

*Куценко Л.М., д-р техн. наук, проф., УЦЗУ,
Васильєв С.В., канд. техн. наук, викл., УЦЗУ*

МОДЕЛЮВАННЯ ЗОВНІШНІХ ПРОЯВІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ЯК ДВОФАЗНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ ПРОЦЕСІВ

Розглянуто шляхи моделювання та прогнозування зовнішніх проявів надзвичайних ситуацій як двофазних гетерогенних процесів на площині (як проекцію на карту місцевості) на прикладі розповсюдження лісової пожежі з невідомою кількістю невизначених параметрів

Постановка проблеми. Розповсюдження нафтових плям, шкідливих викидів та лісові пожежі це надзвичайні ситуації для успішної ліквідації яких необхідно робити довгострокові стратегічні та короткострокові оперативні прогнози.

В цій статті буде розглянуто один з методів проведення короткострокового оперативного прогнозу таких надзвичайних ситуацій. Вирішення цієї задачі викликає ряд труднощів пов'язаних з збором потрібної інформації. Зазвичай інформації надто мало, складно використовувати або відомо тільки те як процес розповсюджувався до цього часу. Найбільш простий випадок – коли процес можливо уявити, у першому наближенні, як двофазний гетерогенний на площині. У такому разі для прогнозування можливо використати геометричні методи.

Багато авторів пропонують спиратися на одиничні натурні експерименти для того, щоб переконатися в правильності фізичних основ тих або інших математичних моделей, уточнити теплофізичні і термодинамічні характеристики рослинних горючих матеріалів у результаті лабораторних експериментів, а основну частину дослідницької роботи здійснити шляхом математичного моделювання лісових пожеж на ЕОМ. Такий шлях розвитку математичної теорії лісових пожеж варто вважати більш ефективним і з наукової, і з експериментальної точок зору [1 - 9] однак він більше підходить для довгострокових стратегічних моделей у зв'язку з великими витратами часу на моделювання та уточнення параметрів.

Для локалізації та ліквідації таких надзвичайних ситуацій необхідно оперативно робити прогнозування на відносно короткий час. Моделей, які б дозволяли задовольнити в повному обсязі вимоги МНС сьогодні не існує. В статті розглядається модель за допомогою якої (самої або у комплексі з іншими) можливо більш повне задоволення цих вимог.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Конфігурація контурів пожеж може бути надзвичайно різноманітною, і в цьому є складність їх прогнозування [1]. Найбільш поширеними є форми кола, еліпса, трикутника, трапецієподібні з відростками у виді „пальців” тощо. Усі ці й інші можливі геометричні форми залежать від багатьох факторів, але визначальними є вид, кількість, структура горючих матеріалів і їхній вологовміст, температура і вологість повітря, швидкість вітру і топографії місцевості. У роботі [2] для випадку, коли пожежа під впливом вітру поширюється переважно в одному напрямку, як наближену оцінку збільшення периметра запропонована залежність між діаметром і довжиною кола.

У роботі [7] пропонується будувати модель у припущенні, що крайка лісової пожежі може бути описана плоскою кривою, що визначається безперервною однозначною функцією одного змінного, залежної від тимчасового параметра. Унаслідок цього з розгляду виключають ті звичайні випадки, у яких для опису крайки лісової пожежі приходиться використовувати довільну плоску криву, і автор зупиняється на поширенні тільки таких пожеж, крайка яких неперервна по всьому периметру і має просту геометричну форму, що дозволяє застосувати для її опису неперервну однозначну функцію.

У США для лісів Південної Каліфорнії розроблена система прогнозування пожеж для командного центра, що здійснює керування і координацію всіх сил і засобів, використовуваних при боротьбі з лісовими пожежами [8].

Система складається з ряду детермінованих математичних моделей, в основу яких покладені фізичні представлення про характер і властивості палива, величині теплових потоків, про умови запалення і характері зовнішнього середовища (метеоумови, рельєф). Процес дискретизується шляхом нанесення на досліджуваний район просторової сітки з величиною кожного осередку близько 0,4 га. Передбачається, що в межах одного осередку властивості і характер палива постійні, а територія і метеоумови однорідні.

У роботі [8] проблема прогнозування контуру вигорання лісової ділянки вирішується на основі ймовірносно - множинного підходу, що у свою чергу базується на теорії випадкових процесів. У роботі [9] наведено математичну модель лісових пожеж, яка базується на розв'язання диференціальних рівнянь.

Отже аналіз відомих моделей показав, що з усіх моделей найбільш перспективною для вирішення поставленої задачі є модель іміджевої екстраполяції [10, 11].

Постановка завдання та його вирішення. Модель іміджевої екстраполяції адаптувати для випадку прогнозування наступного фронту з врахуванням зони, де розповсюдження процесу матиме визначені абсолютні чи відносні швидкості.

При цьому модель залишається достатньо простою для використання програм, створених на основі цієї моделі у польових умовах, що дозволить суттєво поліпшити процес прийняття рішення при виборі сил та засобів гасіння конкретної лісової пожежі.

Спочатку наведемо приклад невеликого прогнозування контуру вигорання при лісовій пожежі, який базується на математичній моделі у вигляді диференціального рівняння.

Покажемо, що в процесі розв'язання диференціального рівняння можуть виходити помилкові результати. Тобто приведений нижче приклад показує, що при прогнозуванні контуру вигорання на основі диференціальних рівнянь не виключається поява і помилкові рішення. Тому необхідний додатковий аналіз отриманого рішення.

Нехай у прямокутній системі координат Oxy сім'ю контурів пожежі в часі t можна описати неявним рівнянням виду $\varphi(x, y, t) = 0$. Або, у диференціальній формі,

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + V_n |\text{grad } \varphi| = 0, \quad \varphi_{t=0} = \varphi_0(x, y) = 0, \quad (1)$$

де V_n - вектор швидкості переміщення контуру вигорання, а друге співвідношення є рівнянням контуру пожежі в початковий момент часу $t = 0$. Необхідно скласти рівняння контуру пожежі в момент часу $t = t_1$.

Для визначеності припустимо, що (абстрактний!) контур пожежі в початковий момент часу $t = 0$ прийняв форму еліпса

$$x = 3 \cos \lambda; y = \sin \lambda, \quad (2)$$

і що $V_n = 1$, тобто швидкість переміщення контуру «по нормалі» однакова і дорівнює одиниці. У цьому випадку контури утворять рівнобіжні лінії. У силу спрощень рівняння (1) прийме вид

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^2 = 1. \quad (3)$$

У роботі [10] показано, що для розв'язання рівняння (3) крім граничної умови (2) ще необхідно й умова в диференціальному виді $\frac{\partial \varphi}{\partial y} = -3 \frac{\sin \lambda}{\sqrt{\cos^2 \lambda + 9 \sin^2 \lambda}}$. У результаті застосування оператора PDEplot у середовищі Maple одержуємо розв'язок рівняння (3), що через його громіздкість приведемо в m-кодах (4)

$$\begin{aligned} \phi := \arctan(\text{RootOf} \\ _Z^2 - 1 + \text{RootOf}(72 _Z^4 - 48 _Z^3 x + (8 x^2 - 81 + t^2) _Z^2 + 54 _Z x - 9 x^2)^2), \\ \text{RootOf}(72 _Z^4 - 48 _Z^3 x + (8 x^2 - 81 + t^2) _Z^2 + 54 _Z x - 9 x^2)) - \arctan(\\ \text{RootOf}(8 _Z^4 - 16 _Z^3 y + (8 y^2 + 1 - 9 t^2) _Z^2 - 2 _Z y + y^2), \\ \text{RootOf}(_Z^2 + \text{RootOf}(8 _Z^4 - 16 _Z^3 y + (8 y^2 + 1 - 9 t^2) _Z^2 - 2 _Z y + y^2)^2 - 1)) \end{aligned} \quad (4)$$

На практиці зручно використовувати опис контуру вигоряння у вигляді

$$x = 3 \cos \lambda - \frac{t \cos \lambda}{\sqrt{\cos^2 \lambda + 9 \sin^2 \lambda}}; y = \sin \lambda - \frac{3t \sin \lambda}{\sqrt{\cos^2 \lambda + 9 \sin^2 \lambda}}. \quad (5)$$

Легко перевірити, що, наприклад, при $t = 1,5$ «рівнобіжний» еліпсові контур вигоряння буде мати вигляд, зображений на рис.1. Але це суперечить представленню про передбачувану крайку вигоряння.

Пояснити цей парадокс можна, якщо в системі координат $Oxut$ побудувати інтегральну поверхню, описану рівнянням (3). Інтегральна поверхня є графіком функції $\varphi(x, y, t)$ і являє собою поверхню рівного схилу (з кутом нахилу 45°), що спирається на обраний еліпс (рис. 2). Розсікаючи цю поверхню площинами рівня $t = \text{const}$ не важко помітити, що проекціями перетинів на координат-

ну площину Oxy будуть шукані контуру вигоряння. Тому що всі січні площини для математичної моделі «рівноцінні», той і утворений перетини повинні задовольняти її рішенням. З рис. 2 видно, що розсікаючи інтегральну поверхню площиною $t = 1,5$ одержимо перетин, зображений на рис. 1.

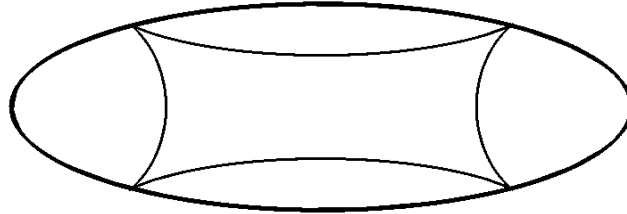


Рис. 1 – Еліпс і крива, що йому формально «рівнобіжна»

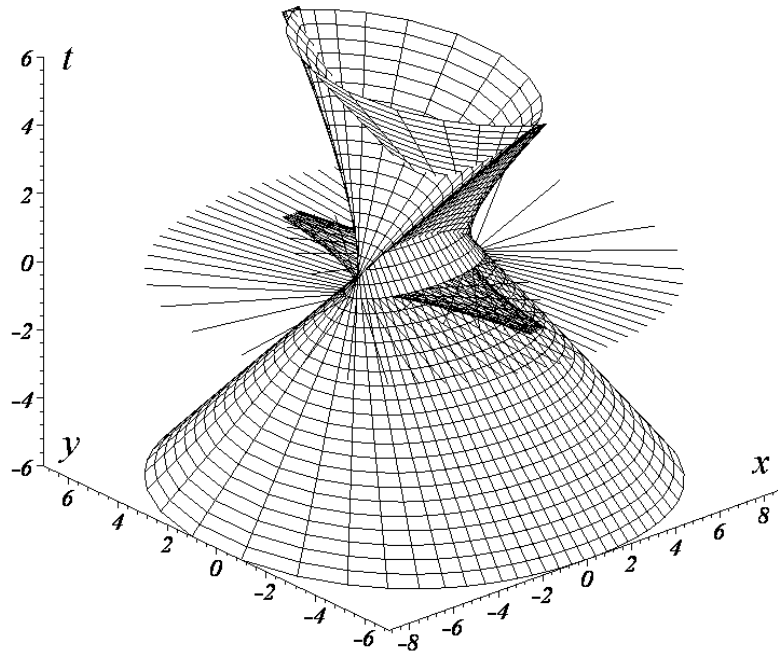


Рис. 2 – Інтегральна поверхня рівняння (3)

Вищевикладене пояснює прагнення розробити метод прогнозування контуру вигоряння, де не використовувалися б диференціальні рівняння. У результаті проведених досліджень з'явився метод іміджевої екстраполяції [10, 11].

Маємо два принципово різні варіанти вихідних умов: відоме місце початку процесу або відомо декілька контурів фронтів процесу на певні моменти часу.

Перший випадок найбільш простий. Відомо місце початку процесу та, можливо, зони, розповсюдження процесу в яких неможливо чи буде мати іншу швидкість [11].

Другий випадок більш складний. Відомі рівняння контурів процесу $F_i(x,y) = 0$ на деякі моменти часу t . За цими контурами доцільно реконструювати поверхню у просторі x,y,t .

Для цього необхідно спочатку отримати рівняння кожного відомого контуру у вигляді $F_i(x,y) = 0$. Пропонується апроксимувати кожен контур багатокутником з описом останнього у вигляді єдиного рівняння, побудованого на базі алгоритму В.Л.Рвачова [12] (з використанням R-кон'юнкції та R-диз'юнкції). Точність апроксимації залежить від допустимої похибки та вимог до складності розрахунків, що визначається кількістю обраних опорних точок.

Наступний етап – реконструкція поверхні по зазначеним перерізам, для чого пропонується використати векторний метод [1]. Цей метод дозволяє отримувати більш очікувані прогнози що допоможе прогнозувати поведінку процесу на визначений час. Векторним методом можливо як інтерполювати (реконструювати поверхню) так і екстраполювати (прогнозувати поведінку) для отримання контуру на час прогнозування.

$$F_{N+1} = F_N + (\tau_{N+1} - \tau_N) \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (F_{i+1} - F_i)}{\sum_{i=1}^{N-1} (\tau_{i+1} - \tau_i)}, \quad (6)$$

де F_i – рівняння контуру у вигляді $F_i(x,y)$, N – кількість відомих контурів, τ_i – час актуальності контуру i .

Однак пряме екстраполювання може дати уяву тільки про поведінку ідеального процесу (процесу який підпорядкований геометричним законам розповсюдження). Для прогнозування поведінки процесу з урахуванням впливу контурів з різною „вагою” пропонувалось включити до формули (6) коефіцієнт i^k який буде в залежності від значення k при прогнозуванні віддавати перевагу першим чи останнім контурам (коефіцієнт k підбирається при прогнозуванні оператором).

$$F_{N+1} = F_N + (\tau_{N+1} - \tau_N) \frac{\sum_{i=1}^{N-1} i^k (F_{i+1} - F_i)}{\sum_{i=1}^{N-1} i^k (\tau_{i+1} - \tau_i)}, \quad (7)$$

Такий підхід є суттєвим кроком до більш адекватного прогнозу, однак він теж має обмежену область використання. Наступним етапом є уявлення про параметр екстраполяції як функцію від координат, вологості, щільності тощо

$$c = F(x, y, \varphi, \rho, \alpha, \dots). \quad (8)$$

Це дозволяє перетворити (6) у

$$F_{N+1} = F_N + (\tau_{N+1} - \tau_N) c \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (F_{i+1} - F_i)}{\sum_{i=1}^{N-1} (\tau_{i+1} - \tau_i)}, \quad (9)$$

Для більшої наочності уявимо коефіцієнт c як поверхню ПВП (Поверхню Впливу Параметрів), яка являє собою коефіцієнт поправок швидкості у кожній точці площини

$$c = \prod_{i=1}^n c_i = \prod_{i=1}^n F_i(x, y, c_i'), \quad (10)$$

де n – кількість відомих параметрів, c_i' – НКВП (Нормалізований Коефіцієнт Впливу Параметру) окремі для всіх наявних параметрів таких як рельєф, вологість, густина лісових насаджень тощо.

Необхідно для всіх відомих параметрів які пропонується врахувати при прогнозі побудувати ПП (поверхні параметрів) - поверхні зміни їх значень по площині. Далі, використовуючи відомі значення зміни швидкості розповсюдження процесу в залежності від зміни параметрів побудувати НПВП (Нормалізовані Поверхні Впливу Параметру). Нормалізувавши їх відносно деякої швидкості розповсюдження, також на цьому етапі можливо накладати обмеження які властиві фізичному процесу, що розглядається (наприклад обмежити максимальну швидкість). У нашому випадку

НПВП буде завжди додатною у зв'язку із тим, що процес який ми розглядаємо (лісова пожежа) незворотній або дорівнювати нулю у місцях де розповсюдження процесу неможливе.

Вищезазначений підхід має певний недолік. Адже спочатку робиться прогноз, а потім накладається вплив відомих факторів. Це призведе до спотворення результату, що прогнозується. Для виключення цього недоліку пропонується створити „чисту” поверхню процесу. Тобто до початку екстраполявання виключити з відомих контурів вплив відомих факторів. Цей процес зворотній наданому раніше процесу накладення впливу факторів тому зупинятись на ньому не будемо. Далі необхідно екстраполювати вже саме „чисту” поверхню. Це дозволить врахувати при прогнозі саме ті фактори дані про які у нас відсутні. Якщо цього не зробити, то при прогнозуванні буде вважатись, що відомий фактор і далі змінюється так як і до цього а це може не відповідати дійсності. У такому разі буде враховуватись невірна інформація при наявності вірної.

Після побудови „чистої” поверхні на неї накладаються відомі фактори. Для отримання положення процесу у певний момент часу отриману після цього поверхню необхідно перетнути площиною рівня відносно координатної площини XOY на рівні значення t , яке відповідає часу прогнозування (до, після чи у проміжку між першим та останнім відомим контуром).

Висновки. Таким чином, «доробка» моделі іміджевої екстраполяції значно розширила її можливості для проведення оперативного короткострокового прогнозування розвитку надзвичайних ситуацій, які можливо уявити як двофазні гетерогенні системи на площині (наприклад лісові пожежі).

ЛІТЕРАТУРА

1. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. - Томск: Изд.ТГУ, 1981.- 278 с.
2. Mitchell Z.M. Rule of thumb determining rate of spread. - "Fire Control Notes", 1937, v.6, p. 395-396
3. Созник А.П. Геометрическая модель движения кромки низового лесного пожара // Проблемы пожарной безопасности. Вып.11. - Харьков: АПБУ. - 2002. С. 188-191.
4. Бурасов Д.М., Гришин А.М. Определение скорости распространения и экологических последствий степного пожара. XII

- Симпозиум по горению и взрыву, Черноголовка, 7 – 11 февраля, 2005. – С. 26 – 34.
5. Телицын Г.П. Расчет объема работ, скорости и продолжительности локализации лесного пожара.- Лесное хозяйство, 1965, N 4 , с. 44-47
 6. Коровин Г.Н. Методика расчета некоторых параметров низовых лесных пожаров. В сб. научно - исследовательских работ по лесному хозяйству. М.: Лесная промышленность, 1969, с. 330-345
 7. Луданов В.В. О геометрической форме лесного пожара. - Лесное хозяйство, 1973, N 3, с. 48-50
 8. Воробьев О.Ю., Валендик Э.Н. Вероятностное множественное моделирование распространения лесных пожаров.- Новосибирск: Наука, 1978.- 159 с.
 9. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров.- М: Лесная промышленность, 1979.- 160 с.
 10. Куценко Л.М., Шоман О.В, Васильев С.В. Передбачення кромки вигорання при лісовій пожежі методом іміджевої екстраполяції. // Проблеми пожежної безпеки. Харьков: Фолио, 2001. Вып. 10. - С. 98-102
 11. Васильев С.В., Ромин А.В. Геометрическое моделирование кромки выгорания методом имиджевое экстраполяции // Вестник Херсонского государственного технического университета. 2002. Т. 15, №2. С. 127-130.
 12. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. - Киев: Наукова думка, 1982. - 552 с.
nuczu.edu.ua