки. Для оценки значения коэффициента изрезанности используем следующий прием. Выделим в секторе φ элемент контура пожара. Аппроксимируем контур прямыми участками, как показано на рис. 1. При этом величину отрезков l_k выберем в соответствии с используемым для тушения техническим средством, а именно

$$l_k = 2R_{\text{эф}}, \quad (3)$$

где $R_{\text{эф}}$ – эффективная ширина тушащего воздействия используемого технического средства.

Для сравнения на том же рисунке показан другой сектор, аппроксимируемый при меньшем значении $R_{\text{эф}}$.

Сумму длин звеньев полученной ломаной \tilde{L} будем приближенно считать длиной спрямляемой с учетом (3) кромки пожара.

Будем полагать, что при распространении по однородному слою контур пожара представляет собой эллипс [8], с длиной элемента периметра $L(\varphi)$ заключенного в угле φ .

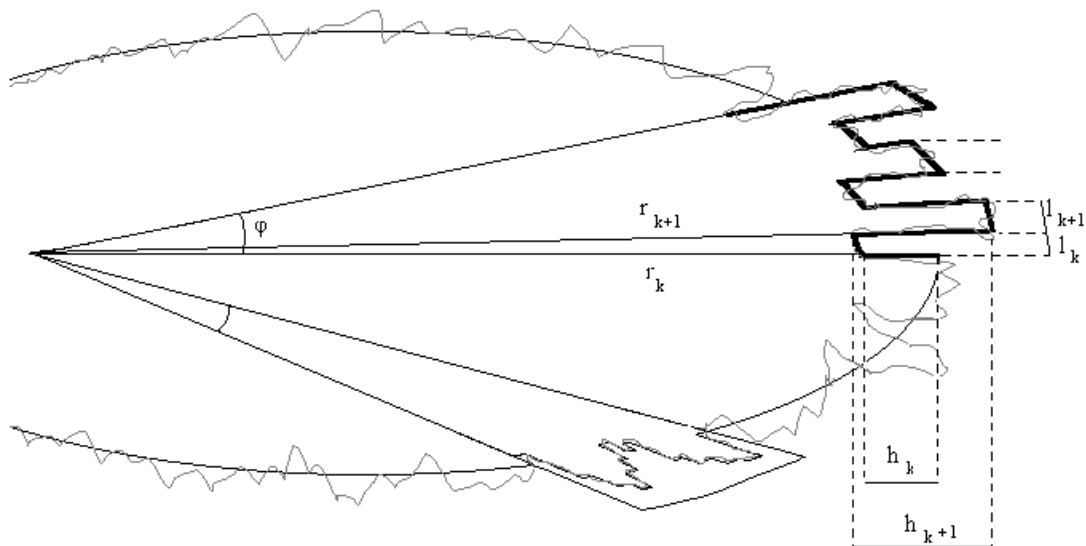


Рис. 1. К расчету коэффициента изрезанности кромки

Тогда коэффициент изрезанности U кромки положим равным отношению величины $\tilde{L}(\varphi)$ к длине $L(\varphi)$ дуги эллипса

$$U = \frac{\tilde{L}(\varphi)}{L(\varphi)} = \frac{\sum_{k=1}^n h_k + \sum_{k=1}^m l_k}{L(\varphi)}. \quad (4)$$

Из рисунка видно, что

$$\sum_{k=1}^m l_k = L(\varphi), \quad (5)$$

поэтому найдем $\sum_{k=1}^n h_k$. Очевидно, что

$$h_k = r_k - r_{k+1}, \quad (6)$$

где r_k и r_{k+1} - длина радиус-векторов соответствующих точек кромки.

Согласно [7] величина радиуса распределена нормально с известным среднеквадратическим отклонением $\sigma_r(t)$ (1). В силу этого величина h_k также будет распределена нормально с нулевым математическим ожиданием и

$$\sigma h_k = \sqrt{2} \sigma_r(t). \quad (7)$$

Т.е. плотность вероятности данной величины будет равна

$$f(h_k) = \frac{1}{2\sqrt{\pi} \sigma_r} \exp\left(-\frac{h_k^2}{4\sigma_r^2}\right). \quad (8)$$

Математическое ожидание данной величины равно

$$Mh_k = \int_{-\infty}^{\infty} |h_k| \frac{1}{2\sqrt{\pi} \sigma_r} \exp\left(-\frac{h_k^2}{4\sigma_r^2}\right) dh_k = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sigma_r. \quad (9)$$

Таких отрезков h_k в секторе φ будет столько же, сколько и l_k , поэтому окончательно для величины $\tilde{L}(\varphi)$ получим

$$\tilde{L}(\varphi) = L(\varphi) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sigma_r(\varphi) \frac{L(\varphi)}{l_k}. \quad (10)$$

Тогда с учетом (3) найдем величину коэффициента изрезанности кромки пожара

$$U(\varphi) = 1 + \frac{\sigma_r(\varphi)}{\sqrt{\pi} R_{\text{эф}}}. \quad (11)$$

Поскольку в силу (1) $\sigma_r = f(t, \sigma_v, \tilde{\alpha})$, в силу [7] $\sigma_v = f(V, MX_k, \sigma X_k)$, (2) - $\tilde{\alpha} = f(V, z_{\text{кр}}, r_{k_i})$, в силу [8] (см. ниже (14)) $V = V(\varphi)$, то получим, что $U = f(t, \varphi, z_{\text{кр}}, R_{\text{эф}}, MX_k, \sigma X_k, r_{k_i})$. Иными словами, изрезанность кромки зависит от степени неоднородности горючей среды, используемых для тушения средств и времени. Кроме того, она различна для разных тактических элементов контура.

С учетом изрезанности кромки найдем полную длину \tilde{L} контура пожара.

В полярных координатах длина дуги равна

$$L = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{r^2 + r'^2} d\varphi. \quad (12)$$

С учетом изрезанности

$$\tilde{L} = t \int_0^{2\pi} \left(1 + \frac{\sigma_r(\varphi, t)}{\sqrt{\pi} R_{\text{эф}}} \right) \sqrt{V^2(\varphi) + V'^2(\varphi)} d\varphi, \quad (13)$$

где

$$V(\varphi) = V_0 \frac{2\alpha \cos \varphi + (1 + \alpha^2) \sqrt{\cos^2 \varphi + (1 - \alpha^2)^2 \sin^2 \varphi}}{\cos^2 \varphi + (1 + \alpha^2)^2 \sin^2 \varphi} \quad (14)$$

- годограф скорости пожара [8]. (V_0 – скорость в отсутствии ветра, α - теплофизическая характеристика слоя).

На рис. 2 приведен график зависимости величины U от времени и $R_{эф}$ для случая интенсивного пожара ($z_{кр}=0,5$ м) в сосняке-зеленомошнике (значения параметров взяты в [11]).

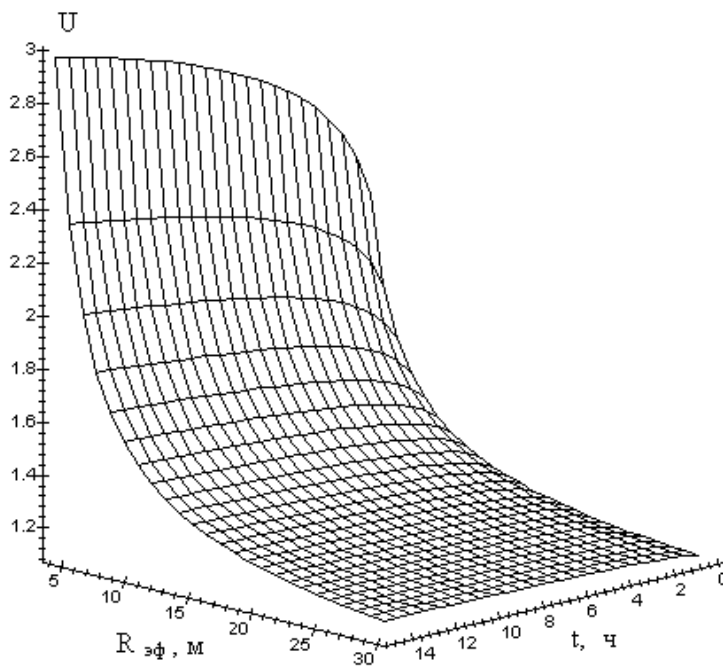


Рис. 2. График коэффициента изрезанности кромки

Учет изрезанности кромки позволяет найти объем локализационных работ в зависимости от применяемых тушащих средств (рис. 3).

Определение оптимальной тактики тушения низового лесного пожара в условиях дефицита сил и средств пожаротушения

Успешная локализация лесного пожара напрямую связана с выбором оптимального количества сил и средств пожаротушения, размещения их по периметру пожара, направления продвижения вдоль кромки.

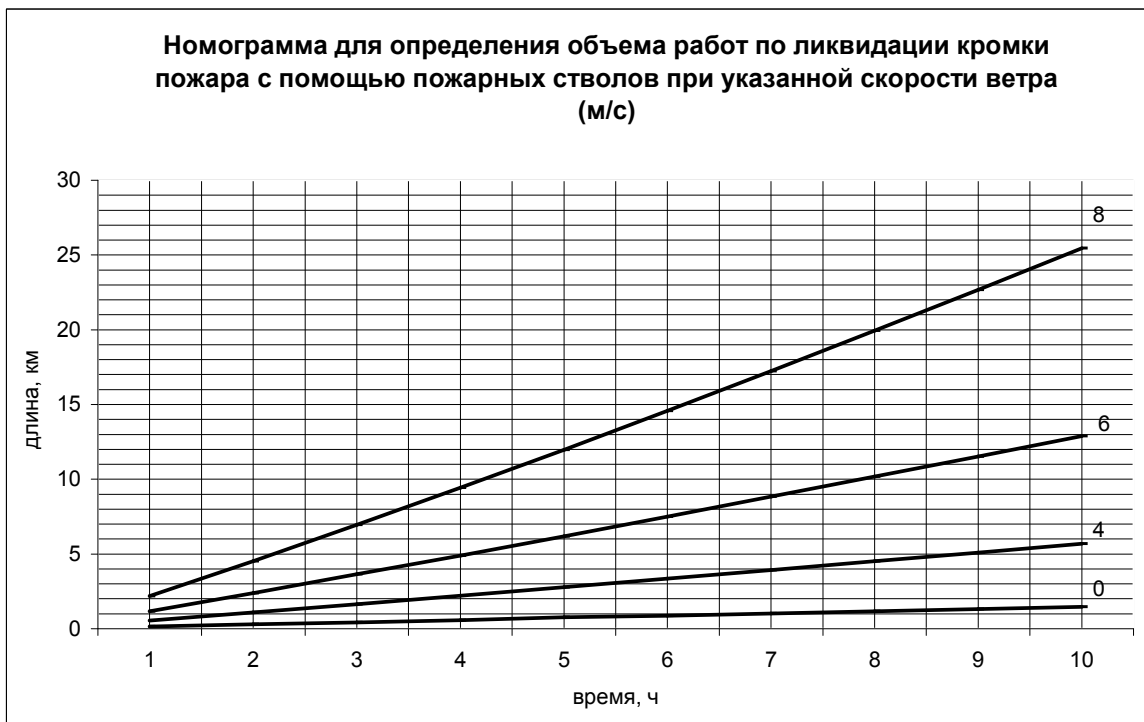
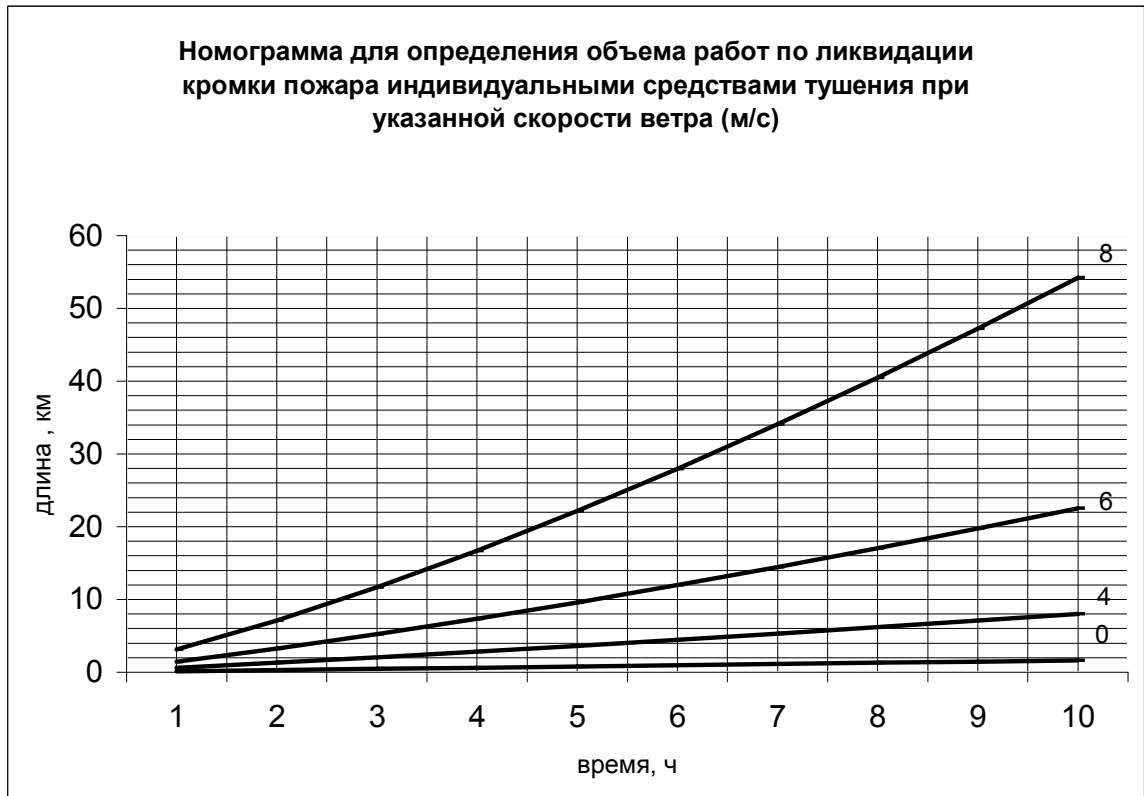


Рис. 3. Номограммы для определения длины кромки низового лесного пожара в зависимости от скорости ветра и времени. а) при использовании пожарных стволов (типа В); б) при использовании индивидуальных тушащих средств

Ситуация усложняется в условиях недостатка сил и средств пожаротушения, например, когда в распоряжении руководителя тушения имеется лишь одна тактическая единица, например, отделение из шести человек, способное проложить магистральную рукавную линию и тушить пожар водой из пожарного ствола. Задача усложняется

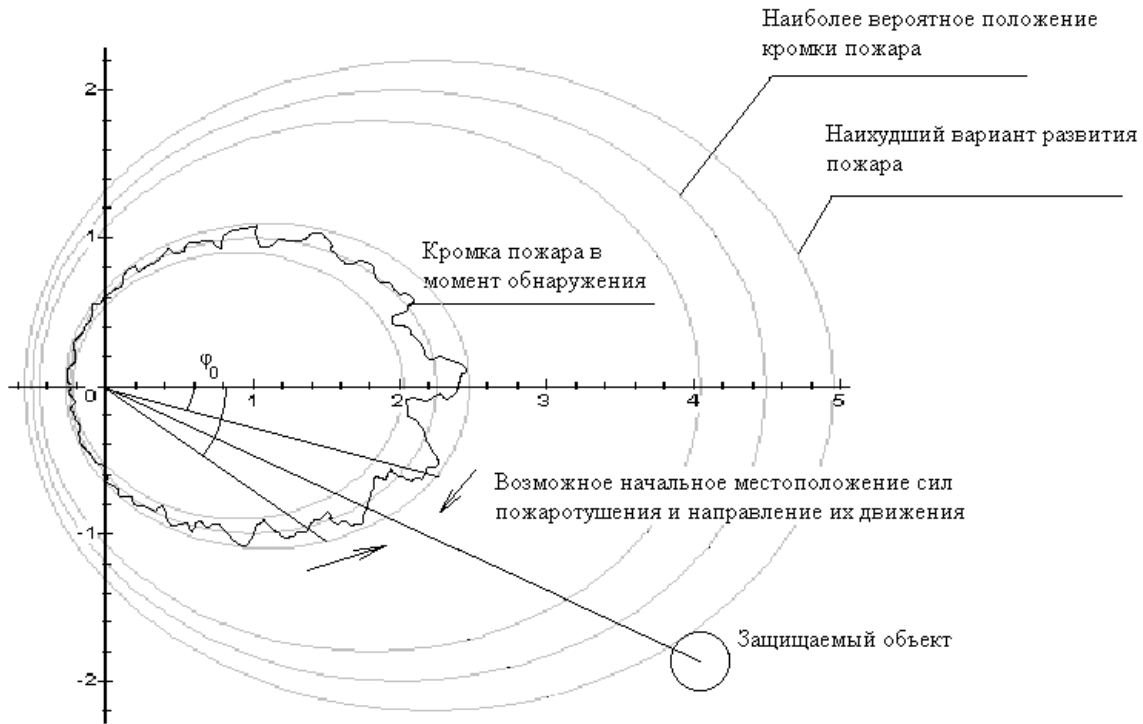


Рис. 4. К расчету расстановки сил пожаротушения

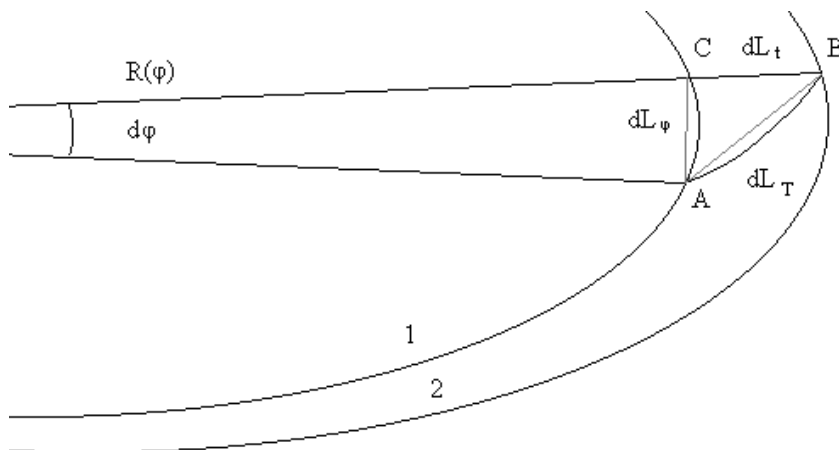


Рис. 5. Малый элемент кромки пожара

в том случае, если в возможной зоне пожара может оказаться объект, который должен быть защищен (рис.4). В этом случае вопрос опти-

мального размещения и направления движения такой тактической единицы вдоль контура пожара встает особенно остро.

Рассмотрим вначале идеализированную ситуацию, для которой будем полагать, что кромка пожара представляет собой эллипс. Это соответствует распространению пожара по однородному слою ЛГМ.

Пусть за малое время dt контур пожара перейдет из положение 1 в положение 2. При этом силы пожаротушения, двигаясь вдоль контура пожара переместятся из точки А в точку В, пройдя малый путь dL_T , который можно считать гипотенузой прямоугольного треугольника АВС. Тогда (см. рис. 5) получим

$$dL_T = \sqrt{dL_\varphi^2 + dL_t^2} = \left| \begin{array}{l} dL_\varphi = R(\varphi, t)d\varphi = V(\varphi)t dt \\ dL_t = dR(\varphi, t) = V(\varphi)dt \end{array} \right| =$$

$$= V(\varphi)\sqrt{(t d\varphi)^2 + (dt)^2} . \quad (15)$$

Путь dL_t силы пожаротушения проходят с линейной, постоянной по времени, но разной для различных тактических элементов кромки скоростью тушения $V_T(\varphi)$, поэтому

$$dL_T = V_T(\varphi) dt . \quad (16)$$

Приравнивая (15) и (16), получим

$$V_T(\varphi) dt = V(\varphi)\sqrt{(t d\varphi)^2 + (dt)^2} . \quad (17)$$

Разделив переменные, получим

$$\frac{dt}{t} = \frac{d\varphi}{\sqrt{\left(\frac{V_T(\varphi)}{V(\varphi)}\right)^2 - 1}} . \quad (18)$$

Интегрируя левую часть от времени t_0 - начала тушения (при этом полагаем, что пожар возник при $t=0$) до времени $t_0 + T$, где T – время локализации пожара, а правую от φ_0 - начального местоположения сил пожаротушения до $\varphi_0 + 2\pi$ - конечного их местоположения в момент полной локализации пожара, найдем время тушения

$$T = t_0 \left(\exp \left[\int_{\varphi_0}^{\varphi_0 + 2\pi} \frac{d\varphi}{\sqrt{\left(\frac{V_T(\varphi)}{V(\varphi)} \right)^2 - 1}} \right] - 1 \right). \quad (19)$$

Выражение (19) демонстрирует линейную зависимость времени локализации пожара T от времени t_0 . Иными словами, чем позже приступить к тушению, тем дольше будет длиться процесс локализации пожара.

Как видно из (19), время локализации может равняться бесконечности, т.е. пожар никогда не будет потушен, если скорость пожаротушения будет меньше скорости распространения пожара.

Кроме этого, выражение (19) при заданной скорости пожаротушения определяется только лишь скоростью распространения пожара $V(\varphi)$ и, следовательно, лишь средними значениями пирологических характеристик. При этом никак не учитывается неоднородность горючей среды.

Интеграл в выражении (19) есть интеграл от периодической функции, вычисленный по ее периоду. Такой интеграл, согласно [9], не зависит от φ_0 . Иными словами, для локализации идеализированного низового лесного пожара, который развивается в однородных условиях, подходит произвольная тактика тушения. Время локализации при этом будет одинаково. Таким образом, оперирование лишь усредненными характеристиками горючей среды может привести к неверному решению задачи по расстановке и направлению движения сил пожаротушения.

На практике же имеем распространение пожара в условиях неоднородной горючей среды. При этом контур пожара будет представлять собой изрезанный с коэффициентом U эллипс.

В этом случае длина малого элемента потушенной кромки пожара $d\tilde{L}_T$ будет равна

$$d\tilde{L}_T = U(\varphi, t) dL_T. \quad (20)$$

Кроме того, возможен учет изменения скорости тушения пожара со временем. Падение скорости тушения обусловлено рядом факторов, среди которых основные - снижение работоспособности тушителей и уменьшение напора воды в рукавной линии при ее наращивании. Таким образом, скорость тушения есть функция угла и времени. В этом случае выражение (18) переписывается как

$$d\varphi = \frac{dt}{t} \sqrt{\left(\frac{V_T(\varphi, t)}{U(\varphi, t)V(\varphi)}\right)^2 - 1}. \quad (21)$$

Видно, что в данном случае переменные разделить не удастся, поэтому аналитическое решение задачи нахождения времени локализации пожара представляется затруднительным. Для решения воспользуемся выполненной нами программой, выполненной в среде Maple-VII. В основу программы положена итерационная процедура вычисления времени прохождения угла $\varphi_0 \div \varphi_0 + 2\pi$, при этом дифференциалы в (21) заменяются конечными приращениями

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta t}{t} \sqrt{\left(\frac{V_T(\varphi, t)}{U(\varphi, t)V(\varphi)}\right)^2 - 1} = f(\varphi, t)\Delta t. \quad (22)$$

Алгоритм вычислительной процедуры показан на рис. 6. Время локализации пожара можно определить, задав начальные условия t_0 , φ_0 и конкретный вид входящих в (22) функций. При этом, вводится ограничение в виде $T < \bar{T}$, для случая бесконечного времени тушения.

Скорость тушения пожара $V_T(\varphi, t)$ будет, очевидно, зависеть от интенсивности горения кромки пожара. Поскольку последняя различна для разных тактических элементов контура, то скорость тушения есть функция угла. Кроме того, производительность труда тушителя

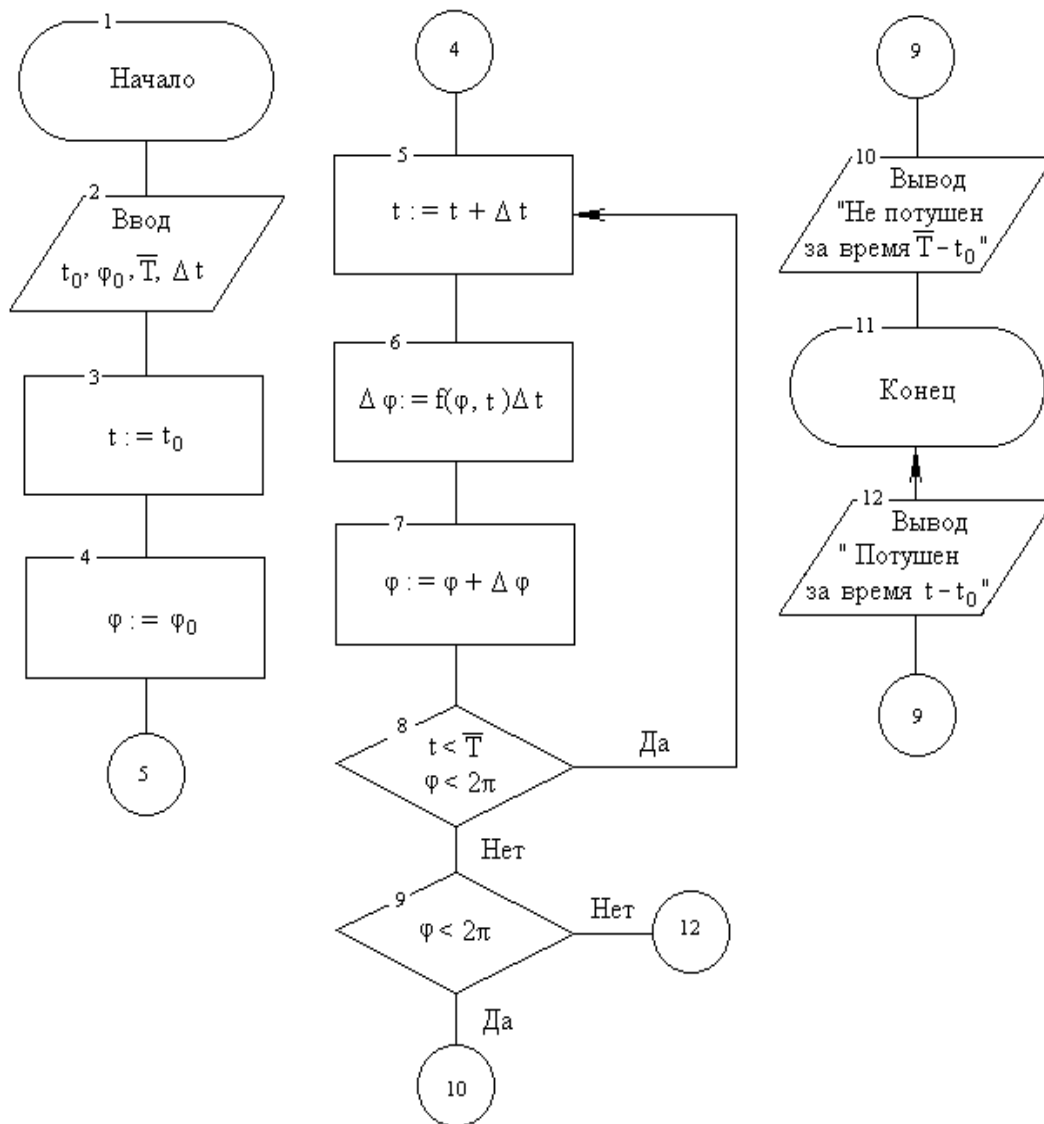


Рис. 6. Алгоритм вычислительной процедуры

ков падает со временем. Поэтому представим скорость тушения в виде

$$V_T = G(\varphi, \alpha) e^{-\mu t}, \quad (23)$$

где μ - коэффициент, характеризующий скорость потери производительности труда.

Скорость тушения кромки пожара напрямую связана с расходом подаваемой для тушения воды. Последняя определяется интенсивностью тепловыделения 1 м кромки.

Интенсивность тепловыделения, в свою очередь, определяется параметрами пламени и в первом приближении прямо пропорциональна высоте пламени (и корню из скорости [13]), которая, в свою очередь пропорциональна скорости кромки. Скорость же кромки, согласно (14) определяется углом φ . С учетом этого введем функцию $G(\varphi, \alpha)$ как

$$G(\varphi, \alpha) = V_{HT} \sqrt{\frac{r(\varphi_H, \alpha)}{r(\varphi, \alpha)}} = V_{HT} r_T(\varphi, \alpha), \quad (24)$$

где $V_{HT} = 10$ м/мин - нормированная скорость тушения (см [3]), $r(\varphi, \alpha)$ – годограф скорости распространения пожара (14), $r_T(\varphi, \alpha)$ – годограф скорости тушения, φ_H - угол, обеспечивающий нормировку (24). Поскольку в [3] не указано, для локализации каких тактических элементов кромки пожара справедливо данное значение скорости тушения, то нормировку осуществим из условия равенства средней по углу скорости тушения \bar{V}_T нормированной скорости тушения V_{HT}

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{HT} \sqrt{\frac{r(\varphi_H, \alpha)}{r(\varphi, \alpha)}} d\varphi = V_{HT}. \quad (25)$$

Отсюда

$$r(\varphi_H, \alpha) = 4\pi^2 \left(\int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{\sqrt{r(\varphi, \alpha)}} \right)^{-2}. \quad (26)$$

Угол φ_H будет определяться величиной α , т.е. степенью вытянутости контура пожара вследствие ветрового воздействия. Такая нормировка обеспечивает равенство средней по углу скорости тушения нормированной скорости при любом значении коэффициента α .

Соответственно, в тылу скорость тушения будет выше средней, а во фронте – ниже и данный эффект тем существенней, чем выше скорость ветра.

Аналогичный подход используем при нахождении эффективной ширины тушения $R_{эф}$ используемого тушащего средства, которая входит в $U(\varphi, t)$. Будем полагать, что при тушении фронтальной кромки пожара водой, подаваемой из пожарного ствола, в виду большой интенсивности тепловыделения и высокой скорости распространения огня, ширина тушащей полосы будет большей, нежели на флангах и особенно в тылу, где ствольщик может безопасно подойти к огню на более близкое расстояние. С учетом этого введем эффективную ширину тушения как функцию угла

$$R_{эф} = R_0 \sqrt{\frac{r(\varphi)}{r(0)}}, \quad (27)$$

где R_0 - ширина орошаемой полосы (для ствола типа В равна 5 м [5]).

Такое представление функции $R_{эф}$ обеспечивает монотонное ее снижение на интервале $[0; \pi]$. Например, при $\alpha = 0,3$ от 5 м до 3 м.

Исходя из таким образом введенных значений входящих в (22) параметров и функций, а также полагая, что μ в (23) равно $\ln 2 / 300$ 1/мин (что соответствует снижению скорости тушения в 2 раза за 5 часов работы), в качестве примера, были получены результаты для времени локализации низового лесного пожара T в зависимости от t_0 , φ и направления обхода контура пожара при его тушении водой силами одного отделения из шести человек с использованием одного пожарного ствола типа В. В качестве примера, на рис. 7 приведены результаты (в виде графика) зависимостей времени тушения T от начального местоположения сил пожаротушения (шаг по углу равен 10^0 , $\Delta t = 0,1$ мин). При этом полагалось, что радиусы корреляции пирологических характеристик слоя ЛГМ равны 5 м [10], радиус корреляции для ветра равен 100 м [2], средние значения пирологических характеристик соответствуют сосняку-зеленомошнику и взяты из [11], СКО характеристик равно 1/3 средних значений. Для скорости ветра 2 м/с параметр $\alpha = 0,5$, 3 м/с - $\alpha = 0,6$, 4 м/с - $\alpha = 0,7$ (см. [12]). Черным цветом изображена зависимость времени локализации пожара от начального местоположения сил пожаротушения при их движении в положительном направлении обхода контура пожара (против движения ча-

совой стрелки), т.е. с последующим движением к тылу пожара, серым – при их движении в отрицательном направлении. Полярная ось при этом полагается ориентированной по направлению скорости ветра.

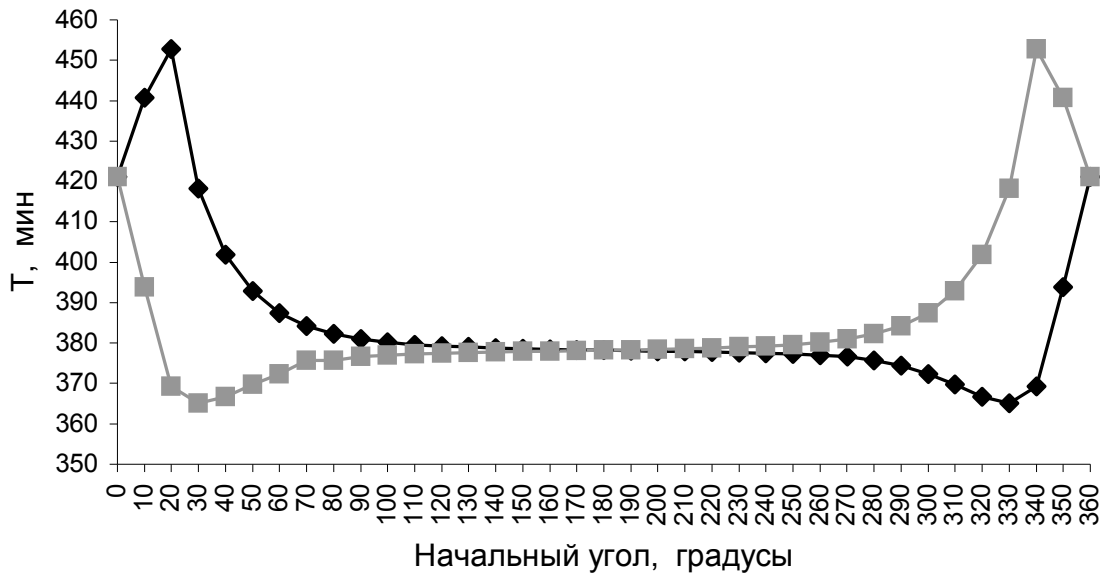


Рис.7. Зависимость времени локализации от начального угла и направления обхода контура

Зависимость усредненного по углу времени локализации низового лесного пожара от времени t_0 изображена на рис. 8. Видно, что, в отличие от [3] время локализации имеет нелинейный характер, обусловленный ростом со временем изрезанности кромки. Чем больше при этом значение α , т.е. скорости ветра, тем быстрее происходит рост времени локализации.

В тоже время по рисункам видно, что величина эффекта (который определим как $\frac{T_{\max} - T_{\min}}{\bar{T}} 100\%$) от выбора начального местоположения и направления движения сил пожаротушения, со временем также возрастает (рис. 9)

Если при малой скорости ветра эффект от выбора той или иной тактики тушения невелик, то с увеличением силы ветра и с ростом времени t_0 данная величина достигает значения 23 % (линия 3).

Начальный угол $\varphi_{\text{опт}}$, который обеспечивает минимальное время локализации пожара при выбранном направлении движения сил пожаротушения, в зависимости от времени t_0 изображен на рис. 10.

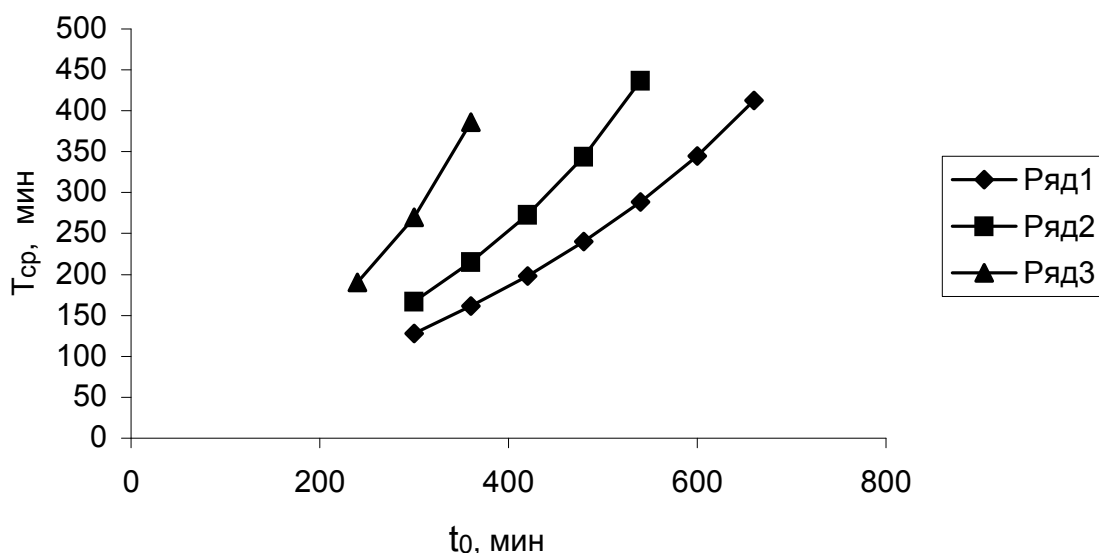


Рис. 8. Зависимость среднего (по углу) времени тушения от времени начала тушения. Линии: 1 – $\alpha = 0,5$; 2 – $\alpha = 0,6$; 3 – $\alpha = 0,7$

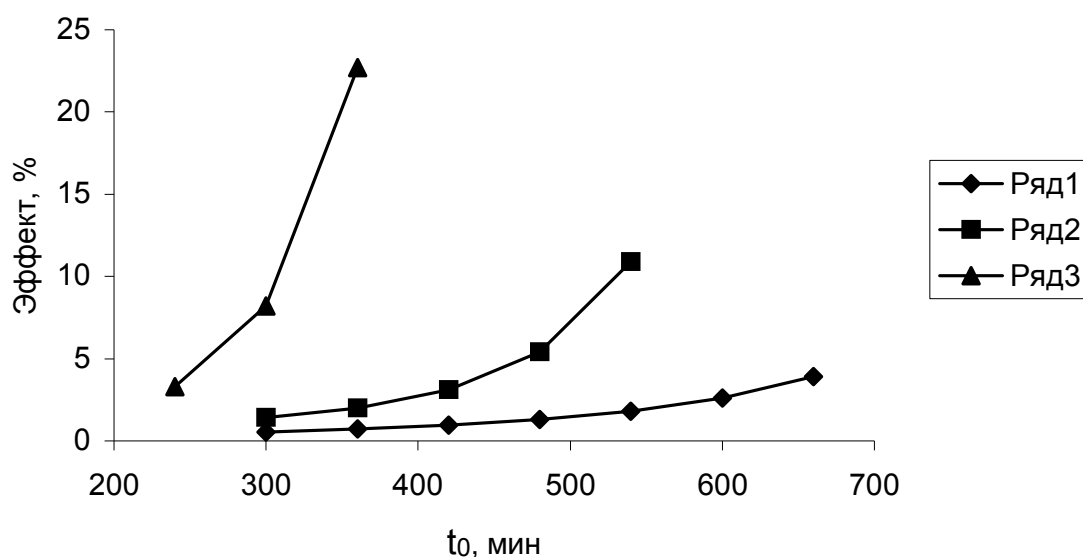


Рис. 9. Зависимость величины эффекта от времени начала тушения. Линии: 1 – $\alpha = 0,5$; 2 – $\alpha = 0,6$; 3 – $\alpha = 0,7$

Видно, что оптимальной тактикой тушения в условиях дефицита сил пожаротушения, является тактика, направленная на первоочередное тушение фронта пожара с первоначальным расположением сил на левом фланге, примерно под углом 30^0 по отношению к направлению скорости ветра (рис. 11).

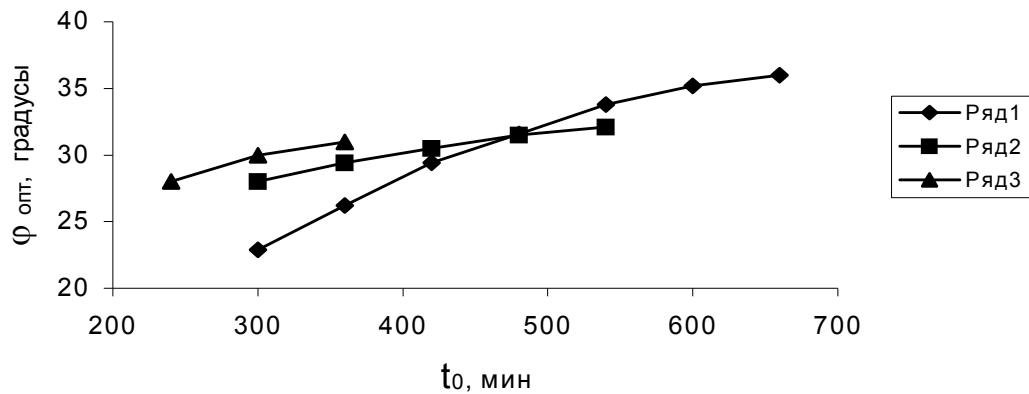


Рис. 10. Зависимость оптимального угла начального местоположения от времени начала тушения. Линии: 1 – $\alpha = 0,5$; 2 – $\alpha = 0,6$; 3 – $\alpha = 0,7$.

Тактика же основанная на продвижении сил пожаротушения с фланга в тыл, наоборот приведет к увеличению времени, и, соответственно, материальных и трудозатрат по ликвидации низового лесного пожара.

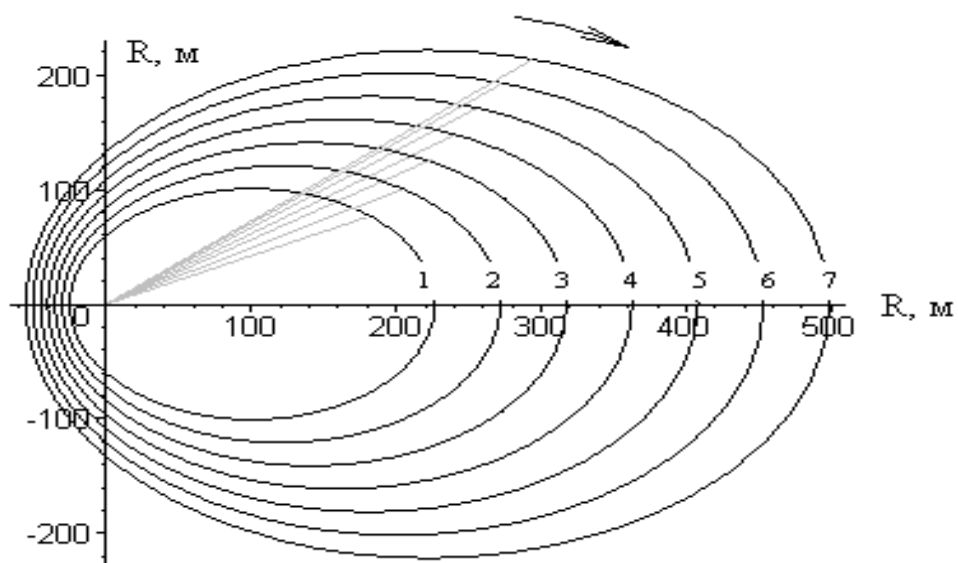


Рис.11. Оптимальный угол и направление для разных моментов начала тушения

Выводы. Предлагаемый подход и приводимый пример демонстрирует возможность решения обширного класса задач по оптимизации интегральных характеристик низового лесного пожара (времени тушения, ущерба, количества привлекаемых сил и средств, выбора той

или иной тактики тушения) и вытекающих отсюда принимаемых решений по тактике тушения низовых лесных пожаров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев О.Ю. Среднемерное моделирование. М.: Наука, 1984. – 136 с.
2. Доррер Г.А. Оценка статистических характеристик контуров лесных пожаров // ФГВ.- 1978.- № 2.- С. 71-76.
3. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. М.: Стройиздат, 1987. – 288 с.
4. Курбатский Н.П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М: Гослесбумиздат, 1962. – 154 с.
5. Ключ П.П и др. Пожежна тактика. Харків: Основа, 1989. – 592 с.
6. Доррер Г.А. Теория распространения пожара как волнового процесса: Автореф.дис...д-ра техн. наук: 06.03.03./ ИЛиД СО АН СССР.- Красноярск, 1989.- 45 с.
7. Абрамов Ю.А., Мигунова Л.В., Тарасенко А.А. Исследование процессов распространения лесного пожара методами стохастического анализа. // Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. тр.- Юбилейный вып. - Харьков: Фолио, 2003. – С. 65-73.
8. Басманов А.Е. Созник А.П., Тарасенко А.А. Экспериментально-аналитическая модель скорости распространения низового лесного пожара Проблемы пожарной безопасности. Сб. научн. тр. АПБ Украины, Вып. 11– Харьков: Фолио, 2002.–С. 17-25.
9. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: В 3 т. Т. II. – 8-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 864 с.
10. Покровский Р.А. Раннее обнаружение очагов ландшафтных пожаров и прогноз динамики их распространения. Дис... канд. техн. наук: 21.06.02. – Харьков, 2002. - 221 с.
11. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. М.: Лесная. пром-ть, 1979.- 161 с.
12. Телицын Г.П. Зависимость скорости распространения низовых пожаров от условий погоды.// Сб. Тр. ДальНИИЛХ. - 1965. Вып. 7. - С. 390 – 405
13. Дыгало А.Н. Идентификация моделей скорости распространения фронта лесного пожара и их практическое приложение: Дисс. канд. техн. наук: 21.06.02. – Харьков, 2003. – 182 с.