

*Ю.А. Абрамов, докт. техн. наук, профессор, НУГЗУ,
А.А. Тарасенко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НУГЗУ,
О.Е. Безуглов, нач. кафедры, НУГЗУ*

МАРШРУТ ДВИЖЕНИЯ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ НАЗЕМНОГО ЛАНДШАФТНОГО ПОЖАРА

Получена модель маршрута движения подразделения при ликвидации наземного ландшафтного пожара с учетом влияния природных факторов на производительность подразделений. Показано, что площадь и периметр пожара определяется параметрами избранной тактики пожаротушения

Ключевые слова: ландшафтный пожар, граница области пожара

Постановка проблемы. Характер борьбы с наземным ландшафтным пожаром обусловлен горением на кромке, что приводит к необходимости ведения боевых действий по периметру области (дотушивание очагов горения на территории пожарища наземного ландшафтного пожара, в отличие от верхового и особенно повального лесного пожара, не является обязательным элементом его ликвидации). Поэтому силы пожаротушения двигаются вдоль динамической границы пожара (с внешней ее стороны) либо непосредственно вблизи нее, либо на расстоянии не большем дальности подачи струи из вводимых для тушения стволов (при тушении водой). Подразделения, осуществляющие локализацию, создавая противопожарный барьер, в основном двигаются вдоль границы пятидесятиметровой зоны [1], которая расширяется вместе с пожаром.

Перемещаясь вдоль динамической кромки пожара со скоростью (производительностью), определяемой тактическими возможностями, параметрами ландшафта и интенсивностью пожара, подразделения прокладывают маршрут, длина которого определяет временные и трудовые затраты на локализацию/тушение, а также расходы огне-тушащего вещества и горючего (при использовании автосредств или зажигательных аппаратов), т.е. косвенный ущерб от пожара.

Территория, границей которой являются данные маршруты при их замыкании, представляет собой область ликвидированного пожара. Ее площадь определяет прямой ущерб от пожара. Варьирование тактических приемов, способов тушения, порядка введения сил и средств пожаротушения в очаг способно привести к различной конфигурации границы области пожара. Поэтому определение совокупного ущерба от пожара и выработка оптимальных управленческих

решений по его ликвидации возможно лишь в случае нахождения границ области пожара.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [2] получены маршруты локализации пожара при одностороннем обходе очага. В [3-4] приведены модели двустороннего охвата очага. Во всех случаях не учитывается влияние параметров ландшафта и интенсивности пожара на производительность сил и средств.

Постановка задачи и ее решение. Необходимо получить траекторию движения БЕ при осуществлении ею боевых действий.

Пусть имеется континуальный прогноз [5] свободной динамики параметрически заданного контура пожара в виде

$$L(m; t) = \begin{cases} X(m; t); \\ Y(m; t), \end{cases} \quad (1)$$

где m - параметр; t - время.

Пусть задана векторно-функциональная модель [6] годографа радиус-вектора скорости $V_T(x; y; \varphi)$ движения i -ой боевой единицы (БЕ) (подразделения МЧС, лесопожарной бригады, отдельного бойца) в азимутальном направлении φ при проведении БЕ тушения (локализации), учитывающая топографию местности и свойства подстилающей поверхности.

Рассмотрим получение траектории движения БЕ на примере тушения пожара (локализация осуществляется также, но с заменой контура пожара на контур зоны безопасной локализации и годографа скорости тушения на годограф скорости локализации).

За время Δt точка $A(m; t)$ контура со скоростью, задаваемой годографом радиус-вектора нормальной скорости $V(X(m; t); Y(m; t); \varphi)$ [7], переместится в точку $B(m; t + \Delta t)$ (рис. 1) на расстояние

$$\Delta S = \sqrt{(X(m; t + \Delta t) - X(m; t))^2 + (Y(m; t + \Delta t) - Y(m; t))^2}. \quad (2)$$

При этом силы пожаротушения за это же время, двигаясь со скоростью, определяемой годографом скорости движения $V_T(X(m; t); Y(m; t); t; \varphi; I)$ [4] (где I - интенсивность пожара), переместятся вдоль AC на расстояние

$$\Delta S_T = \sqrt{(X(m + \Delta m; t + \Delta t) - X(m; t))^2 + (Y(m + \Delta m; t + \Delta t) - Y(m; t))^2} \quad (3)$$

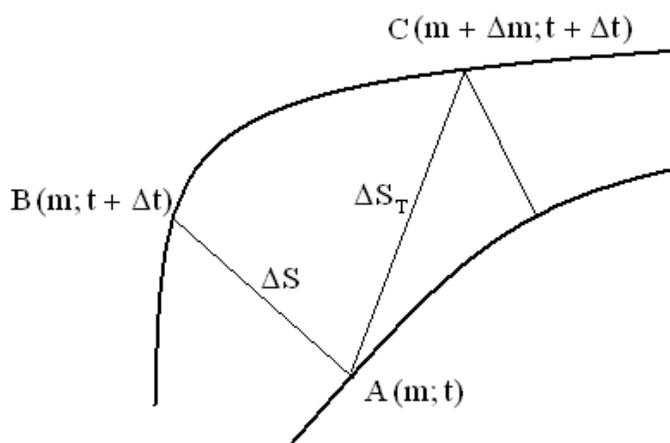


Рис. 1 - Нахождение маршрута движения сил пожаротушения

В силу того, что с точностью до линейных членов

$$f(x + \Delta x; y) = f(x; y) + \frac{\partial f(x; y)}{\partial x} \Delta x; \quad (4)$$

$$f(x + \Delta x; y + \Delta y) = f(x; y) + \frac{\partial f(x; y)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f(x; y)}{\partial y} \Delta y, \quad (5)$$

из (2) и (3) получим

$$\Delta S = \sqrt{\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial t} \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m; t)}{\partial t} \Delta t\right)^2}; \quad (6)$$

$$\Delta S_T = \sqrt{\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial X(m; t)}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m; t)}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial Y(m; t)}{\partial m} \Delta m\right)^2}. \quad (7)$$

Перемещение точки контура пожара вдоль АВ
 $A(m; t) \rightarrow B(m; t + \Delta t)$ осуществляется с нормальной скоростью

$$V(m; t) = \sqrt{\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m; t)}{\partial t}\right)^2}, \quad (8)$$

а перемещение сил пожаротушения вдоль АС $A(m; t) \rightarrow C(m + \Delta m; t + \Delta t)$ осуществляется вдоль направления χ со скоростью, определяемой в общем виде величиной годографа радиус-вектора скорости тушения V_T . Направление χ при этом задается выражением

$$\chi = \arctg(Y(m + \Delta m; t + \Delta t) - Y(m; t), X(m + \Delta m; t + \Delta t) - X(m; t)). \quad (9)$$

Поделив (6) и (7) на Δt и осуществив предельный переход $\Delta t \rightarrow 0$, влекущий за собой $\Delta m \rightarrow 0$ (ввиду неразрывности $X(m; t)$ и $Y(m; t)$), получим

$$\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m; t)}{\partial t}\right)^2 = V^2, \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial t} + \frac{\partial X(m; t)}{\partial m} \frac{\partial m}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m; t)}{\partial t} + \frac{\partial Y(m; t)}{\partial m} \frac{\partial m}{\partial t}\right)^2 = V_T^2. \quad (11)$$

Объединяя (10) и (11), получим уравнение

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial m}{\partial t}\right)^2 \left(\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial m}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m; t)}{\partial m}\right)^2 \right) + 2 \frac{\partial m}{\partial t} \left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial t} \frac{\partial X(m; t)}{\partial m} + \frac{\partial Y(m; t)}{\partial t} \frac{\partial Y(m; t)}{\partial m} \right) + \\ & + (V^2 - V_T^2) = 0, \end{aligned} \quad (12)$$

решая которое относительно $\frac{\partial m}{\partial t}$, получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial m}{\partial t} = & \left(\pm \left[\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial t} \frac{\partial X(m; t)}{\partial m} + \frac{\partial Y(m; t)}{\partial t} \frac{\partial Y(m; t)}{\partial m} \right)^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. + \left(\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial m} \right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m; t)}{\partial m} \right)^2 \right) (V_T^2 - V^2) \right]^{1/2} - \right. \\ & \left. - \left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial t} \frac{\partial X(m; t)}{\partial m} + \frac{\partial Y(m; t)}{\partial t} \frac{\partial Y(m; t)}{\partial m} \right) \right) / \left(\left(\frac{\partial X(m; t)}{\partial m} \right)^2 + \left(\frac{\partial Y(m; t)}{\partial m} \right)^2 \right), \end{aligned} \quad (13)$$

где знак перед корнем определяет положительное либо отрицательное направления обхода контура пожара силами пожаротушения.

Уравнение (12) допускает аналитическое решение лишь в случае постоянства скорости распространения (т.е. в условиях равнины, безветрия и однородного слоя РГМ) и тушения пожара, что позволяет рассматривать данный случай как тестовый и использовать его для определения параметров численной процедуры.

Поскольку сложность описаний параметров ландшафта, контура пожара и годографов скорости распространения и тушения пожара исключают в общем случае аналитическое построение маршрута движения БЕ, то данный маршрут предлагается строить, используя разностную схему. При этом необходимо учесть зависимость скоро-

сти тушения от параметров ландшафта и очага пожара. Задание прогноза динамики контура пожара, годографа скорости тушения, начальных условий и временного шага в качестве входных параметров данной модели позволяет найти маршруты сил пожаротушения при тушении или локализации очага природного пожара в виде ломаных линий с координатами вершин, задаваемых множеством $\{(x_i; y_i)\}_{i=1..M}$. При этом, задавая время продолжительности тушения $T_T \geq \Delta t$, можно, циклически повторяя описанную процедуру, получить уравнение $L_T^\pm(m; t)$ проекции маршрута БЕ за $M = \lceil T_T / \Delta t \rceil$ шагов в виде параметрической линейной сплайн-интерполяции множества полученных вершин

$$L_T^\pm(m; t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{M-1} [x_i + (x_{i+1} - x_i)(m - i)] \cdot (\eta(m - i) - \eta(m - i - 1)); \\ \sum_{i=1}^{M-1} [y_i + (y_{i+1} - y_i)(m - i)] \cdot (\eta(m - i) - \eta(m - i - 1)), \end{cases} \quad (14)$$

где $\eta(m)$ - функция Хэвисайда.

Очевидно, что локализация может быть названа законченной в случае прекращения движения контура пожара. Полученный в результате контур ограничивает проекцию области пожара и описывается замкнутой ломаной с вершинами, задаваемым множеством точек $L_T = \{(x_m; y_m)\}_{m=1..M}$.

Зная массив вершин маршрута движения БЕ, можно получить величину периметра пожара (длину маршрута движения БЕ) в виде

$$P = \sum_{i=1}^{M-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}. \quad (15)$$

Площадь проекции области пожара может быть вычислена как [8]

$$S = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{M-1} (x_{m+1} - x_m)(y_{m+1} + y_m). \quad (16)$$

Использование разностной схемы всегда сопряжено с влиянием на результат вычислений разностного шага. Очевидно, что выбор величины шага Δt влияет на точность нахождения маршрута, поскольку происходит его спрямление отрезками ломаной тем большее, чем больше величина Δt .

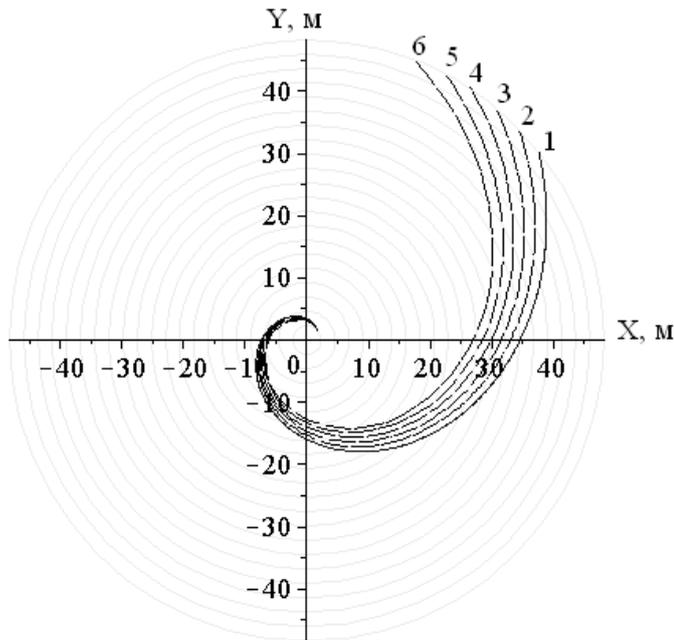


Рис. 2 - Результат вычисления маршрута движения БЕ при тушении идеализированного очага пожара. 1-точное решение; 2-6 – приближенные решения при $\Delta t = 0.1 \cdot (k-1)$ (мин), $k=2 \dots 6$

Оценить данную точность можно сравнением приближенного решения (14) и точного решения уравнения (13), которое имеет место в случае радиального роста области пожара и постоянства скорости тушения и, как можно убедиться, представляет собой логарифмическую спираль.

На рис. 2 приведен маршрут движения БЕ в случае тушения идеализированного очага, являющийся результатом решения (13) и аналогичные маршруты, полученные с помощью разностной схемы при различной величине шага Δt .

На рис. 3 приведен график относительной погрешности W имеющей место при определении площади пожара, односторонне охваченной маршрутом движения БЕ, в зависимости от величины шага Δt . Видно, что с увеличением шага происходит быстрый рост погрешности.

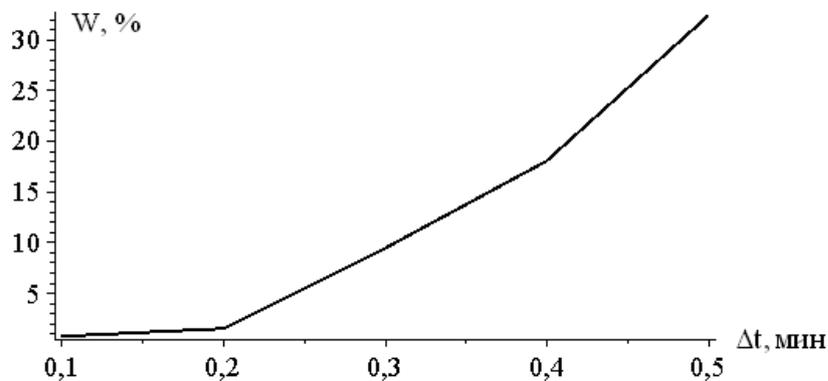


Рис. 3 - График зависимости погрешности по площади от величины Δt

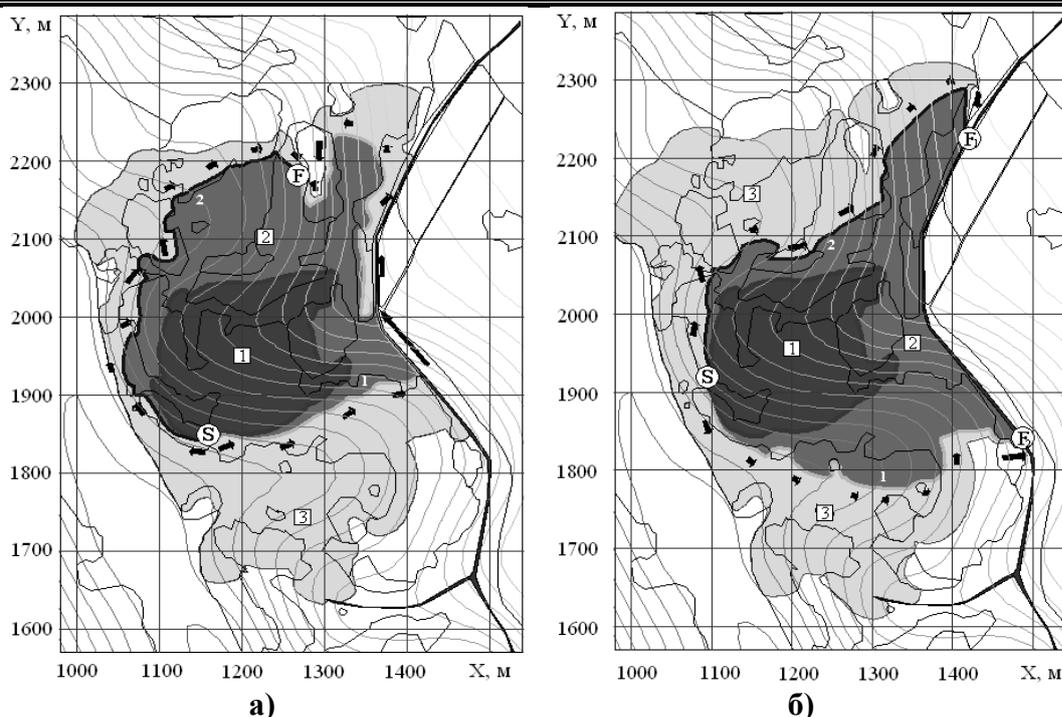


Рис. 4 – Расчет области пожара при двух различных вариантах ввода пары БЕ: 1-очаг пожара; 2-область ликвидированного пожара; 3-прогноз свободного развития пожара на момент окончания тушения а) $S = 9.1$ га, $P = 1.5$ км; б) $S = 10.0$ га, $P = 1.7$ км

В связи с этим, использование итерационной процедуры для нахождения маршрута движения БЕ должно осуществляться с достаточно малым временным шагом. Выбор $\Delta t = 0.2$ мин обеспечивает различие по площади между точным и приближенным решениями в пределах 1.5%.

Для того чтобы обеспечить возможность столь подробного прохождения, необходимо располагать уравнениями контура пожара в каждый момент времени $\Delta t \cdot i$. Наличие континуальной модели динамики контура (1) позволяет это сделать путем подстановки в качестве t значений $\Delta t \cdot i$.

Результат применения процедуры (1)-(14) с учетом влияния параметров ландшафта и интенсивности пожара на скорость тушения проиллюстрирован на рис. 4, который демонстрирует влияние выбора параметров тактики тушения на метрические характеристики области пожара.

Вывод. Получена аналитическая модель маршрута движения подразделения при ликвидации ландшафтного пожара. Осуществлена процедура численного нахождения данного маршрута при учете влияния топографии местности, свойств подстилающей поверхности и интенсивности пожара на производительность подразделений. Показано, что на метрические характеристики ликвидированного пожара оказывает влияние место ввода в очаг пожара сил и средств пожаротушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров. – М.: ФСЛХ РФ, 1995. – 102 с.

2. Доррер Г.А. Теория распространения пожара как волнового процесса: Автореф. дисс.... д-ра техн. наук / ИЛД СО АН СССР. – Красноярск, 1989. – 45 с.

3. Кривошлыков С.Ф. Алгоритм минимизации времени локализации простого ландшафтного пожара // Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту: Міжнар. наук.-практ. конф. Черкаси, 12-13 травня 2006 р. – Черкаси: ІПБ. - 2006. – С. 32-33.

4. Абрамов Ю.А. Расчет параметров локализации области природного пожара / Ю.А. Абрамов, А.А. Тарасенко // Науковий вісник будівництва. - 2009. - Вип. 53. – С. 257-762.

5. Абрамов Ю.А. Континуальная модель динамики контура природного пожара / Ю.А. Абрамов, А.А. Тарасенко // Проблемы пожарной безопасности. - 2009. - Вып. 25. – С. 3-5.

6. Тарасенко О.А. Математичне моделювання вихідних параметрів областей надзвичайних ситуацій // Проблеми надзвичайних ситуацій. - 2008. - Вип. 8. - С. 185-193.

7. Тарасенко А.А. Модель динамики контура природного пожара под действием совместного влияния ландшафтно-метеорологических факторов // Проблемы пожарной безопасности. - 2008. – Вып. 24. - С. 194-200.

8. Андреева Е.В. Вычислительная геометрия на плоскости / Е.В. Андреева, Ю.Е. Егоров // Информатика. – 2002. - №40. – С. 28-31.
nuczu.edu.ua

Ю.О. Абрамов, О.А. Тарасенко, О.Є. Безулов

МАРШРУТ РУХУ ПІДРОЗДІЛІВ ПРИ ЛІКВІДАЦІЇ НАЗЕМНОЇ ЛАНДШАФТНОЇ ПОЖЕЖІ

Отримано модель маршруту руху підрозділу при ліквідації наземної ландшафтної пожежі з урахуванням впливу природних факторів на продуктивність підрозділів. Показано, що площа і периметр пожежі визначаються параметрами обраної тактики пожежогасіння

Ключові слова: ландшафтна пожежа, границя області пожежі

Y.A. Abramov, A.A. Tarasenko, O.E Bezuglov

MAN FORCES MOVING ROUTE FOR SURFACE LANDSCAPE FIRE ELIMINATION

The model of moving route of man forces for landscape fire elimination is present. It considers influence of environmental factors on productivity units. It is shown that the area and perimeter of the fire is determined by the parameters of the chosen tactics of firefighting.

Keywords: landscape fire, boundary of the fire.