

МОДЕЛЮВАННЯ КОНТУРІВ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

Проведено порівняльний аналіз математичних моделей, які описують контури лісових пожеж, що дає змогу прогнозувати положення зовнішньої межі пожежі та відтворити її на площині концентричними лініями у будь-який момент її перебігу, а також провести оцінювання вибору кращих стратегій та ефективних тактик пожежогасіння. Вибрано серед них найбільш придатні для прогнозування динаміки контурів лісових пожеж з врахуванням різних факторів: пірологічних характеристик рослинного матеріалу, рельєфу місцевості, метеорологічних умов і початкового контура.

Ключові слова: лісова пожежа, геометрична форма контура лісової пожежі, математичне та імітаційне моделювання.

Вступ. Вміння прогнозувати глобальні характеристики лісової пожежі (площу, периметр, конфігурацію крайки), пов'язані з її геометричною формою, має важливе значення при створенні ефективних стратегій і виборі тактик пожежогасіння та при визначенні потенційного збитку, який може завдати ця пожежа.

Згідно з [7] контур пожежі – це зовнішня межа площі території лісу, яку охоплено вогнем. Геометрична форма контура пожежі може задаватися аналітично або визначатися шляхом моделювання за допомогою чисельних методів. Головним завданням теорії прогнозування лісових пожеж є визначення зовнішньої межі пожежі в кожен момент часу. Цю межу зазвичай представляють однією або декількома безперервними лініями [8]. Система рівнянь (диференціальних чи інтегральних), яка описує переміщення контура пожежі в кожен момент часу, дає змогу відтворити її на площині концентричними лініями у будь-який момент її перебігу. Динаміка контура лісової пожежі визначається диференціальним характером швидкості переміщення її крайки, який значною мірою залежить від пірологічних характеристик рослинного матеріалу, рельєфу місцевості, метеорологічних умов і початкового контура джерела виникнення пожежі.

Метою цієї роботи є аналіз математичних моделей, які описують контури лісових пожеж, вибір серед них найбільш придатних для прогнозування їх динаміки з врахуванням різних чинників. Основними завданнями є: порівняння моделей контура джерела лісової пожежі, аналіз аналітичних і чисельних методів його побудови.

1. Моделі контура джерела лісової пожежі

У 1937 р. американський вчений З.М. Мітчелл [31] здійснив перші спроби аналітично описати контур лісової пожежі, апроксимувавши її форму колом. У 1960 р. Н.П. Курбатський [19] описав контур лісової пожежі фігурою, яка складається з двох напівеліпсів; водночас Чарльз Друе та О'Реган – еліпсом [30, 32]. У 1961 р. Артур Пірско описав контур лісової пожежі колом і еліпсом [33]. Очевидно, такі моделі відповідають реальності тільки при описі невеликої лісової пожежі, що поширюється рівнинною територією з однорідним лісовим горючим матеріалом. Лише у 1979 р. Г.А. Доррер у своїй роботі [9] вперше заклав теоретичні засади геометричного моделювання контурів лісових пожеж, у яких частково враховано неоднорідність горючого матеріалу, напрям вітру і рельєф місцевості.

На сьогодні існують найрізноманітніші варіанти опису контурів лісових пожеж. У роботах [10, 11, 25, 26] контур джерела лісової пожежі задано аналітичною функціональною залежністю в полярних координатах $\rho = f(\varphi)$. Попри очевидні позитивні результати, таке представлення не дає змоги адекватно відтворити контур лісової пожежі довільної конфігурації, а також робить неможливим відтворення не опуклого контура відносно полярного радіуса.

У роботах [2, 3, 24] авторами запропоновано відтворювати контур джерела лісової пожежі довільної конфігурації неявно заданою функцією відрізків (ламанною лінією, яку отримують за допомогою R-функцій [23]). Однак, за таких умов контур лісової пожежі істотно залежить від обраного параметра екстраполяції, зв'язок якого з властивостями середовища горіння лісового матеріалу на сьогодні не вивчено [27]. Окрім цього, цей підхід не завжди можна використати при описі контура великої лісової пожежі.

У моделях, розглянутих у роботі [9], контур джерела лісової пожежі задано шляхом інтерполяції її вузлових точок, явно заданих у декартовій системі координат двома способами: апроксимацією контура відрізками прямих ліній, які з'єднують сусідні вузлові точки (контур видається ламаною лінією); апроксимацією контура кривими другого та вищого порядків, проведеними через кожні три (чи більше) сусідні вузлові точки (контур складається з відрізків квадратичних чи кубічних парабол). Апроксимація контура лісової пожежі за вузловими точками дає змогу отримати конфігурацію пожежі з будь-якою наперед заданою точністю, однак це доволі громіздкий обчислювальний процес, який потребує затрат часу на визначення координат вершин кривої. Сучасний розвиток комп'ютерної техніки дає змогу значно пришвидшити такі розрахунки та відразу відтворити динаміку пожежі.

2. Аналітичні методи моделювання динаміки контура лісової пожежі

На сьогодні побудова моделей динаміки контура лісової пожежі характеризується різними підходами. Однак, як правило, в усіх підходах застосовують деякі спрощувальні припущення та обмеження. Найпоширенішими з них [9] є: гіпотеза нормальної швидкості; гіпотеза Маркштейна; гіпотеза точкового джерела.

Гіпотеза нормальної швидкості – одна з найпростіших гіпотез, яка полягає в тому, що кожна точка контура пожежі переміщається в просторі незалежно від сусідніх точок у напрямі зовнішньої нормалі до контура. При цьому швидкість її руху (нормальна швидкість) залежить від властивостей рослинного горючого матеріалу, швидкості вітру, рельєфу місцевості та від кутів, утворених нормаллю до лінії контура з напрямом вітру та найбільш крутого підйому місцевості. Рівняння, що описує рух контура лісової пожежі, де за швидкість переміщення беруть нормальну швидкість, записують [9]:

у неявному вигляді

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + V_n |\operatorname{grad} \varphi| = 0; \quad (1)$$

у явному вигляді

$$\frac{\partial y}{\partial t} + V_n \sqrt{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2} = 0, \quad (2)$$

з початковою умовою:

$$y(x, 0) = f(x, 0) = f_0(x), \quad (3)$$

де: $V_n = |V_n|$ – величина нормальної швидкості переміщення контура пожежі, яка в кожній його точці збігається за напрямом з $\operatorname{grad} \varphi$; $\varphi(x, y, t) = 0$ та $y = f(x, t)$ – рівняння контура в момент часу t , які задано відповідно в неявному та явному виглядах; $y = f_0(x)$ – рівняння лінії $\varphi_0(x, y) = 0$, записане в явному вигляді.

Однак ця гіпотеза абсолютно непридатна для опису ділянок контурів лісових пожеж увігнутих у бік руху пожежі. Припущення, що кожна точка контура пожежі переміщається незалежно, під час моделювання часто приводить до утворення зламів і петель на контурі, що суперечить фізичному змісту перебігу лісової пожежі.

Гіпотеза Маркштейна базується на аналізі експериментальних даних; полягає в тому, що швидкість зовнішньої межі лісової пожежі зростає в точках, де фронт процесу горіння увігнутий у бік руху вогню і зменшується в точках, що відповідають опуклим ділянкам крайки лісової пожежі. Тобто швидкість поширення процесу горіння залежить від кривизни фронту вогню. Маркштейном введена поправка до нормальної швидкості $V_F = V_n(1 + \theta)$ та введено припущення, що $\theta(x, \infty) = \lambda / R_F$, де: V_F – нормальна швидкість викривленого фронту вогню; V_n – нормальна швидкість плоского фронту вогню; $\theta = \theta(x, t)$ – відносна зміна нормальної швидкості, спричинена викривленням фронту вогню; $\theta(x, \infty)$ – значення поправки нормальної усталеної швидкості через значний проміжок часу після зміни контура пожежі; λ – характеристичний розмір за порядком величини, який дорівнює ширині фронту вогню; R_F – радіус кривизни фронту вогню.

Тоді рівняння, що описує переміщення контура лісової пожежі, згідно з гіпотезою Маркштейна, має такий вигляд [9]:

$$\frac{\partial y(x, t)}{\partial t} + V_n \left\{ 1 + \frac{\lambda}{\tau_R} \int_0^t e^{-\frac{t-\xi}{\tau_R}} \frac{y_{xx}(x, \xi) d\xi}{(1 + y_x^2(x, \xi))^{3/2}} \right\} \sqrt{1 + y_x^2} = 0 \quad (4)$$

з початковою умовою (3), де τ_R – стала часу, що характеризує швидкість встановлення поправки V_F .

Модель (4) достатньо точно описує як увігнуті, так і опуклі ділянки контура лісової пожежі, однак потребує складних аналітичних формул для її подальшої ідентифікації та програмної реалізації.

Гіпотеза точкового джерела полягає в тому, що кожна точка крайки лісової пожежі є елементарним джерелом поширення вогню. Причому процес горіння з кожної точки крайки поширюється в усіх напрямках, де є лісовий горючий матеріал. Швидкість поширення вогню в певному напрямі залежить від кута, утвореного цим напрямом, з напрямом вітру та (або) схилу. Положення зовнішньої межі лісової пожежі в кожен наступний момент часу визначається кривою, що огинає усі елементарні прирости, побудовані з кожної точки крайки пожежі. Рівняння, що описує рух контура лісової пожежі, згідно з гіпотезою точкового джерела, має такий вигляд [9]:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{V_r}{\sqrt{1 + (V_r'/V_r)^2}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2} = 0 \quad (5)$$

з початковою умовою (3).

Як уже зазначалося вище, найбільш вагомими факторами, що впливають на характер поширення лісової пожежі в просторі, є швидкість переміщення контура вогню, напрям вітру та рельєф місцевості. Для задавання швидкості переміщення контура лісової пожежі з урахуванням цих факторів, як правило, вводять додаткові множники (функції) $x_{ns}(\gamma, s)$ та $x_{nw}(\alpha, w)$, які називають відповідно індикатрисами нормальної швидкості для схилу та вітру. Тут s – вектор градієнта (найбільш крутого схилу) місцевості, $s = |s|$ – величина ухилу місцевості; $\gamma = \arccos \frac{sV_n}{|s||V_n|}$ – кут ухилу місцевості; w – вектор швидкості вітру; $w = |w|$ – величина швидкості вітру; $\alpha = \arccos \frac{wV_n}{|w||V_n|}$ – кут напрямку вітру. З урахуванням цих індикатрис

нормальної швидкості величину нормальної швидкості переміщення контура лісової пожежі представляють у вигляді:

$$V_n(x, y, t, \alpha, \gamma, w, s) = V_0(x, y, t, w, s) \cdot x_{ns}(\gamma, s) \cdot x_{nw}(\alpha, w), \quad (6)$$

де $V_0(x, y, t, w, s)$ – швидкість руху фронту вогню в напрямку вітру вгору схилом.

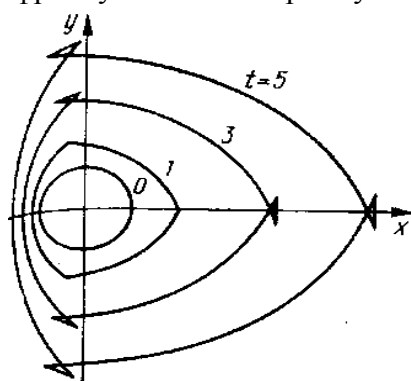


Рис. 1. Приклад побудови контура лісової пожежі за індикатрисою нормальної швидкості $x_n(\alpha) = 0,55 + 0,45 \cos^2 \alpha$ [9]

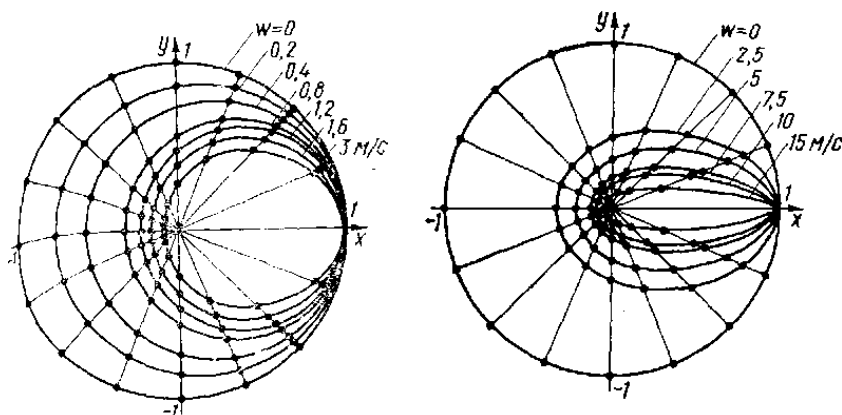


Рис. 2. Приклад побудови контура лісової пожежі за індикатрисою радіальної швидкості $x_r(\varphi) = \exp\{(0,785\omega - 0,106\omega^2) \cdot (\cos \varphi - 1)\}$ [9]

Однак, варто зазначити, що індикатриса нормальної швидкості визначає тільки локальну швидкість поширення вогню в кожній точці контура лісової пожежі, що загалом не дає змоги відобразити його реальну форму. Окрім цього, на сьогодні ще немає досконалих методів обчислення коефіцієнтів індикатрис. У роботі [9] індикатриса апроксимують аналітичними виразами, виходячи з експериментальних даних. Однак, сам автор визнає, що така апроксимація може мати місце тільки при відносно малих розмірах пожеж, адже великі за площею пожежі мають складну геометричну форму і оцінка індикатрис для них потребує розроблення спеціальних методів ідентифікації.

В моделі [25] контур лісової пожежі можна задавати в довільний момент часу t , який відображається в полярній системі координат.

$$R(v_w, \varphi, t) = r_0(\varphi) + V_n(v_w, \varphi) \cdot (t - t_0), \quad (7)$$

де: φ – полярний кут; $r_0(\varphi)$ – функція, яка описує контур джерела пожежі в початковий момент часу t_0 ; $V_n(v_w, \varphi)$ – годограф швидкості поширення низової лісової пожежі, визначається за формулою

$$V_n(v_w, \varphi) = \frac{b^2 \beta \cos \varphi + \sqrt{b^4 a^2 \cos^2 \varphi + a^2 b^2 (a^2 - \beta^2) \sin^2 \varphi}}{b^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi}, \quad (8)$$

де: $2a = V_f + V_b$, $b = V_{fl}$, $\beta = (V_f - V_b)/2$, V_f , V_b , V_{fl} – швидкості поширення відповідно фронтальної, тилової та флангової крайки пожежі, відносно напрямку вітру v_w , де полярна вісь збігається з віссю OX , тобто з напрямком вітру. Зазначимо, що початок координат в обраній системі не збігається з фокусом самого еліпса.

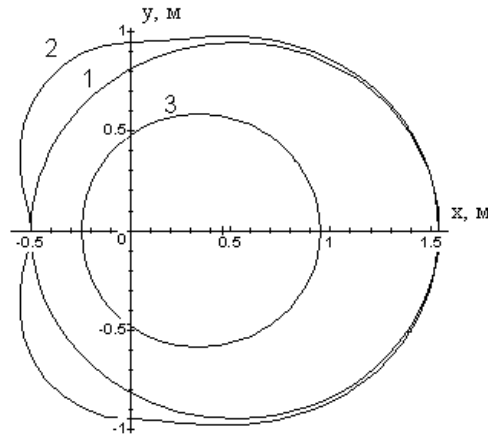


Рис. 3. Приклад побудови контура лісової пожежі у полярній системі координат з використанням годографа швидкості $V_n(v_w, \varphi)$ при $v_w = 1$ м/с [25]: крива 1 побудована за формулою (8); крива 2 – за моделлю М.П. Курбатського; крива 3 – за моделлю Г.А. Доррера

Однак модель [25] дає змогу відобразити тільки контур лісової пожежі, який поширюється однорідним рівнинним шаром лісового горючого матеріалу за умов постійної швидкості вітру. Окрім цього, з огляду на використання полярної системи координат, неможливо побудувати контур пожежі довільної складності.

3. Чисельні методи побудови динаміки контура лісової пожежі

Чисельні методи побудови контурів лісової пожежі базуються на тих самих спрощувальних припущеннях і обмеженнях про переміщення крайки пожежі, які використовують при виведенні аналітичних виразів.

На сьогодні існує два основні підходи до опису контурів лісової пожежі чисельними методами: опис ламаною лінією; опис плавною кривою лінією. Контур лісової пожежі визначається набором вузлів, що належать або не належать регулярній сітці, які можуть з'єднуватися ступінчастою, ламаною або плавною кривою лінією. У кожен момент часу будується новий набір вузлів. Як правило, залежно від вибраного способу дискретизації лісової території, обирають той чи інший чисельний метод опису контурів лісової пожежі.

Існує чотири типових способи дискретизації лісової території. За допомогою: регулярної сітки точок (множини рівномірно розташованих у просторі точок з достатньою густиною); нерегулярної сітки точок (множини довільно розташованих точкових об'єктів, характерними параметрами яких є властивості території в даних точках); множини полігонів (кожна однорідна ділянка місцевості моделюється полігоном, межа якого задається ламаною чи плавною кривою лінією); ізолініями.

При дискретизації лісової території множиною полігонів контур лісової пожежі описується плавною або ламаною лінією, а алгоритми його розрахунку є чисельною апроксимацією диференціальних рівнянь переміщення контура пожежі.

При дискретизації лісової території сітковою структурою контур лісової пожежі, як правило, описується ступінчастою лінією, побудованою шляхом апроксимації послідовності вузлів, які "горять" в певний момент часу. Причому вважається, що кожен вузол сітки в певний момент часу може знаходитися в одному із таких станів: не "горів", "горить", вже "згорів" і надалі не може "спалахнути" [9]. Дискретизацію лісової території сітковою структурою

для моделювання контура лісової пожежі у своїх роботах розглядали Г. Бол [28], О. Воробйов [4], Е. Дейкстра [29], В. О'Реган [32], М. Севідж [34] та ін. Серед сіткових моделей є як детерміновані, так і стохастичні.

В детермінованих сіткових моделях процес поширення лісової пожежі розглядають як процес передачі горіння від вузлів, що "горять", до усіх сусідніх з ними вузлів, що ще не "горіли". Час переходу процесу горіння від вузла до вузла значною мірою залежить від взаємного розташування вузлів відносно напрямку вітру та від властивостей лісового горючого матеріалу. Вважається, що в першу чергу "спалахне" той вузол, час переходу до якого з усіх вузлів, що "горять", буде мінімальним. Найбільш відома з таких моделей отримала в літературі назву алгоритму Дейкстра [9]. Основне його завдання полягає у знаходженні мінімального за часом шляху між будь-якою парою вузлів у сітці. Основним недоліком алгоритму Дейкстра є те, що визначення часу поширення вогню між двома вузлами базується на мінімальній відстані між цими вузлами, яка апроксимується ламаною лінією. Це, водночас, викликає відставання сіткового методу розв'язання задачі від аналітичного і з часом накопичує помилку методу розрахунку.

В стохастичних сіткових моделях процес поширення лісової пожежі розглядають як процес передачі горіння від вузла, що "горить", в усі сусідні вузли впродовж одного такту часу з певною ймовірністю. Підбір значень ймовірності переходу вогню з кожного вузла до сусідніх дає змогу визначати середні контури пожежі в кожен момент часу. Кожна реалізація процесу розрахунку призводить до поточного контура лісової пожежі випадкової форми. Найбільш відомою серед стохастичних сіткових моделей поширення лісової пожежі є модель О.Ю. Воробйова [4]. Ним було використано множинний метод Монте-Карло, який дає змогу визначити так звану середньовимірну область, зайняту пожежею, та її середній контур. Модель О.Ю. Воробйова, як і алгоритму Дейкстра, базується на гіпотезі про точкові джерела, однак завдяки використанню методів середньовимірного моделювання, позбавлена недоліку, властивого алгоритмові Дейкстра. Проте основним недоліком методів середньовимірного моделювання є те, що прогноз поширення лісової пожежі будується на основі фактичних експериментальних даних про геометрію реальної пожежі в певні моменти часу, в конкретному рельєфі місцевості, за певних метеорологічних умов. Це водночас робить таку модель непридатною для її використання за інших умов поширення лісової пожежі.

Наприкінці 60-х років ХХ ст. С.К. Годуновим [5, 6] був запропонований і удосконалений числовий метод розв'язання задач газової динаміки поширення вогню на основі рухливих сіток. Цей метод полягає в тому, що розрахункова сіткова область не задається заздалегідь, а визначається під час розв'язання задачі, змінюючись на кожному кроці разом з самим розв'язком. На базі цього методу Г.А. Доррером [9] було запропоновано два способи побудови контурів лісової пожежі: шляхом апроксимації відрізками прямих ліній, тоді контур в кожен момент часу подається ламаною лінією, яка з'єднує його сусідні точки; шляхом апроксимації кривими другого порядку, при якій контур складається з відрізків парабол, проведених через кожні три сусідні точки.

При апроксимації крайки лісової пожежі відрізками прямих ліній рівняння переміщення контура (1) задається такою системою рівнянь [9]:

$$\begin{cases} \frac{x_i^{t+1} - x_i^t}{\Delta t} = V_n \frac{y_{R(i)}^t - y_{L(i)}^t}{x_{R(i)}^t - x_{L(i)}^t} \cdot \left(1 + \left(\frac{y_{R(i)}^t - y_{L(i)}^t}{x_{R(i)}^t - x_{L(i)}^t} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \\ \frac{y_i^{t+1} - y_i^t}{\Delta t} = V_n \cdot \left(1 + \left(\frac{y_{R(i)}^t - y_{L(i)}^t}{x_{R(i)}^t - x_{L(i)}^t} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (9), (10)$$

де контур лісової пожежі в момент часу t подають у вигляді замкнutoї кривої, що проходить через точки C_1, \dots, C_N (рис. 4). Кожна точка C_i ($i = \overline{1, N}$) характеризується вектором $S_i = \{x_i, y_i, L(i), R(i)\}$, де: x_i, y_i – координати точки на площині; $L(i)$ – номер сусідньої точки, розташованої на контурі ліворуч (в напрямку переміщення контура); $R(i)$ – номер сусідньої точки, розташованої на контурі праворуч; V_n – величина нормальної швидкості в даній точці; Δt – величина кроку за часом.

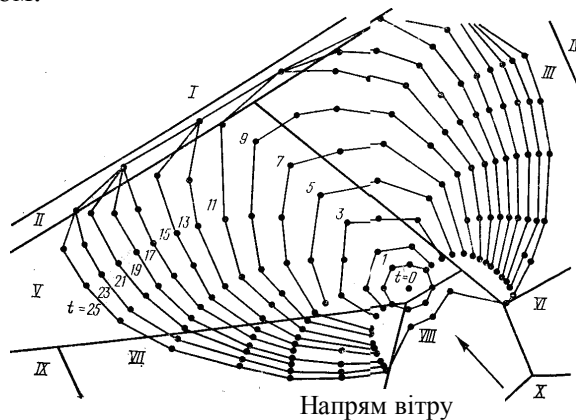


Рис. 4. Приклад побудови контура лісової пожежі для неоднорідного горючого матеріалу за методом рухливих сіток при апроксимації контурів відрізками прямих [9]

При апроксимації країки лісової пожежі кривими другого порядку дещо покращується точність побудови контура. Точки C_i (рис. 5) визначаються за такими формулами:

$$\begin{cases} x_i^{t+1} = x_i^t + E_1 V_n \Delta t (1 + \theta_i^t); \\ y_i^{t+1} = y_i^t + E_2 V_n \Delta t (1 + \theta_i^t), \end{cases} \quad (11), (12)$$

де: E_1 та E_2 – відповідно синус і косинус кута, утвореного нормаллю до параболи в точці C_i з віссю O_x . В основній системі координат змінна θ_i^t – поправка Маркштейна, що враховує кривизну контура. Базуючись на методі рухливих сіток, Д.К. Корнеєв інтерполює контур лісової пожежі поліномами другого порядку [17].

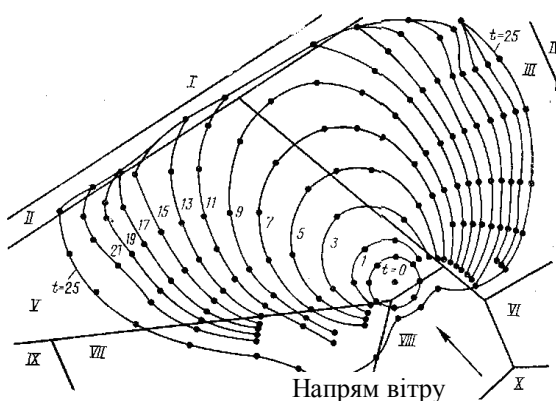


Рис. 5. Приклад побудови контура лісової пожежі для неоднорідного горючого матеріалу за методом рухливих сіток при апроксимації контурів відрізками парабол [9]

На сьогодні в Національному університеті цивільного захисту України (м. Харків) під керівництвом професорів Ю.Л. Абрамова та Л.М. Куценка активно розвивається підхід до

модельовання динаміки контурів лісових пожеж на базі алгоритмів геометричного моделювання з використанням ітераційної процедури з дискретним часовим кроком та ведуться роботи з побудови континуальних моделей з довільним часовим кроком. Так модель [11, 12] побудована з використанням ітераційної процедури з часовим кроком (Δt), яка має такий вигляд

$$R_{i+1}(v_w, \varphi, t) = R_i(\varphi) + V_n(v_w, \varphi, x, y) \cdot \Delta t, \quad i = \overline{1, N}. \quad (13)$$

Ця модель, на відміну від аналітичної моделі [25], дає змогу описати динаміку контура лісової пожежі під дією вітру відносно неоднорідного шару лісового горючого матеріалу. Однак модель [11, 12], побудована згідно з (13), через функціональне задавання місцезнаходження точки контура від полярного кута, не дає змоги правильно описати складний (неопуклий щодо полярного радіуса) контур і обгинання негорючих перешкод, тобто спостерігається ефект тіні (рис. 6.).

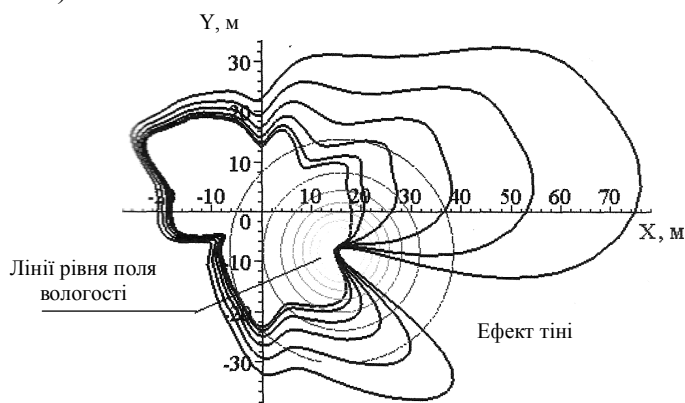


Рис. 6. Побудова контура лісової пожежі [11, 12]. Ефект тіні при досягненні контуром області критичної вологості в моделі

У моделях [20, 21] була використана ітераційна процедура побудови контура лісової пожежі з дискретним часовим кроком і показано, що сімейство кривих, які характеризують прогнозоване положення крайки вогню при горінні однорідного за складом рослинного матеріалу на рівнинній місцевості у безвітряну погоду, є еквідистантними кривими, відстань між якими визначається інтервалом часу прогнозування та швидкістю процесу горіння. У роботах [13-16] показано, що алгоритм наближеного опису паралельних кривих, запропонований в [21], видається перспективним для прогнозування процесу поширення пожежі з урахуванням дії вітру для неоднорідного шару горючого рослинного матеріалу. Початковими даними для застосування методу є топографічні схеми контурів вигорання в деякі моменти часу, отримані внаслідок сканування району засобами дистанційного зондування інфрачервоного або радіодіапазонів, що розміщуються на борту літального апарата [22]. За допомогою цих схем з використанням методів екстраполяції прогнозується поведінка крайки вигорання лісового матеріалу для наступних моментів часу. Однак цей підхід забезпечує вельми схематичне уявлення про динаміку контура лісової пожежі, у зв'язку з чим має низьку практичну цінність.

У роботі [1] шляхом використання процедури лінійної сплайн інтерполяції побудована континуальна модель контура лісової пожежі з безперервним часом по раніше отриманих контурах цієї пожежі в дискретні моменти часу.



Рис. 7. Зображення контурів в дискретні моменти і результат їх інтерполяції в довільні моменти [1]

Створення континуальних моделей з неперервним часом дає змогу будувати ефективну стратегію з використанням активної тактики пожежогасіння, однак потребує певних затрат часу та відповідного обладнання для отримання початкових даних.

Висновки:

1. Одним з важливих етапів створення концептуальних стратегій і вибору ефективних тактик гасіння лісової пожежі є вміння прогнозувати положення контура пожежі в довільний момент часу з врахуванням різних факторів.

2. Відомі на сьогодні моделі контурів лісових пожеж не завжди адекватно описують динаміку меж лісової пожежі в неоднорідних ландшафтно-метеорологічних умовах, тим самим не дають змоги вирішити проблему прийняття ефективних управлінських рішень щодо вибору стратегії і тактики пожежогасіння.

3. Встановлено, що при моделюванні процесу перебігу лісової пожежі вибраний спосіб дискретизації лісової території має адекватно відображати її основні особливості та бути зручним для проведення розрахунків щодо його динаміки. Базуючись на проведеному аналізі математичних моделей контурів лісової пожежі як найбільш адекватну нами вибрано нерегулярну сітку точок, характерними параметрами якої є рельєфні та лісорослинні особливості території в таких точках.

4. Оскільки конфігурація крайки реальних лісових пожеж часто є достатньо складною, то для підвищеної точності розрахунків отримання під час моделювання достовірного відображення контура пожежі доцільно застосовувати різні методи його згладжування, наприклад, апроксимацією кривими другого та вищих порядків.

Список літератури:

1. **Абрамов Ю.А.** Континуальная модель динамики контура природного пожара / Ю.А. Абрамов, А.А. Тарасенко // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков : Изд-во "Фолио". – 2009. – Вып. 25. – С. 3-5.

2. **Васильев С.В.** Компьютерные системы прогнозирования контуров выгорания при лесных пожарах / С.В. Васильев, Л.Н. Куценко // Пожарная безопасность: VI науч.-практ. конф.- Харьков : АПБУ, 2003. – С. 69-71.

3. **Васильев Ф.П.** Методы оптимизации. – М.: Изд-во "Факториал Пресс", 2002. – 824 с.

4. **Воробьев О.Ю.** Вероятностное множественное моделирование распространения лесных пожаров / О.Ю. Воробьев, Э.Н. Валендик. – Новосибирск : Изд-во "Наука", 1978. – 159 с.

- 5. Годунов С.К.** О расчетах конформных отображений и построении разностных сеток / С.К. Годунов, Г.П. Прокопов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1967. – Т. 7, № 5. [Электронный ресурс]. – Доступный з [http:// books.google.com.ua/books](http://books.google.com.ua/books)
- 6. Годунов С.К.** Об использовании подвижных сеток в газодинамических расчетах / С.К. Годунов, Г.П. Прокопов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1972. – Т. 12, № 2. [Электронный ресурс]. – Доступный з <http://books.google.com.ua/books>
- 7. ГОСТ СССР 17.6.1.01-83.** Охрана природы. Охрана и защита лесов, Термины и определения: Введ. 01.07.84. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 12 с.
- 8. Доррер Г.А.** Динамика лесных пожаров / Г.А. Доррер. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. – 404 с.
- 9. Доррер Г.А.** Математические модели динамики лесных пожаров. – М. : Изд-во "Лесн. пром-сть", 1979. – 161 с.
- 10. Калиновский А.Я.** Влияние формы и размеров очага загорания на контур ландшафтного пожара / А.Я. Калиновский, А.П. Созник // Проблемы пожарной безопасности. – 2004. – Спец. вып. – С. 25-34.
- 11. Калиновский А.Я.** Модель распространения ландшафтного пожара с учетом изменения влажности горючего материала / А.Я. Калиновский, О.П. Созник // Науковий вісник будівництва : Зб. наук. праць. – Харків : Вид-во ХДТУБА, ХОТВ, АБУ. – 2005. – Вип. 31. – С. 291-295.
- 12. Калиновський А.Я.** Модель поширення ландшафтної пожежі з урахуванням флуктуацій вітру і вологості пального матеріалу / А.Я. Калиновський, О.П. Созник // Пожежна безпека : Зб. наук. праць. – Львів: Вид-во СПОЛОМ. – 2005. – Вип. 6. – С. 25-28.
- 13. Комяк В.А.** Геометрическое моделирование в прогнозах динамики развития лесного пожара / В.А. Комяк, Н.Я. Откидач, С.А. Шило // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков : Изд-во ХИПБ. – 1999. – Вып. 5. – С. 124-127.
- 14. Комяк В.А.** Геометрическое моделирование в прогнозах динамики развития лесного пожара для неоднородного слоя / В.А. Комяк, Р.Л. Покровский // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: АО "Фолио". – 2001. – Вып. 10. – С. 77-80.
- 15. Комяк В.А.** Геометрическое моделирование динамики лесного пожара при нестабильных параметрах ветра / В.А. Комяк, Р.Л. Покровский // Сучасні проблеми геометричного моделювання : зб. праць Міжнар. наук.-практ. конф. – Харків : Вид-во ХДАТ та ОХ. – 2001. – С. 138-140.
- 16. Комяк В.А.** Моделирование динамики развития лесного пожара с учетом ветрового воздействия / В.А. Комяк, А.Г. Коссе, Н.Я. Откидач, С.А. Шило // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков : Изд-во ХИПБ. – 1999. – Вып. 5. – С. 115-123.
- 17. Корнеев Д.Г.** Математическое моделирование развития лесного пожара / Д.Г. Корнеев // Электронное моделирование. – 1999. – Вип. 21, № 3. – С. 84-94.
- 18. Кривошлыков С.Ф.** Оценка необходимого количества сил и средств пожаротушения для оперативной локализации ландшафтного пожара // Проблемы пожежної безпеки. – 2008. – Вип. 24. – С. 98-104.
- 19. Курбатский Н.П.** Причина изменения интенсивности лесных пожаров в течение суток / Н.П. Курбатский // Лесное хозяйство. – 1960. – № 4. – С. 31-33.
- 20. Куценко Л.М.** Геометричне моделювання контуру вигорання лісової ділянки / Л.М. Куценко, О.М. Сівальньов // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К. : Вид-во КДТУБА. – 1997. – Вип. 61. – С. 27-30.
- 21. Куценко Л.М.** Наблизкий опис паралельних кривих / Л.М. Куценко // Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. тр. – Харьков: Вид-во ХИПБ. – 1998. – Вып. 4. – С. 118-121.
- 22. Куценко Л.Н.** Прогнозирование контура выгорания растительного материала по результатам сканирования местности / Л.Н. Куценко, Н.Н. Кулешов // Пожежна безпека. – Черкаси : ЧПБ МВС України. – 1999. – С. 11-15.
- 23. Рвачев В.Л.** Теория R-функций и некоторые ее приложения. – К. : Изд-во "Наукова думка", 1982. – 552 с.
- 24. Ромін А.В.** Передбачення кромки вигорання рослинного матеріалу з урахуванням фактору вітру // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков : Изд-во "Фолио". – 2000. – Вып. 7. – С. 177-179.

25. Созник А.П. Геометрическая модель движения кромки низового лесного пожара // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: Изд-во АПБУ. – 2002. – Вып. 11. – С. 188-191.
26. Созник А.П. Флуктуации ветра и скорость распространения низового лесного пожара / А.П. Созник, А.Я. Калиновский // Моделивання лісових пожеж: тези доп. наук.-практ. конф. – Харків : Вид-во АПБУ, 2003. – С. 6-9.
27. Шоман О.В. Проблема підвищення адекватності геометричної моделі процесу в методі іміджевої екстраполяції // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – 2010. – Вип. 26. – С. 60-65.
28. Ball G.L. Improved fire growth modeling / G.L. Ball, D.P. Guertin // International Journal of Wildland Fire. – 1992. – №2(2). – P. 47-54.
29. Dijkstra E.W. A note on Two Problems in Connexion with Graphs / E.W. Dijkstra // Numerische Mathematic. – 1959. – № 1.
30. Drouet J. Ch. Les feux de forêts, en région méditerranéenne. Théorie de propagation et moyens de lutte efficaces a calculs des vitesses de propagation des feux de forest [Електронний ресурс]. – Доступний з http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/medit_0025-8296_1973_num_12_1_1466
31. Mitchell Z.M. Rule of thumb determining rate of spread // Fire Control Notes. – 1937. – Vol. 6. – P. 395-396.
32. O'Regan W.G. Bias in the contagion analog to fire spread / W.G. O'Regan, P.H. Kourtz, S. Nozaki // Forest Science, – 1976. Vol. 22, № 1.
33. Pirsko Arthur R. Why tie fire control planning to burning index. // Fire control notes. – 1961. – № 1. – С. 16-19. [Електронний ресурс]. – Доступний з http://www.fs.fed.us/fire/fmt/fmt_pdfs/022_01.pdf
34. Savage M. Arborscapes: A swarm-based multi-agent ecological disturbance model / M. Savage, M. Askenazi // Geographical and Enviromental Modeling. – 1998. – Vol. 14. – P. 6-56.

О.А. Смор, Ю.И. Грыцюк

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТУРОВ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Проведен сравнительный анализ математических моделей, описывающих контуры лесных пожаров, что дает возможность прогнозировать положение внешних границ пожара и воспроизвести его на плоскости концентрическими линиями в любой момент его продвижения, а также провести оценивание выбора лучших стратегий и эффективных тактик пожаротушения. Выбрана среди них наиболее пригодная для прогнозирования динамики контуров лесных пожаров с учетом разных факторов: пирологических характеристик растительного материала, рельефа местности, метеорологических условий и начального контура.

Ключевые слова: лесной пожар, геометрическая форма контура лесного пожара. математическое и имитационное моделирование

О.О. Smotr, Yu.I. Grytsyuk

MODELLING OF FOREST FIRES CONTOURS

The comparative analysis of mathematical models which describe the contours of forest fires is conducted. It enables to forecast position of outside fire boundary and to reproduce it on the plan by concentric lines at any time of its duration and also to evaluate the choice of the best fire-fighting strategies and tactics. The most suitable among them are chosen to forecast dynamics of forest fires contours taking into consideration different factors: pirological descriptions of vegetative material, relief of locality, meteorological conditions and initial contour.

Key words: forest fires, geometrical form of forest fire contour, mathematical and simulation modelling