

Максим Чудак, Микола Сало*, Володимир Яркун*, Мар'ян Опришко*

¹ НЛТУ України, Львів, Україна, m.chudak@nltu.lviv.ua

² НЛТУ України, Львів, Україна. ORCID: 0009-0002-2548-5211,
mykola.salo@nltu.edu.ua

³ НЛТУ України, Львів, Україна. ORCID: 0000-0002-4876-1111,
yarkun@nltu.edu.ua

⁴ НЛТУ України, Львів, Україна. ORCID: 0009-0009-7981-9249,
m.opryshko@nltu.edu.ua

Програмно-алгоритмічне забезпечення моделювання поширення лісових пожеж

***Анотація.** У роботі представлено математичну модель поширення лісових пожеж, розроблену на основі диференціальних рівнянь у частинних похідних. Модель враховує основні фізичні фактори, що впливають на динаміку пожежі, такі як вологість середовища, кількість палива, вплив вітру та теплопередача. Алгоритм моделювання реалізовано методом скінченних різниць. Для реалізації моделі використано сучасні наукові бібліотеки Python, зокрема NumPy, Matplotlib, Plotly, а також інтерактивні віджети ipywidgets. Отримані результати дозволяють аналізувати поширення лісових пожеж залежно від заданих параметрів, таких як коефіцієнт дифузії, швидкість вітру та рівень вологості. Інтерактивний інтерфейс забезпечує гнучкість налаштування моделі та відображення результатів у вигляді двовимірних зрізів і тривимірних графіків.*

***Ключові слова** – математична модель, поширення лісових пожеж, метод скінченних різниць, бібліотеки Python, алгоритми.*

Вступ. Лісові пожежі є однією з найсерйозніших екологічних проблем сучасності, спричиняючи значні втрати. З огляду на зростання частоти та інтенсивності пожеж, особливо у зв'язку зі зміною клімату, актуальною є розробка ефективних методів прогнозування. Математичне моделювання, засноване на фізичних законах, надає ефективний інструмент для оцінки динаміки поширення вогню з урахуванням впливу різних факторів. Метою роботи є розробка математичної моделі поширення лісових пожеж, її програмна реалізація та аналіз впливу ключових параметрів. Новизна полягає у використанні сучасних підхо-

дів до моделювання з врахуванням дифузії, адвекції та реакції, а також інтеграція моделі з інструментами візуалізації у тривимірному просторі.

Аналіз існуючих рішень. Математичні моделі лісових пожеж поділяються на емпіричні (статистичні), напівемпіричні та фізичні (аналітичні). Найбільш актуальними є фізичні моделі, в основі яких лежать системи диференціальних рівнянь у частинних похідних (PDE). Чисельні методи, зокрема метод скінченних різниць, використовуються для розв'язання цих систем, моделюючи процеси поширення тепла та взаємодію вогню з середовищем. Сучасні технології передбачають інтеграцію моделей з геоінформаційними системами (GIS) для врахування географічних особливостей, а також застосування алгоритмів машинного навчання (ML/AI) для оцінки ймовірності займання та прискорення прогнозів. Наприклад, платформи OpenFOAM або FARSITE широко застосовуються для симуляції динаміки поширення пожеж. Дані з датчиків IoT, супутникових знімків і кліматичних моделей надходять у ці системи, забезпечуючи оновлення результатів моделювання кожні кілька хвилин. Датчики вологості, температури, вітру та диму встановлюються у лісах, що дозволяє виявляти перші ознаки займання. Ці пристрої передають дані через бездротові мережі до центральних систем, забезпечуючи швидке реагування на можливі загрози.

Програмна реалізація. Розроблена модель поширення пожежі базується на диференціальному рівнянні реакції-дифузії. Математична постановка реалізована через рівняння реакції-дифузії:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \nabla^2 u + R(u, v, h, f), \quad (1)$$

де $u(x, y, t)$ – інтенсивність горіння в точці (x, y) в момент часу t ;

D – коефіцієнт дифузії (залежить від горючості матеріалу);

$R(u, v, h, m)$ – (взаємодії полум'я з навколишніми умовами, залежне від палива h і вологості m).

Ця модель демонструє базову ідею поширення полум'я у двовимірному просторі з врахуванням реакційно-дифузійного підходу. Її можна розширити додаванням напрямку вітру чи впливу географічних особливостей.

Чисельний розв'язок реалізовано методом скінченних різниць.

Програмна реалізація виконана мовою Python. Використано бібліотеки:

- NumPy – для ефективних обчислень та роботи з багатовимірними масивами.
- Matplotlib і Plotly – для візуалізації 2D зрізів, анімацій та інтерактивних 3D графіків.

- ipywidgets – для створення інтерактивного інтерфейсу, що дозволяє користувачу змінювати параметри моделювання (коефіцієнт дифузії D , швидкість вигорання $burn_rate$, компоненти вітру v_x) за допомогою слайдерів.

Обчислювальне середовище – Google Colab забезпечило нам підтримку високопродуктивних обчислень.

Програмне забезпечення має модульну структуру і забезпечує введення даних за допомогою інтерактивного інтерфейсу, моделювання динаміки пожежі на основі математичної моделі,

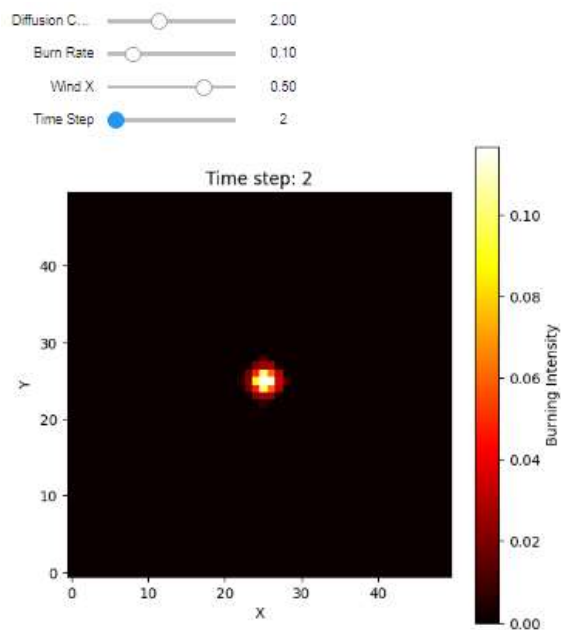
Модуль інтерактивного інтерфейсу – надає користувачу можливість взаємодії з моделлю через зручний графічний інтерфейс. Користувач може змінювати основні параметри (коефіцієнт дифузії, швидкість вітру, рівень вологості, час симуляції) за допомогою слайдерів Рис.1.

Файл `fire_model.py` є основою математичного моделювання поширення лісових пожеж. У ньому реалізовано чисельне розв'язання системи рівнянь, що враховують фізичні процеси, такі як дифузія, адвекція та реакція. Основна функція цього модуля – моделювати динаміку пожежі у вигляді масиву даних, який зберігає стан інтенсивності горіння на кожному часовому кроці.

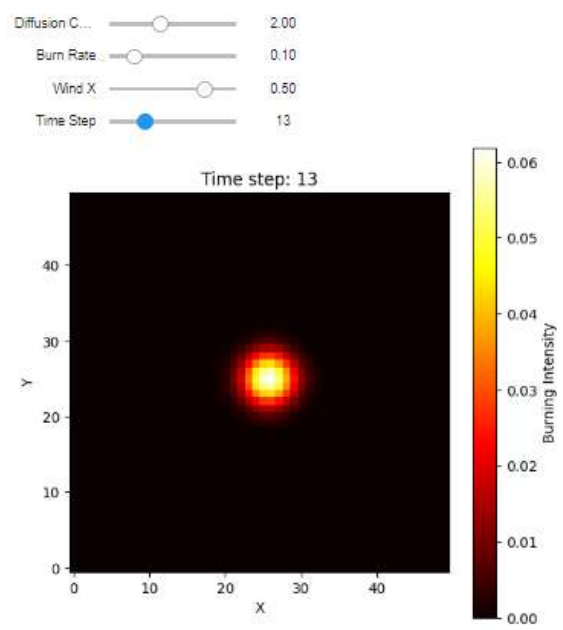
Файл `visualization.py` відповідає за візуалізацію результатів моделювання поширення лісових пожеж. Він реалізує побудову графіків, анімацій та інтерактивних візуалізацій, щоб полегшити аналіз динаміки поширення пожежі. Основна увага приділяється можливості аналізу даних у різних часових зрізах.

Time Step вказує на конкретний момент часу, для якого виводиться розподіл інтенсивності горіння. З часом пожежа змінює динаміку: спочатку активно розростається, потім її інтенсивність зменшується через витрату палива та вплив вологості. На середніх часових кроках (Time Step = 20-30) (Рис. 1.б, в) пожежа досягає найбільшого просторового розповсюдження. У центрі осередку

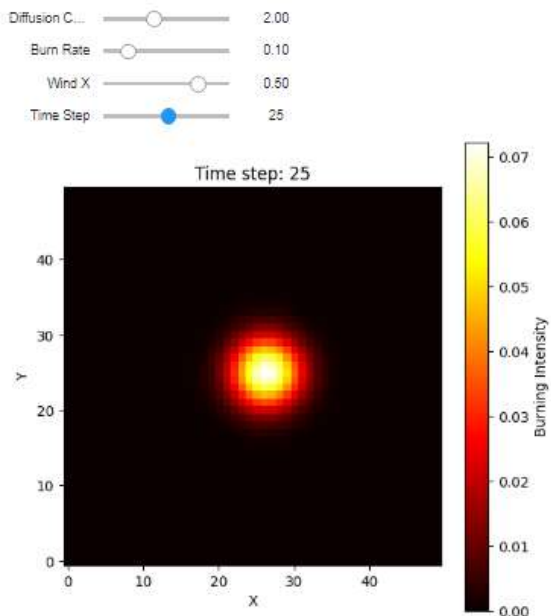
інтенсивність горіння починає зменшуватися через витрату палива. На пізніх часових кроках (Time Step = 40-50) (рис.1.г) пожежа поступово згасає, залишаючи білі зони з низькою інтенсивністю або повністю вигорілими ділянками.



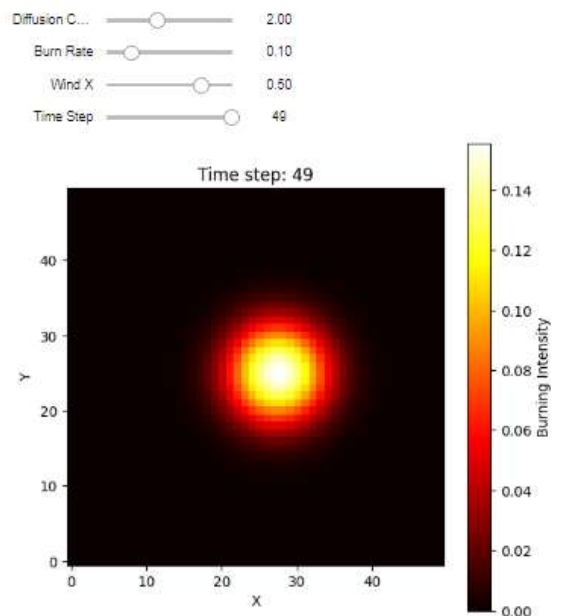
а. Для Time Step = 2: Вогонь тільки починає розповсюджуватися, висока інтенсивність біля центру.



б. Для Time Step = 13: Вогонь починає розповсюджуватися, висока інтенсивність біля центру.



в. Для Time Step = 25: Пожежа розширилася, але інтенсивність горіння стала більш рівномірною.



г. Для Time Step = 49: Інтенсивність горіння майже зникла, видно вигорілі області.

Рисунок 1. Поширення пожежі на різних часових кроках

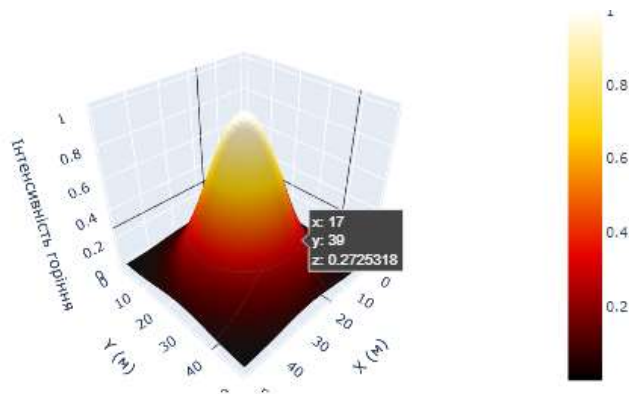


Рисунок 2. Інтенсивність пожежі у вказаній точці

Інтенсивність пожежі у певній точці продемонстровано на рис 2.

Висновок. Розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення для моделювання поширення лісових пожеж на основі диференціальних рівнянь у частинних похідних, реалізоване методом скінченних різниць в Python. Система враховує ключові фізичні фактори (вологість, паливо, вітер, теплопередача). Інтерактивний інтерфейс забезпечує гнучкий аналіз динаміки пожежі, дозволяючи дослідникам оцінювати вплив параметрів на поширення вогню. Результати можуть бути використані для прогнозування поширення пожеж, розробки стратегій запобігання та навчання фахівців з управління природними катастрофами.

Список використаних літературних джерел

- [1] Товарянський В. І., Кузик А. Д. Дослідження пожежі молодих соснових насаджень // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Львів : Вид-во ЛДУ БЖД. – 2016. – № 28. – С. 113-120.
- [2] Пустовіт М. О. Моделювання поширення пожежі всередині будівель у тривимірному просторі методом клітинних автоматів / М. О. Пустовіт // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2013. - Вип. 1. - С. 164-168.
- [3] Weber R.O. Modelling spread through fuel beds. Progress in Energy and Combustion Science, 1991. – P. 17 – 67.

Software and algorithm support for modeling the spread of forest fires

Maksym Chudak, Mykola Salo, Volodymyr Yarkun, Maryan Opryshko

The paper presents a mathematical model of forest fire spread, developed using partial differential equations. The model considers key physical factors influenc-

ing fire dynamics, such as environmental moisture, fuel availability, wind impact, and heat transfer. The modeling algorithm is implemented using the finite difference method and modern Python scientific libraries (NumPy, Matplotlib, Plotly). The obtained results enable the analysis of forest fire propagation depending on input parameters, including grid size, diffusion coefficient, wind velocity, and moisture level. The interactive interface provides flexibility in configuring the model and visualizing results as two-dimensional slices and three-dimensional plots.