

Абрамов Ю.А., Тарасенко А.А
Университет гражданской защиты Украины

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОБЛАСТИ ПРИРОДНОГО ПОЖАРА

Предложена модель активной локализации области природного пожара на основании прогноза динамики его контура. Модель позволяет находить длину маршрута сил пожаротушения при проведении локализационных работ.

The offered model to active localization of the area of the natural fire on the grounds of forecast speaks his sidebar. The model allows to find the length of the route of power when undertaking work.

Постановка проблемы. Активная локализация природного пожара предполагает непосредственное тушение огня, при этом силы пожаротушения осуществляют движение вдоль кромки. Поскольку при этом контур пожара является динамическим, то силы пожаротушения вынуждены двигаться вдоль некоторой кривой - маршрута движения сил пожаротушения при проведении активной локализации [1].

При тушении пожара только лишь активными методами выгоревшая область со всех сторон будет охвачена локализационными кривыми, которые, таким образом, определяют площадь выгоревшей области и ущерб, нанесенный пожаром. Расчет необходимого количества огнетушащего вещества, сил и средств пожаротушения для успешной локализации пожара требует нахождения совокупной длины локализационных кривых. Решение данной задачи возможно лишь при создании модели маршрута локализации.

Анализ существующих решений. Полученные в [2,3] описания траектории движения сил пожаротушения не учитывают дифференциальный характер скорости локализации. Кроме того, будучи заданным в полярной системе координат, контур пожара [2] не описывает распространение пожара в пространственно неоднородных ландшафтно-метеорологических условиях, а в [3] не учитывается рельеф местности.

Постановка задачи и ее решение. Задача получения маршрута движения сил пожаротушения при активной локализации и нахождение его протяженности является нерешенной в общем виде.

Пусть задана система декартовых координат XOY и имеется континуальный прогноз динамики параметрически заданной проекции замкнутого контура природного пожара [4]

$$L(m;t) = \begin{cases} X(m;t) = \sum_{i=0}^{I-1} \left(X(m;t_i) + \frac{t-t_i}{\Delta t} [X(m;t_{i+1}) - X(m;t_i)] \right) \theta(t;t_i;t_{i+1}); \\ Y(m;t) = \sum_{i=0}^{I-1} \left(Y(m;t_i) + \frac{t-t_i}{\Delta t} [Y(m;t_{i+1}) - Y(m;t_i)] \right) \theta(t;t_i;t_{i+1}), \end{cases} \quad (1)$$

где введено обозначение $\theta(t;t_i;t_{i+1}) \equiv \eta(t-t_i) - \eta(t-t_{i+1})$; $\eta(t)$ - функция Хэвисайда; $\Delta t = t_{i+1} - t_i$; t - время. При этом пусть для определенности рост параметра $m \in [1;M]$ приводит к отрицательному направлению обхода контура $L(m;t)$.

В каждой точке $(m;t)$ контура $L(m;t)$ в момент времени t можно получить координаты вектора внешней нормали $\vec{n}(m;t)$

$$\vec{n}(m;t) = [n_x(m;t); n_y(m;t)] = \left[\frac{-\partial Y(m;t)}{\partial m} / |\vec{n}(m;t)|; \frac{\partial X(m;t)}{\partial m} / |\vec{n}(m;t)| \right], \quad (2)$$

$$\text{где } |\vec{n}(m;t)| = \sqrt{\left(\frac{\partial X(m;t)}{\partial m} \right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m;t)}{\partial m} \right)^2}.$$

Величина нормальной скорости $V_n(m;t)$ движения контура в точке $(m;t)$ представляет собой производную от $L(m;t)$ по времени t в направлении нормали $\vec{n}(m;t)$

$$V_n(m;t) = \frac{\partial X(m;t)}{\partial t} n_x(m;t) + \frac{\partial Y(m;t)}{\partial t} n_y(m;t). \quad (3)$$

Для каждого из видов используемых средств пожаротушения введем скорость тушения кромки пожара V_{loc} , которая функционально зависит от крутизны склона $\alpha(\varphi)$ в азимутальном направлении φ , совпадающим с

направлением движения средства локализации вдоль контура пожара и от нормальной скорости распространения кромки в виде

$$V_{loc}(x; y; m; t; \varphi; V_n(m; t)) = \begin{cases} \begin{cases} 0, & \text{если } \alpha(x; y; \varphi) \geq \alpha_{кр}; \\ V_{local}(x; y; \alpha(\varphi)) \cdot f(V_n(m; t)), & \text{если } \alpha(x; y; \varphi) < \alpha_{кр}; \end{cases} & \text{если } V_n(x; y) > 0. \\ \begin{cases} 0, & \text{если } \alpha(x; y; \varphi) \geq \alpha_{кр}; \\ V_{march}(x; y; \alpha(\varphi)), & \text{если } \alpha(x; y; \varphi) < \alpha_{кр}; \end{cases} & \text{если } V_n(x; y) = 0; \end{cases} \quad (4)$$

При этом выражения $V_{march}(x; y; \alpha(\varphi))$ и $V_{local}(x; y; \alpha(\varphi))$ задают, соответственно, поля годографов маршевой скорости и скорости локализации используемого технического средства пожаротушения в данных ландшафтно-метеорологических условиях и не зависят от вида контура пожара.

Вводя выражения для $V_{march}(x; y; \alpha(\varphi))$ и $V_{local}(x; y; \alpha(\varphi))$, будем полагать, что скорости движения по равнинному рельефу равны заявляемым в ТТХ скоростям марша V_{MARCH} и локализации V_{LOC} , соответственно, а скорость вверх и вниз по склону ниже. В этом случае годографы $V_{march}(x; y; \alpha(\varphi))$ и $V_{local}(x; y; \alpha(\varphi))$ будут представлять собой эллипсы с центром в текущей точке, ориентированные большими полуосями V_{MARCH} и V_{LOC} перпендикулярно градиенту рельефа. При этом величина малой полуоси тем меньше, чем больше крутизна склона.

Зададим поверхность рельефа в явном виде $Z(x; y)$. Угол ψ , перпендикулярный углу, который образует градиент высоты в точке $(x_0; y_0)$ и вдоль которого ориентирована большая полуось, равен

$$\psi(x_0; y_0) = \arctg \left(\frac{\partial Z(x; y)}{\partial y} \Big|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}}; \frac{\partial Z(x; y)}{\partial x} \Big|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} \right) - \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Величина угла склона в направлении градиента равна

$$\alpha_{\max}(x_0; y_0) = \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\left(\left. \frac{\partial Z(x; y)}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} \right)^2 + \left(\left. \frac{\partial Z(x; y)}{\partial y} \right|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} \right)^2}; 1 \right) \quad (6)$$

Параметрическое уравнение эллипса l с центром в точке $(x_0; y_0)$, большой полуосью a , ориентированной под углом ψ к оси OX , малой полуосью b и параметром $\varphi \in [0; 2\pi]$, отмеряемым от оси OX , имеет вид

$$l = \begin{cases} x_0 + \rho \cos \varphi; \\ y_0 + \rho \sin \varphi, \end{cases} \quad \text{где} \quad \rho = \frac{b^2 (\cos(\varphi - \psi) \sqrt{a^2 - b^2} + a)}{\cos(\varphi - \psi) b^2 + \sin(\varphi - \psi) a^2}. \quad (7)$$

Полагая в (7), соответственно, $a = V_{\text{MARCH}}(x_0; y_0)$ и $a = V_{\text{LOC}}(x_0; y_0)$; $b = f(\alpha_{\max}(x_0; y_0))$, получим выражения для поля годографов маршевой скорости и скорости локализации в каждой точке $(x; y)$, само же значение скорости (и маршевой, и локализации) задается выражением для $\rho(x_0; y_0)$. Вид функции $b = f(\alpha_{\max}(x_0; y_0))$ для каждого из используемых средств пожаротушения может быть получен на основе его тактико-технических характеристик.

Функция $f(V_n(m; t))$, задаваемая континуальным прогнозом динамики контура, определяет влияние величины нормальной скорости распространения кромки пожара на скорость локализации.

Величина $\alpha_{\text{кр}}$ определяет предельный допустимый угол наклона средства пожаротушения при его движении по рельефу и также может быть получен на из его тактико-технических характеристик.

В работе [5] показано, что интенсивность тепловыделения прямо пропорциональна скорости распространения кромки пожара. Полагая, что скорость локализации обратна интенсивности тепловыделения, получим, что скорость локализации V_{loc} тем ниже, чем выше скорость V_n . Зависимость интенсивности тепловыделения погонного метра кромки пожара от скорости кромки приведена в [5].

Проведение активной локализации возможно лишь до тех пор, пока

выполняется условие

$$V_{\text{loc}}(m;t) \geq V_n(m;t), \quad (8)$$

поэтому рост величины склона или скорости ветра неизбежно приводит к необходимости замены средств пожаротушения на более производительные, либо, при отсутствии таковых, влечет за собой приостановку процесса локализации.

Зависимость (4) является индивидуальной для каждого вида используемых средств пожаротушения.

Начальные условия – время начала тушения, местоположение сил пожаротушения вблизи контура пожара и направление обхода контура (отрицательное или положительное), наряду со скоростью локализации определяют конкретный вид локализационной кривой, выделяя ее из возможного семейства.

Зададим начальные условия – декартову точку $(x_0; y_0)$ начала локализации. Данному начальному условию соответствует точка $(m_0; t_0)$ семейства контуров $L(m;t)$, которую можно найти из решения системы уравнений

$$\begin{cases} X(m_0; t_0) = x_0; \\ Y(m_0; t_0) = y_0. \end{cases} \quad (9)$$

Интерполяция прогноза динамики контура (1) позволяет найти вид контура в произвольный момент времени. Поэтому зададим произвольный малый (конечный) шаг по времени Δt . За это время контур $L(m; t_0)$ перейдет в контур $L(m; t_0 + \Delta t)$, силы пожаротушения переместятся на расстояние $V_{\text{loc}}(V_n(m_0; t_0)) \cdot \Delta t$, точка $(m_0; t_0)$ - в одну из двух возможных точек $(m'_1; t_0 + \Delta t)$ или $(m''_1; t_0 + \Delta t)$ (рис. 1).

Необходимо найти координаты m'_1 и m''_1 .

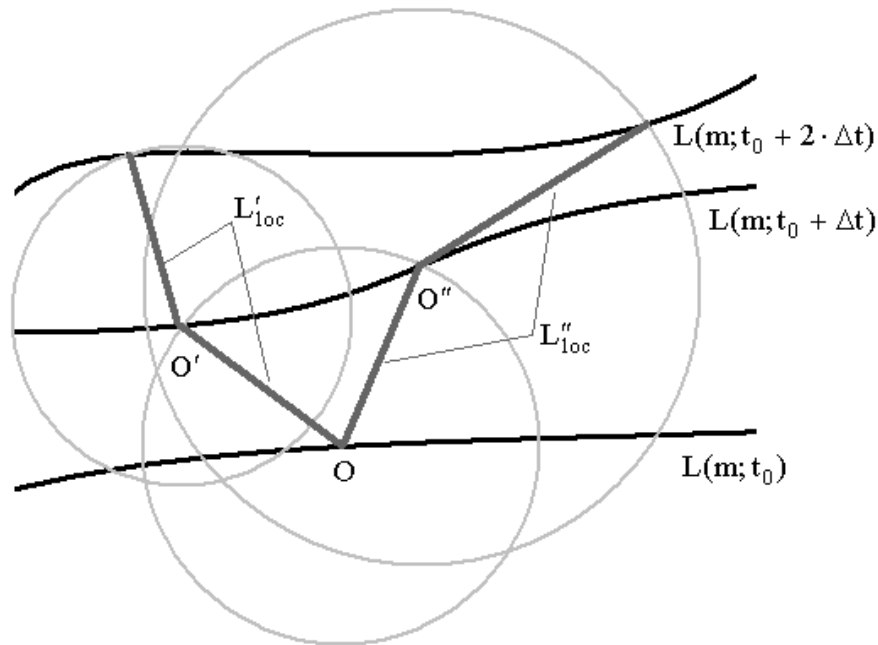


Рис. 1. Возможные маршруты движение сил пожаротушения при тушении кромки природного пожара (в равнинных условиях). Точки $O(m_0; t_0)$, $O'(m'_1; t_0 + \Delta t)$ $O''(m''_1; t_0 + \Delta t)$.

Очевидно, что данные значения удовлетворяют условию (см. рис. 1)

$$\begin{aligned} & [X(m_1; t_0 + \Delta t) - X(m_0; t_0)]^2 + [Y(m_1; t_0 + \Delta t) - Y(m_0; t_0)]^2 = \\ & = [V_{loc}(V_n(m_0; t_0); \varphi) \cdot \Delta t]^2. \end{aligned} \quad (10)$$

При этом угол φ является углом направления движения сил пожаротушения при локализации пожара. Его значение равно

$$\varphi(m_0; t_0) = \arctg \left(\frac{Y(m_1; t_0 + \Delta t) - Y(m_0; t_0)}{X(m_1; t_0 + \Delta t) - X(m_0; t_0)} \right). \quad (11)$$

Подставляя данное выражение в предыдущее, и численно решая полученное уравнение, можно найти маршрут сил пожаротушения за интервал времени Δt в положительном или отрицательном направлениях обхода контура пожара.

Задание прогноза динамики контура пожара, конкретного вида зависимостей для годографов скорости, начальных условий и временного шага в качестве входных параметров данной модели позволяет найти

маршруты сил пожаротушения при локализации очага природного пожара в виде ломаных линий L'_{loc} и L''_{loc} при циклическом повторе указанной процедуры (рис. 2).

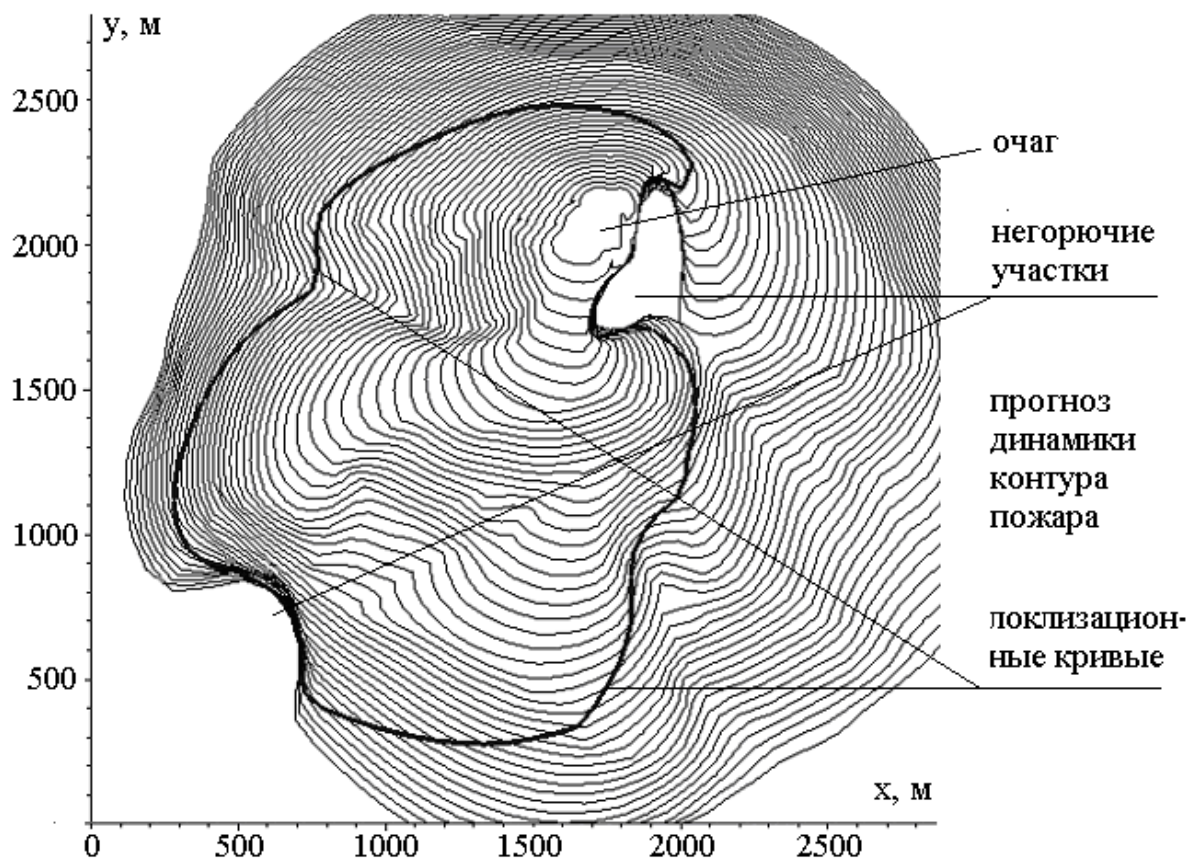


Рис. 2. Получение маршрута локализации для двух подразделений от опорного барьера с замыканием на негорючем препятствии

При этом, для получения локализационной линии в положительном или отрицательном направлениях обхода контура пожара необходимо для каждого i -ого цикла из двух возможных решений уравнения (10) выбирать соответственно либо m'_i , либо m''_i .

Зная локализационную ломаную, длину маршрута локализации можно найти как

$$l_{loc} = \Delta t \cdot \sum_{i=0}^I V_{loc}(m_i; t_i) \quad (12)$$

Выводы. Получены модели маршрута активной локализации области природного пожара и его протяженности. Данные модели в дальнейшем позволят осуществить процесс оптимизации тактики локализации пожара.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курбатский Н.П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М.: Гослесбумиздат, 1962.- 154 с.
2. Кривошлыков С.Ф. Алгоритм минимизации времени локализации простого ландшафтного пожара. Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту: між нар. наук.-практ. конф., 12-13 трав. 2006 р.: тези доп. – Черкаси, 2006. – С. 32-33.
3. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. М.: Лесная промышленность, 1979. – 81 с.
4. Абрамов Ю.А., Тарасенко А.А. Континуальная модель динамики контура природного пожара // Проблемы пожарной безопасности. Зб. наук. пр. УЦЗ України. Вип. 25. - Харків: УЦЗУ, 2009. - С. 3-5.
5. Вонский С.М. Интенсивность огня низовых лесных пожаров и ее практическое значение. – Ленинград: ЛенНИИЛХ, 1957. - 27 с.