

Запобігання та ліквідація надзвичайних ситуацій

УДК 614.8

А.Я. Калиновський¹, І.А. Чуб¹, Т.М. Обіженко²

¹ Національний університет цивільного захисту України, Харків

² Харківський національний університет будівництва і архітектури, Харків

ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАНДШАФТНОЇ ПОЖЕЖІ З УРАХУВАННЯМ НЕОДНОРІДНОЇ ВОЛОГОСТІ ЛІСОВОГО ПАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ

Розроблені математичні моделі для визначення геометричних характеристик ландшафтної пожежі в залежності від параметрів пального матеріалу. Запропоновані формули для знаходження периметру і площі ландшафтної пожежі, що враховують неоднорідну вологість пального матеріалу.

Ключові слова: ландшафтна пожежа, геометричні характеристики ландшафтної пожежі, математична модель зміни форми та площі ландшафтної пожежі, неоднорідна вологість лісового пального матеріалу.

Вступ

Постановка проблеми. Ландшафтні пожежі є однією з найпоширеніших природних надзвичайних ситуацій на території України. Основну небезпеку для життєдіяльності людини і найбільші збитки при цьому приносять лісові пожежі та пожежі на сільськогосподарських угіддях.

Для зниження збитків від пожежі, що вже виникла, необхідно проводити науково обґрунтовані оперативні-тактичні заходи щодо локалізації та гасіння пожежі. Вони, в свою чергу, повинні базуватися на моделюванні закономірностей виникнення і розвитку пожежі, а також урахувати особливості зміни геометричних характеристик пожежі в залежності від параметрів пального матеріалу. Але на теперішній час є недостатньо розвинутим моделювання процесів керованого впливу на ландшафтну пожежу, зокрема, її локалізацію. Це обумовлено відсутністю моделей розповсюдження крайки пожежі, а також динаміки площі пожежі з урахуванням його вологості.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. На сьогодні існує досить велика кількість робіт, в яких розглядаються математичні моделі, що описують різноманітні процеси і параметри, які притаманні ландшафтним (особливо лісовим) пожежам. Ці моделі запропоновані в роботах А.М. Гришина [1], Г.А. Доррера [2], Г.П. Теліцина [3] та ін.

Дослідження з цієї тематики проводяться в Україні Ю.О. Абрамовим і О.А. Тарасенком [4], В.О. Комяком та Р.Л. Покровським [5].

Аналіз літературних джерел показав, що, незважаючи на гостру потребу, досліджень, спрямованих на побудову математичних моделей динаміки розповсюдження пожежі, практично немає.

В зв'язку з цим є актуальною моделювання геометричних характеристик ландшафтної пожежі в залежності від параметрів пального матеріалу.

Мета роботи. Метою роботи є моделювання зміни периметру і площі лісової пожежі, що враховують неоднорідну вологість лісового пального матеріалу (ЛПМ).

Постановка задачі та її розв'язання

Контур пожежі в довільний момент часу t описується [6] безперервною і однозначною функцією $R(V_w, \psi, \varphi, t)$ від змінної φ , де V_w – швидкість вітру, φ – полярний кут, ψ – флуктуація напрямку вітру. Знання такої функції дозволяє обчислити площу пожежі $S(V_w, \psi, t)$ і периметр крайки вигорання $P(V_w, \psi, t)$, для яких надано точні формули.

Проте для годографа [6]

$$V(V_w, \varphi) = \frac{b^2 \beta \cos \varphi + \sqrt{b^4 \beta^2 \cos^2 \varphi + a^2 b^2 (a^2 - \beta^2) \sin^2 \varphi}}{b^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi}, \quad (1)$$

де швидкість поширення фронтальної V_f , тилової V_b і флангової V_n крайки пожежі щодо напрямку швидкості вітру V_w , $2a = V_f + V_b$, $b = V_n$, $\beta = (V_f - V_b) / 2$, а полярна вісь збігається з напрямком

ком вітру у випадку простої пожежі й точкового осередку загорання дістаємо

$$S(V_w, t) = \pi a b t^2.$$

При цьому помилка обчислень за точною і наближеною формулами зменшується зі збільшенням часу й для менших значень S_0 ця помилка буде менше. Зокрема, розрахунок площі при $t = 60$ хв і $V_w = 2$ м/с по точній і наближеній формулах для $S_0 = 684$ м² дає помилки, що не перевищують 12% і 8% відповідно, а для $S_0 = 162$ м² – 4% і 2%.

Для периметра контуру пожежі в тих же припущеннях, що й для площ, дістаємо наближений вираз

$$P(V_w, t) \approx \pi(a+b)t,$$

а оцінки для помилок при обчисленні периметра по точній й наближеній формулам виходять приблизно такими ж, як у випадку розрахунку площ.

Результати розрахунків периметрів P і площ S у випадках неоднорідного й анізотропного розподілу вологості, які виконано за точними формулами, представлені на рис. 1.

Початковий осередок загорання має форму кола з радіусом $R = 3$ м, а криві 3 відповідають контуру пожежі при однорідній вологості, що у цьому випадку мають вигляд еліпса.

З рис. 1 і результатів інших наших розрахунків можна зробити такі висновки. Величина периметра P для найпростішої пожежі у формі еліпса з часом t зростає лінійно. Наявність неоднорідного й анізотропного розподілу поля вологості приводить до помітної відмінності від лінійного закону зростання. При цьому в обох випадках відбувається істотне викривлення форм контурів. Площі пожежі з часом зростають за квадратичним законом. Величина площі у випадку зростання вологості збільшується повільніше (крива 1) у порівнянні з однорідним випадком (крива 3) і швидше (крива 2) – у випадку зменшення вологості.

Однак, завдяки тому, що в обох випадках відбувається помітне викривлення форми контурів, довжини периметрів при цьому зростають швидше, ніж у випадку поширення пожежі в однорідній по вологості середовищу (див. криві 1, 2 на рис. 1).

Проведено оцінку матеріального збитку, що наноситься пожежею, при врахуванні анізотропії й неоднорідності вологості й параметрів вітру.

Для оцінки прямого збитку X , скористаємося виразом

$$X = C_0 S(T),$$

де C_0 – вартість згорілого лісу на одиницю площі, а $S(T)$ – площа лісу, що вигоріла до закінчення ліквідації пожежі.

Отже, маємо, що прямий збиток безпосередньо залежить від часу тривалості пожежі.

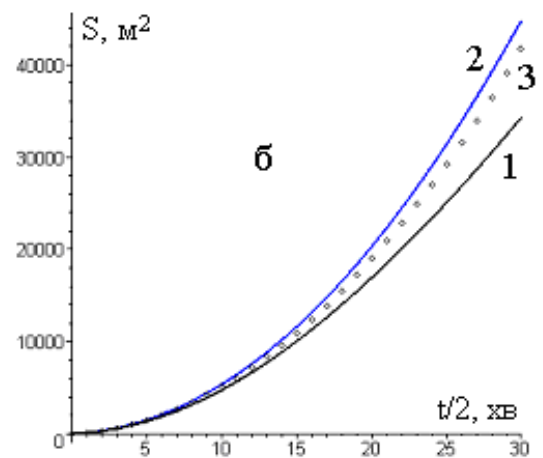
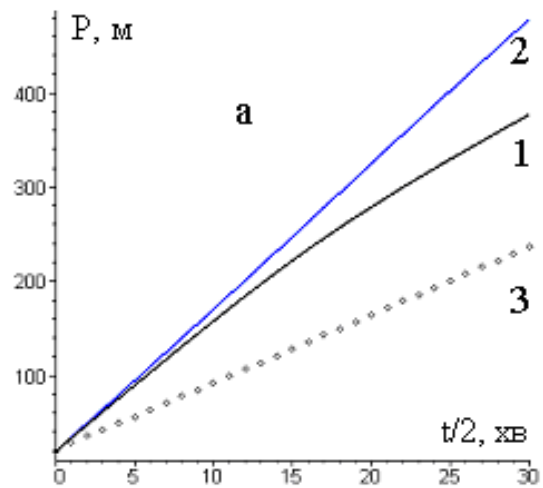


Рис. 1. Графіки залежностей периметра й площі пожежі від часу, які відповідають контурам з урахуванням неоднорідності розподілу вологості ЛПМ: а – $P(t)$, б – $S(t)$; криві 1 відповідають зростанню вологості, криві 2 відповідають убаванню вологості, криві 3 – розрахунок з однорідною вологістю

Периметр лісової пожежі зростає пропорційно часу як $P(t) = \tilde{v}t$, де \tilde{v} – швидкість його збільшення. Тоді в момент часу t_1 початку гасіння маємо

$$P(t_1) = \tilde{v}t_1.$$

З початком робіт з гасіння пожежі швидкість \tilde{v} зменшується й для неї можна прийняти значення $\tilde{v} = \gamma V_T$, де коефіцієнт γ ураховує, що зменшення \tilde{v} пропорційно швидкості гасіння V_T . У цьому припущенні у випадку простої лісової пожежі для площі лісу, що вигорів до закінчення гасіння, дістаємо вираз

$$S(T) = \pi a b t_1^2 \left\{ 1 + \left(1 - \frac{\gamma a V_T}{\pi a^2 + b^2} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 - \frac{\gamma b V_T}{\pi a^2 + b^2} \right) \left[\frac{\pi(a+b)}{(1+\gamma)V_T - \pi(a+b)} \right]^2 \right\}. \quad (2)$$

Використовуючи (2), проведено оцінки прямого збитку від лісової пожежі для сценаріїв його розвитку, представлених кривими 1, 2 і 3 на рис. 2.

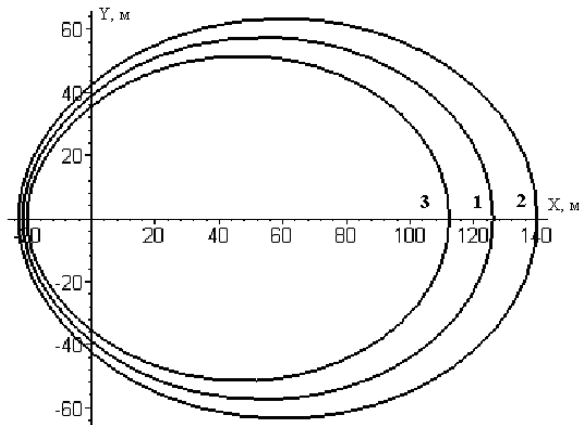


Рис. 2. Контури вигорання:
криві: 1 – $\omega=0,4$; 2 – $\omega=0,3$; 3 – $\omega=0,5$;
час $T=1$ година, $V_w=2$ м/с.
початковий осередок пожежі –
коло з радіусом 10 м

Тоді відношення

$$e_{ij} = \frac{X_i(T_j)}{Y_j(T_j)} = \frac{S_i(T_j)}{S_j(T_j)} \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (3)$$

буде характеризувати зміну збитку внаслідок вибору плану ліквідації лісової пожежі при його розвитку за сценарієм j при дійсному розвитку за сценарієм i . При цьому також врахуємо, що швидкості гасіння V_{Ti} і V_{Tj} можуть у принципі бути різними для різних сценаріїв.

Аналіз простих контурів лісових пожеж, що поширюються по ЛПМ із різною вологістю показує, що врахування зміни вологості при однакових швидкостях гасіння приводить до збільшення прямого збитку. Істотно, що величина збитку згідно (3) не залежить від часу t_1 початку гасіння, що справедливо тільки для простих пожеж.

У випадку пожеж, периметри й площі для яких представлені на рис. 1, для оцінки величини збитку визначимо час гасіння як

$$T=P(t_1)/V_T.$$

У результаті чисельні оцінки дають наступні значення для збитку:

$$e_{13}=1,30 \text{ і } e_{23}=1,76.$$

У цьому випадку величина збитку залежить від часу початку гасіння пожежі.

Однак більше істотним є той факт, що при анізотропному й неоднорідному розподілі вологості ЛПМ величини збитку збільшуються як при підвищенні, так і при зниженні вологості щодо однорідного й ізотропного її значення.

Для перевірки вірогідності отриманих теоретичних результатів були проведені експериментальні виміри параметрів поширення пожежі в натурних умовах. Як експериментальна площадка використовувалося поле площею близько 4 га. Надґрунтовий покрив, по якому поширювалася крайка пожежа, становила стерні злакових культур після їхнього збирання. Розподіл по площі запасу горючого матеріалу було в цілому, у глобальному змісті однорідним. Тому приблизно можна було вважати, що підстилка мала однорідний і ізотропний розподіл з постійною величиною вологості.

Для позначення контрольних точок поле було розмічено вішками з нумерацією точок. Після підпалу замірявся час досягнення вогнем контрольних точок. Середня швидкість вітру по наших вимірах за допомогою анемометра чашкового становила 1,5 м/с.

Теоретичні значення відстаней $L_i^{теор}$ розраховувалися за формулою $L_i^{теор} = V(V_w, \Psi, \phi)t_i$. Невідомі значення параметрів V_f , V_b і V_{fl} визначалися нами методом найменших квадратів. У результаті були знайдені наступні числові значення: $V_f=3,13$ м/с, $V_b=0,23$ м/с і $V_{fl}=1,27$ м/с при цьому $\chi^2=2,72$.

Середня відносна похибка розрахованих із цими значеннями параметрів швидкості величин $L_i^{теор}$ становить 27%, а найгірша похибка становить 60%. Відносно великі похибки для окремих точок пов'язані з тією обставиною, що розподіл горючого матеріалу, будучи в середньому однорідним, мав локальні неоднорідності, якими вони й обумовлені.

Крім зазначених точок, були взяті три контрольні точки: K_1 при $l_1=170$ м, $\phi_1=0^\circ$, K_2 при $l_2=185$ м, $\phi_2=30^\circ$ і K_3 при $l_3=240$ м, $\phi_3=45^\circ$, які не були включені в процедуру мінімізації. Для розрахованих відстаней були отримані значення:

$$l_1^{теор}=184 \text{ м (} t=60 \text{ хв);}$$

$$l_2^{теор}=240 \text{ м (} t=70 \text{ хв);}$$

$$l_3^{теор}=265 \text{ м (} t=96 \text{ хв),}$$

що добре погодиться з вимірюваними відстанями. Розходження для цих відстаней не перевищують 8%, 23% і 10% відповідно.

Це дозволило зробити висновок про відповідність експериментального й теоретичного результатів, тим самим підтверджуючи правочинність зроблених припущень про швидкість поширення низового лісового (степового) пожежі.

Для додаткової перевірки адекватності запропонованої моделі був проведений порівняльний аналіз результатів розрахунку контуру пожежі з модельними розрахунками за спрощеним варіантом моделі А.М. Гришина [1].

На рис. 3 представлені контури вигорання при низовій лісовій пожежі при швидкості вітру $V_w = 2$ м/с, напрямком якого протилежно осі ОХ. Початкове вогнище загорання має вигляд кола із центром у т. С(200,120) і радіусом 10 м.

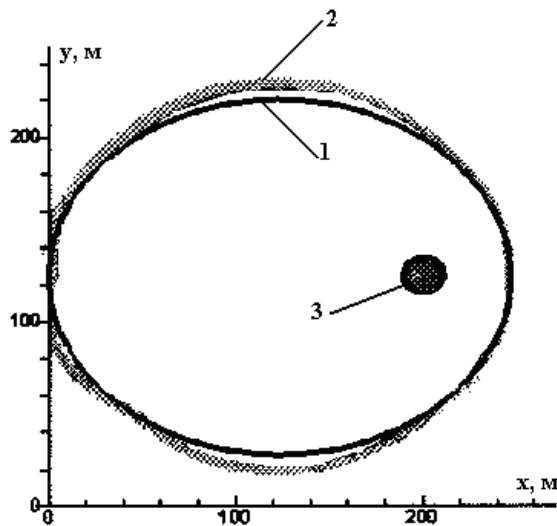


Рис. 3. Контури вигорання низової лісової пожежі: криві 1 – контур розрахований за моделлю, що пропонується, криві 2 – контур, наведений у роботі А.М. Гришина [1], криві 3 – осередок пожежі

Крива 1 представляє контур пожежі на момент часу $T=70$ хв, розрахований при стандартних значеннях параметрів V_b , V_b і V_{fl} без усяких спроб їхнього фітування.

Висновки

Отримано добре узгодження результатів розрахунків по моделі А.М. Гришина [1] із використанням годографа швидкості пожежі [7, 8], особливо для фронтальної й тилової крайок пожежі. Розбіжність для флангових крайок пожежі не перевищує 9%. При цьому час розрахунку кривих 1 не перевищує 1 хвилини, що є істотною перевагою запропонованої нами моделі для оперативного прогнозування розвитку лісових пожеж. Таким чином, узгодження результатів розрахунків контуру вигорання

відповідно до запропонованої моделі й моделі А.М. Гришина також підтверджує адекватність нашої моделі.

Список літератури

1. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров / А.М. Гришин. – Томск: Издательство Томск. ун-та, 1981. – 277 с.
2. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров / Г.А. Доррер. – М.: Лесная прм-ть, 1979. – 160 с.
3. Телицын Г.П. Зависимость скорости распространения низовых пожаров от условий погоды / Г.П. Телицын // Сб. тр. ДальНИИЛХ. – 1965. – Вып. 7. – С. 390-405.
4. Абрамов Ю.А. Описание развития лесного пожара в виде случайного ветвящегося процесса / Ю.А. Абрамов, А.А. Тарасенко // Интегрированные технологии та энергосбережения. Вып. 3. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2002. – С. 52-59.
5. Комяк В.А. Геометрическое моделирование в прогнозах динамики развития лесного пожара для неоднородного слоя / В.А. Комяк, Р.Л. Покровский // Проблемы пожарной безопасности. Вып. 10. – Х.: АО “Фолио”, 2001. – С. 77 – 80.
6. Калиновский А.Я. Геометрическая модель скорости распространения ландшафтного пожара с учетом флуктуаций ветра / А.Я. Калиновский, А.П. Созник // Геометричне та комп'ютерне моделювання: Зб. наук. праць. – Х.: ХДУХТ, 2005. – Вып. 12. – С. 45 – 48.
7. Калиновский А.Я. Аналитическая модель скорости распространения низового лесного пожара / А.Я. Калиновский, А.П. Созник // Проблемы надзвичайних ситуацій: Зб. наук. праць. – Х.: УЦЗУ, 2006. – Вып. 3. – С. 64 – 70.
8. Калиновский А.Я. Анализ адекватности аналитико-геометрической модели распространения ландшафтных пожаров / А.Я. Калиновский, А.П. Созник // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Х.: УЦЗУ, 2006. – Вып. 20. – С. 71 – 76.

Надійшла до редколегії 3.01.2015

Рецензент: д-р фіз.-мат. наук, проф. Н.Д. Сизова, Харківський національний університет будівництва і архітектури, Харків.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАНДШАФТНОГО ПОЖАРА С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОЙ ВЛАЖНОСТИ ЛЕСНОГО ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА

А.Я. Калиновский, И.А. Чуб, Т.Н. Обиженко

Разработаны математические модели для определения геометрических характеристик ландшафтного пожара в зависимости от параметров горючего материала. Предложены формулы для нахождения периметра и площади ландшафтного пожара, учитывающие неоднородную влажность горючего материала.

Ключевые слова: ландшафтный пожар, геометрические характеристики ландшафтного пожара, математическая модель изменения формы и площади ландшафтного пожара, неоднородная влажность лесного горючего материала.

DETERMINATION OF GEOMETRICAL CHARACTERISTICS OF LANDSCAPE FIRE, TAKING INTO ACCOUNT THE INHOMOGENEOUS FOREST FUEL MOISTURE

A.Y. Kalinowsky, I.A. Chub, T.N. Obizhenko

The mathematical model for determining the geometric characteristics of a fire in landscape settings depending on the combustible material have been developed. The formulas for finding the perimeter and area of landscape fire, taking into account the non-uniform moisture content of combustible material have been proposed.

Keywords: landscape fire, geometric characteristics of landscape fire, mathematical model changes in the shape and area of landscape fire, heterogeneous forest fuel moisture.