

УДК 004.942:504.06:378.147:37.091.33-027.22

Дмитро Одновол, старший викладач
кафедри вищої математики і фізики,
Валерій Кідалов, доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри вищої математики і фізики,
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного, м. Запоріжжя, Україна

STEM-ОРІЄНТОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ТОКСИЧНИХ ВИКИДІВ У MATLAB В ПРОЦЕСІ НАВЧЕННЯ ФІЗИКИ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ З ЕКОЛОГІЇ

Анотація. Запропоновано STEM-орієнтовану MATLAB-систему моделювання поширення токсичних речовин в атмосфері для підготовки фахівців спеціальності E2 «Екологія». Розроблена модель ґрунтується на підходах Gaussian Plume та Gaussian Puff, що забезпечує можливість аналізу процесів атмосферної дисперсії токсичних викидів, оцінювання концентрації забруднювачів, визначення зон небезпеки та прогнозування часової динаміки поширення токсичної хмари. У середовищі MATLAB реалізовано візуалізацію динаміки хмари, побудову контурних карт перевищення гранично допустимих концентрацій, інтерактивний вибір параметрів аварії та розрахунок дозового навантаження. Акцентовано увагу на інтеграції STEM-компонентів: математичного моделювання, атмосферної фізики, цифрових технологій та екологічного аналізу. Такий підхід спрямований на розвиток дослідницьких компетентностей здобувачів освіти, навичок роботи з цифровими інженерними інструментами та практичної підготовки до оцінювання екологічних ризиків.

Ключові слова: STEM-освіта, MATLAB, екологія, математичне моделювання, токсичні викиди, Gaussian Puff, Gaussian Plume, атмосферна дисперсія, екологічний моніторинг, екологічні ризики.

Abstract. The paper proposes a STEM-oriented MATLAB-based system for modeling the atmospheric dispersion of toxic substances, designed for the professional training of students majoring in E2 «Ecology». The developed model is based on the Gaussian Plume and Gaussian Puff approaches, enabling analysis of atmospheric dispersion processes, estimation of pollutant concentrations, identification of hazard zones, and temporal prediction of toxic cloud dynamics. Within the MATLAB environment, the system implements cloud dynamics visualization, construction of contour maps for maximum permissible concentration exceedances, interactive selection of accident parameters, and dose load calculations. Particular focus is placed on the integration of STEM components: mathematical modeling, atmospheric physics, digital

technologies, and environmental analysis. This approach aims to develop students' research competencies, proficiency with digital engineering tools, and practical training in environmental risk assessment.

Keywords: STEM education, MATLAB, ecology, mathematical modeling, toxic emissions, Gaussian Puff, Gaussian Plume, atmospheric dispersion, environmental monitoring, environmental risks.

Трансформація інженерної освіти в межах STEM-підходу вимагає впровадження інструментів, які поєднують теоретичну підготовку з розв'язанням прикладних задач. Для майбутніх екологів критично важливим є розуміння фізичних процесів розсіювання забруднюючих речовин. Використання MATLAB як платформи для моделювання уможливорює перехід від абстрактних формул до наочного аналізу складних атмосферних явищ [1-3]. MATLAB дозволяє поєднати математичний апарат, програмування, чисельні методи, інженерний аналіз та візуалізацію результатів у межах єдиної дослідницької платформи [4].

Застосування MATLAB для моделювання атмосферного переносу токсичних речовин набуває особливої актуальності під час аварійних викидів на промислових підприємствах, складах хімічних речовин, газових станціях або транспортних об'єктах. Використання таких моделей забезпечує можливість оцінювання масштабів екологічної небезпеки, прогнозування концентрації забруднювачів та формування зон евакуації населення [5-7].

Мета роботи полягає у розробці STEM-орієнтованої MATLAB-системи моделювання поширення токсичних речовин в атмосфері для формування дослідницьких компетентностей студентів спеціальності Е2 «Екологія» під час вивчення курсу фізики.

У межах дослідження реалізовано комплекс моделей атмосферної дисперсії токсичних речовин на основі алгоритмів Gaussian Plume та Gaussian Puff у вигляді GUI-додатка в середовищі MATLAB [5, 6].

Функціонал розробленої системи забезпечує можливість моделювати поширення токсичної хмари, аналізувати вплив метеорологічних параметрів на

процеси дисперсії, визначати зони перевищення гранично допустимих концентрацій, оцінювати час підходу токсичної хмари до контрольних точок, розраховувати дозове навантаження, виконувати інтерактивні STEM-дослідження.

Математична модель. Математичний опис процесів ґрунтується на гаусівському наближенні атмосферної дисперсії [7]:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right],$$

де Q – інтенсивність викиду, u – швидкість вітру, σ_y, σ_z – коефіцієнти атмосферного розсіювання, H – висота джерела викиду. Представлене рівняння описує класичну модель Gaussian Plume, що використовується для аналізу атмосферної дисперсії [5, 6].

Зазначена модель забезпечує можливість оцінювання концентрації токсичної речовини у будь-якій точці простору залежно від метеорологічних параметрів та характеристик аварії. Для моделювання динаміки поширення в часі застосовано підхід Gaussian Puff, за якого аварійний викид представляється як сукупність окремих дискретних порцій речовини («пакетів» або puffs), що переміщуються разом із повітряним потоком.

Реалізація моделі у MATLAB. Програмний комплекс реалізовано у вигляді інтерактивної MATLAB-системи з використанням функціоналу Partial Differential Equation Toolbox. Система охоплює [4]:

- математичне ядро;
- блок розрахунку атмосферної дисперсії;
- систему візуалізації;
- модуль анімації руху токсичної хмари;
- алгоритм визначення зон небезпеки;
- STEM-інтерфейс для навчальних досліджень.

Алгоритми системи підтримують кілька типів сценаріїв: нейтральні гази, важкі гази, миттєвий викид, безперервний викид. Для моделювання важких газів

інтегровано спрощену модель (dense gas model), яка враховує гравітаційне розтікання («стелення») токсичної хмари вздовж поверхні землі.

Архітектура програмного комплексу, що використано під час моделювання представлено на рис. 1.



Рис. 1. Архітектура програмного комплексу для моделювання атмосферної дисперсії токсичних речовин

Архітектура програмного комплексу охоплює чотири ключові модулі, що забезпечують повний цикл моделювання атмосферної дисперсії токсичних речовин. У модулі вхідних даних задаються параметри викиду, метеорологічні умови та характеристики джерела. Ці дані формують початкові умови для розрахунків. Під час реалізації модуля моделювання формується просторова сітка, обчислюються коефіцієнти дисперсії за апроксимаціями Пасквілла-Гіффорда та реалізуються алгоритми Gaussian Plume і Gaussian Puff для визначення концентрацій у просторі та часі. Модуль візуалізації передбачає генерацію системою анімації руху токсичної хмари (рис. 2), контурні карти небезпечних зон (рис. 3) та графічні представлення концентрацій (рис. 4). Визначення порогових

концентрацій ґрунтується на офіційних рекомендаціях ЕРА та АІНА [9, 10], що забезпечує відповідність моделі міжнародним стандартам та посилює її практичну значущість для сфер екологічної та цивільної безпеки.

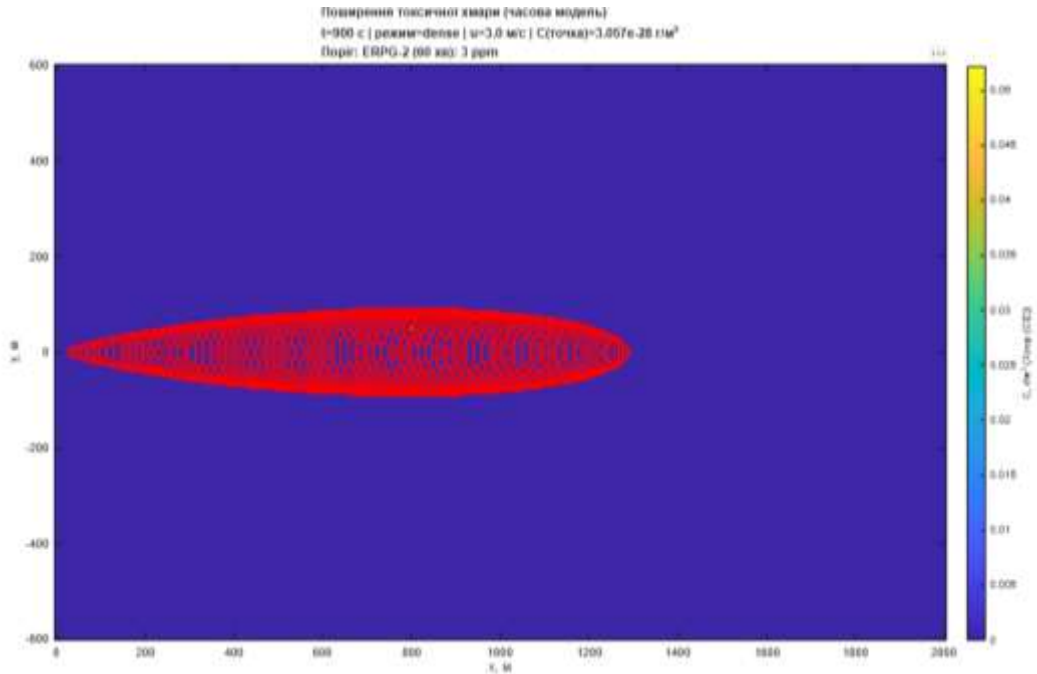


Рис. 2. Анімація руху токсичної хмари

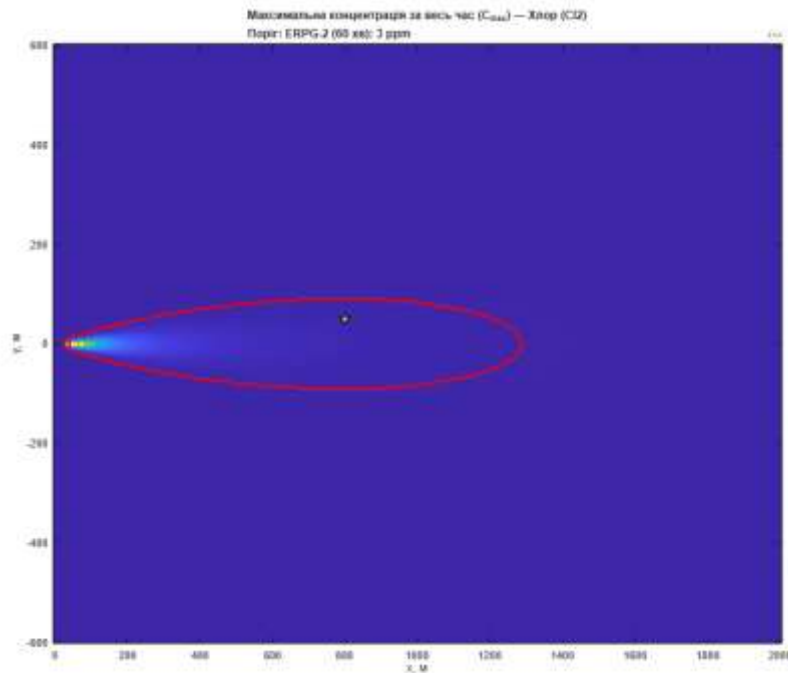


Рис. 3. Контурні карти небезпеки

Аналіз результатів моделювання дав змогу встановити низку характерних закономірностей. Зокрема, збільшення швидкості вітру призводить до зниження локальних концентрацій домішок, тоді як важкі гази формують приземні хмари з підвищеним рівнем небезпеки, що узгоджується з відомими дослідженнями атмосферної дисперсії токсичних речовин [5, 6]. Визначено, що класи стабільності атмосфери істотно впливають на просторові масштаби можливого ураження. Крім того, динамічне моделювання забезпечує можливість точного прогнозування моменту досягнення критичних рівнів концентрації, що є важливим для оперативного оцінювання ризиків.

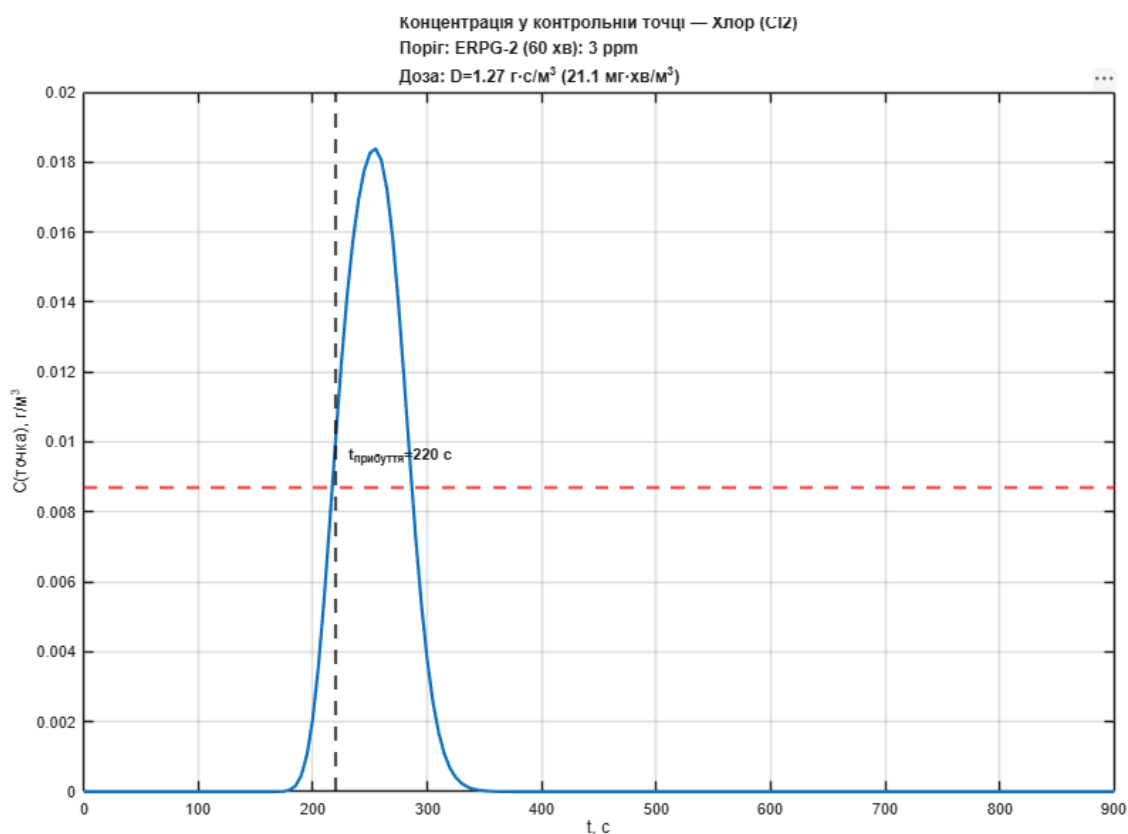


Рис. 4. Контурні карти небезпеки

Результати дослідження. Завдяки роботі з програмним комплексом здобувачі освіти залучаються до проведення цифрових експериментів, аналізу впливу вхідних параметрів на стан довкілля, формування дослідницьких гіпотез та опрацювання реальних екологічних сценаріїв. Така діяльність сприяє розвитку

навичок застосування математичного моделювання у майбутній професійній практиці.

Узгоджене поєднання наукової, технологічної, інженерної та математичної складових формує цілісну STEM-модель навчання, у межах якої здобувачі освіти не лише опановують теоретичні основи, а й набувають практичних компетентностей у сфері екологічної та техногенної безпеки. Інтеграція анімації та інтерактивних модулів у MATLAB забезпечує наочність цифрових експериментів, підтримує аналіз прикладних екологічних ситуацій і сприяє розвитку дослідницьких умінь майбутніх екологів [4, 8].

Створені моделі можуть бути результативно інтегровані в різні освітні формати, зокрема лабораторний практикум, STEM-проекти, курси екологічного моніторингу, дисципліни з цивільної безпеки та науково-дослідну діяльність здобувачів освіти.

Список використаних джерел

1. Дяденчук А. Ф., Шквиря В. В. Формування інформаційно математичної компетентності здобувачів вищої освіти в загальному курсі фізики. *Інженерні та освітні технології*. 2022. Т. 10, № 1. С. 30–41.
2. Дяденчук А. Ф. Сучасні цифрові інструменти як каталізатор інтересу до фізики в закладах вищої освіти. *Удосконалення освітньо-виховного процесу в закладі вищої освіти: збірник науково-методичних праць*. 2025. Вип. 28. С. 100-108
3. Одновол Д. Г. Моделювання технологічних процесів харчових виробництв засобами СКМ Matlab як інструмент підвищення якості освіти та виробництва. *Розвиток сучасної науки та освіти : реалії, проблеми якості, інновації: матеріали VI Міжнародної наук.-практ. інтернет-конф. (м. Запоріжжя, 28-30 травня 2025 р.) / [ред.колегія: С. В. Кюрчев, В. О. Радкевич, В. М. Кюрчев та ін.]. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. С. 167-178.*
4. MathWorks. *Partial Differential Equation Toolbox Documentation*. URL: <https://www.mathworks.com/help/pde/index.html> (дата звернення 02.05.2026).
5. Seinfeld J. H., Pandis S. N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 3rd ed. Hoboken : Wiley, 2016. 1120 p.
6. Hanna S. R., Briggs G. A., Hosker R. P. *Handbook on Atmospheric Diffusion*. Washington, D.C. : U.S. Department of Energy, 1981. 102 p.
7. Micallef A., Micallef C. The Gaussian Plume Model Equation for Atmospheric Dispersion Corrected for Multiple Reflections at Parallel Boundaries: A Mathematical

- Rewriting of the Model and Some Numerical Testing. *Sci.* 2024. V. 6. P. 48.
<https://doi.org/10.3390/sci6030048>
8. Crowl D. A., Louvar J. F. *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*. 4th ed. Hoboken : Pearson, 2019. 960 p.
9. U.S. Environmental Protection Agency. *Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs)*. URL: <https://www.epa.gov/aegl> (дата звернення 02.05.2026).
10. American Industrial Hygiene Association. *ERPG™ Emergency Response Planning Guidelines*. URL: <https://www.aiha.org/get-involved/aiha-guideline-foundation/erpgs> (дата звернення 02.05.2026).