

УДК 504.4.054:519.87

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.147.2.48>

ПРОГНОЗ ЗАБРУДНЕННЯ РІЧКОВОЇ ВОДИ ВНАСЛІДОК ПОТРАПЛЯННЯ ХЛОРВМІСНОЇ РІДИНИ

Щербина І. В. – к.ф.-м.н,

доцентка кафедри вищої математики, фізики та загальноінженерних дисциплін,
Дніпровський державний аграрно-економічний університет
orcid.org/0000-0003-3968-4326

Клецков О. М. – старший викладач кафедри вищої математики, фізики
та загальноінженерних дисциплін,

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
orcid.org/0000-0003-2587-4647

Запорожченко В. Ю. – к.с.н,

доцентка кафедри водогосподарської інженерії,
Дніпровський державний аграрно-економічний університет
orcid.org/0000-0002-4642-2917

Сахно В. М. – к.ф.-м.н,

доцент кафедри вищої математики, фізики та загальноінженерних дисциплін,
Дніпровський державний аграрно-економічний університет
orcid.org/0000-0002-2314-4547

У статті розглянуто процеси поширення хлору у річковому середовищі після аварійного скиду хлорвмісної рідини, що є актуальною проблемою для оцінки ризиків техногенного впливу на водні екосистеми. Враховано фізико-хімічні властивості хлору, зокрема його здатність до швидкого розчинення у воді, утворення активних форм та взаємодії з органічними і неорганічними речовинами. Предметом дослідження є математичне моделювання динаміки концентрації хлору з урахуванням гідродинамічних факторів та хімічної деструкції речовини. Особливу увагу приділено гідрологічним характеристикам річки – швидкості течії, глибині, ширині русла, турбулентності потоку та температурним умовам, що суттєво впливають на інтенсивність перенесення та розсіювання хлору.

У дослідженні розглянуто екологічні параметри води, включно з вихідною мінералізацією, кислотно-лужним балансом та концентрацією розчинених органічних речовин, які визначають швидкість хімічних перетворень хлору. Також враховано специфіку аварійної ситуації – об'єм та тривалість скиду, режим надходження забруднювача, початкову концентрацію та локалізацію джерела.

У ході дослідження розв'язано завдання щодо аналізу фізико-хімічної специфіки хлору, обґрунтування вибору адвекційно-дисперсійного рівняння та чисельної реалізації моделі. На основі рівняння конвекції-дифузії побудовано математичну модель прогнозування концентрації хлору в різних точках річки протягом 24 годин після аварії. Отримано просторово-часові розподіли концентрації хлору для ділянки річки довжиною 10 км. Встановлено, що в перші години після аварії формується виражена імпульсна хвиля забруднення, де домінуючу роль відіграє конвективний перенос. Доведено, що турбулентна дисперсія призводить до поступового розширення плями забруднення вздовж русла, а пікові концентрації експоненціально знижуються внаслідок сукупної дії розведення та хімічної взаємодії з компонентами води. Модель дозволяє оцінити як максимальні концентрації, так і часову динаміку їхнього зниження під впливом природних процесів самоочищення. Проведено аналіз потенційних екологічних наслідків, зокрема ризиків для гідробіонтів, можливих порушень кисневого режиму та загроз для водокористування. Зроблено висновки



щодо стійкості річкової екосистеми до такого типу забруднення та окреслено напрями подальшого вдосконалення моделей прогнозування техногенних впливів.

Ключові слова: конвекція, дифузія, поширення хлору, оцінка екологічних наслідків, аварійний скид, адвекційно-дисперсійне рівняння.

Shcherbyna I. V., Kletskov O. M., Zaporozhchenko V. Yu., Sakhno V. M. Forecasting River Water Contamination Following an Accidental Release of Chlorine-Containing Liquids

The article examines the processes of chlorine dispersion in a river environment following an accidental release of chlorine-containing liquid, which is a critical issue for assessing the risks of anthropogenic impact on aquatic ecosystems. The study accounts for the physicochemical properties of chlorine, specifically its capacity for rapid dissolution in water, the formation of active species, and interactions with organic and inorganic substances. The subject of the research is the mathematical modeling of chlorine concentration dynamics, considering hydrodynamic factors and the chemical degradation of the substance. Special attention is paid to the hydrological characteristics of the river – flow velocity, depth, channel width, flow turbulence, and temperature conditions – which significantly influence the intensity of chlorine transport and dispersion.

The study considers the environmental parameters of the water, including baseline mineralization, acid-base balance, and the concentration of dissolved organic matter, which determine the rate of chemical transformation of chlorine. It also accounts for the specific characteristics of the emergency situation, such as the volume and duration of the release, the pollutant input regime, initial concentration, and source localization.

In the course of the research, tasks were completed regarding the analysis of the physicochemical specifics of chlorine, the justification for selecting the advection-dispersion equation, and the numerical implementation of the model. Based on the convection-diffusion equation, a mathematical model was developed to predict chlorine concentration at various points in the river during the 24 hours following the accident. Spatio-temporal distributions of chlorine concentration were obtained for a 10 km river section. It was established that an explicit pulse wave of pollution forms in the first hours after the accident, where convective transport plays a dominant role. It is proven that turbulent dispersion leads to the gradual expansion of the contaminant plume along the channel, while peak concentrations decrease exponentially due to the cumulative effect of dilution and chemical interaction with water components.

The model allows for the assessment of both maximum concentrations and the temporal dynamics of their decrease under the influence of natural self-purification processes. An analysis of potential environmental consequences was conducted, including risks to hydrobionts, possible disruptions of the oxygen regime, and threats to water consumption. Conclusions were drawn regarding the resilience of the river ecosystem to this type of pollution, and directions for further improvement of models for predicting anthropogenic impacts were outlined.

Key words: convection, diffusion, chlorine dispersion, environmental impact assessment, accidental release, advection-dispersion equation.

Актуальність теми дослідження. Проблема аварійних хімічних забруднень водних об'єктів є однією з ключових у сучасній екологічній безпеці. Потрапляння хлору або хлорвмісних речовин у річкові системи може спричинити значні негативні наслідки для якості води, біорізноманіття та функціонування екосистеми. Хлор належить до сильноїдіючих окиснювачів, здатних вступати у реакції з органічними та неорганічними компонентами води, формуючи токсичні вторинні продукти.

Потрапляння хлорвмісних рідин у річкову екосистему спричиняє низку негативних біотичних та абіотичних наслідків, що впливають на структурно-функціональну організацію водних біогеоценозів. Розглянемо основні з них:

Хлорвмісні сполуки здатні утворювати у воді активний хлор, гіпохлорити та вторинні токсичні продукти, включаючи орґанохлорні похідні. Це призводить до різкого підвищення окислювального потенціалу, зміни рН, а також зменшення розчиненого кисню через інтенсивні реакції хлорування.

Хлор та його реакційні продукти мають виражену цитотоксичну дію: пошкоджують епітелій зябер у риб, порушують осморегуляцію, інгібують ферментні

системи, зокрема антиоксидантні, спричиняють оксидативний стрес. У безхребетних відзначається зниження рухової активності, порушення репродуктивних функцій та масова загибель при підвищених концентраціях токсиканта.

Хлорвмісні речовини пригнічують фотосинтетичну активність, руйнують пігментні комплекси та порушують структуру клітинних мембран водоростей. Це веде до різкого зниження первинної продукції та зміни видового складу, що порушує енергетичний баланс екосистеми.

Зменшення чисельності планктонних і бентосних організмів впливає на всю трофічну мережу: риби та інші хижаки втрачають кормову базу. Внаслідок цього спостерігаються зміни у видовій структурі іхтіофауни, включно зі зникненням чутливих видів і домінуванням більш толерантних.

Частина хлорорганічних продуктів сорбується на завислих частинках і осідає у донних відкладеннях, формуючи довготривалі резервуари забруднення. Ці сполуки можуть повторно надходити у водне середовище, підтримуючи хронічну токсичність та створюючи ризики для бентосних організмів і риб.

Хронічне або масивне забруднення призводить до спрощення екосистемної структури, втрати чутливих видів, порушення біогеохімічних циклів та зниження здатності екосистеми до самоочищення. Це може спричинити довготривалі зміни гідроекологічного режиму, включно з евтрофікацією або, навпаки, заморними явищами.

Постановка проблеми. Метою роботи є дослідження закономірностей поширення хлору у водному середовищі та розробка математичної моделі прогнозування його концентрації після аварії. Завданнями дослідження є аналіз фізико-хімічних властивостей хлору, вивчення процесів розчинення, дифузії та конвекції у воді, а також оцінка можливих екологічних наслідків забруднення.

Методика досліджень. Аналіз наукових публікацій дозволяє виділити три основні напрями, що складають теоретичну базу для моделювання поширення хлору в річкових системах.

Фундаментальною основою для розрахунку переносу забруднюючих речовин залишається адвекційно-дисперсійне рівняння. Автори [2], у своєму огляді чисельних методів підкреслюють, що для річкових систем із високою швидкістю течії (як у нашому випадку) критично важливо правильно обрати чисельну схему, щоб уникнути «чисельної дифузії», яка може викривити результати прогнозу.

Питання турбулентної дисперсії детально досліджено у роботі [4]. Автори пропонують нові емпіричні формули для визначення коефіцієнта поздовжньої дисперсії, що базуються на геометрії русла. Їхні дослідження доводять, що саме турбулентне змішування, а не молекулярна дифузія, відіграє вирішальну роль у розтягуванні плями забруднення вздовж течії.

Оскільки хлор є реакційно здатною речовиною, його концентрація зменшується не лише через розведення, а й через хімічні взаємодії. Автори [1] фокусують увагу на кінетиці розпаду вільного хлору, вказуючи, що швидкість реакції суттєво залежить від початкового складу води. Задана у даній роботі швидкість корелює з даними роботи [3]. Зазначається, що наявність органічних речовин є основними каталізаторами споживання активного хлору, що призводить до утворення вторинних забруднювачів.

Для прогнозування наслідків раптових скидів особливу цінність має робота [5]. Автори розглядають інтегровані модулі «гідродинаміка + якість води», які дозволяють за лічені хвилини розрахувати час підходу токсичного піку до контрольних створів. Перспективи розвитку таких моделей представлені у дослідженні [8], де

пропонується використання алгоритмів машинного розрахунку для уточнення класичних дифузійних моделей у режимі реального часу. Це особливо актуально для нашого віка моделювання, де інтервал розрахунків дозволяє гнучко коригувати прогноз залежно від зміни погодних або гідрологічних умов.

Дослідження [6], [7] адаптують глобальні моделі до специфіки річок України. Вони наголошують на важливості врахування антропогенного навантаження та фонового стану річок при розрахунку самоочисної здатності водних об'єктів, що є важливим для оцінки екологічних наслідків на ділянці моделювання.

Проте залишається потреба у більш детальному дослідженні впливу помірною рівня турбулентності на швидкість вертикального перемішування хлору в умовах мілководних річок, що і робить дану роботу актуальною.

Результати досліджень. Постановка задачі.

Відбувся аварійний скид хлорвмісної речовини у річку. Аварійний скид відбувся на відстані 3 км від початкової точки моделювання. Параметри події:

- об'єм скиду – 2000 л;
- тип джерела – миттєвий точковий викид;
- час аварії – 10:00.

Хлор активно реагує з органічними речовинами, амонійними сполуками, мікроорганізмами та розчиненим киснем. Це призводить до утворення хлорорганічних сполук і хлоритів, що мають токсичний вплив на біоту.

Поширення забруднювача залежить від морфометрії та гідродинаміки річки. У досліджуваному випадку параметри такі: ширина – 40 м; глибина – 3 м; швидкість течії – 1,2 м/с; витрата води – 180 м³/с; довжина ділянки моделювання – 10 км.

Течія забезпечує переважно конвективний перенос розчиненого хлору вниз за течією. Дифузія та турбулентне перемішування сприяють розподілу забрудника у поперечному та вертикальному напрямках. До параметрів, що впливають на стійкість водної системи до хлорного забруднення, належать: температура води – 15 °С; вміст органічних речовин – 5 мг/л; розчинений кисень – 8 мг/л; кількість мікроорганізмів – 10⁶ клітин/мл.

Органічні речовини та мікроорганізми виступають факторами хімічного та біотичного споживання хлору. Ці процеси знижують його концентрацію, але водночас можуть формувати токсичні побічні продукти.

Хлор – високореакційний елемент, який характеризується значною розчинністю у воді. Основні властивості, що впливають на його поведінку у водному середовищі: концентрація хлору в аварійному розчині – 300 мг/л; розчинність хлору у воді (при 25 °С) – 7,3 г/л; коефіцієнт дифузії – 1,6 · 10⁻⁵ см²/с; швидкість реакції з органічними речовинами – 0,5 моль/л/хв.

Математична модель задачі

Для прогнозування поширення хлору у річковому середовищі після аварійного миттєвого скиду використано одновимірну модель переносу забруднювальної речовини, що базується на рівнянні конвекції–дифузії з урахуванням хімічного розкладу.

Процес зміни концентрації хлору у водному середовищі описується рівнянням:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - kC,$$

де: C – концентрація хлору, мг/м³; u – середня швидкість течії річки, м/с; D – коефіцієнт поздовжньої турбулентної дисперсії, м²/с; k – константа хімічної деструкції хлору, с⁻¹.

Моделювання проводилось протягом 24 годин із часовим кроком 30 хвилин. Початкова умова – миттєвий викид хлорвмісної рідини.

$$C(x, t) = 0, \quad t < t_0;$$

$$C(x, t_0) = \frac{M}{A} \delta(x - x_0);$$

де M – загальна маса забруднюючої речовини; A – поперечний переріз річки; x_0 – координата місця аварійного скиду; $\delta(\cdot)$ – дельта-функція Дірака.

Проведемо покрокові розрахунки в рамках нашої моделі. Площа поперечного перерізу річки становить:

$$A = b \cdot h = 40 \cdot 3 = 120 \text{ м}^2.$$

Об'єм аварійного скиду дорівнює 2000 л (2 м^3), а концентрація хлору в розчині – 300 мг/л, що відповідає загальній масі:

$$M = 2000 \cdot 300 = 6 \cdot 10^5 \text{ мг.}$$

Коефіцієнт поздовжньої дисперсії визначено за емпіричною залежністю для природних руслових потоків:

$$D = 0,6 \cdot u \cdot h = 0,6 \cdot 1,2 \cdot 3 = 2,16 \text{ м}^2/\text{с.}$$

Зменшення концентрації хлору у водному середовищі зумовлене сукупною дією фізико-хімічних та біологічних процесів, до яких належать реакції з розчиненими органічними речовинами, амонійними сполуками, мікроорганізмами, а також взаємодія з розчиненим киснем. З огляду на складність повного опису кінетики зазначених процесів у межах інженерної моделі, їхній сумарний вплив враховано у вигляді ефективного коефіцієнта деструкції першого порядку.

Ефективний коефіцієнт деструкції k подано як суму окремих складових:

$$k = k_{org} + k_{bio} + k_{O_2},$$

де k_{org} характеризує хімічне споживання хлору органічними речовинами, k_{bio} – біотичне споживання мікроорганізмами, k_{O_2} – реакції з розчиненим киснем.

Хімічне споживання хлору органічними речовинами у воді часто описується кінетикою псевдопершого порядку, коли концентрація органічного субстрату змінюється повільніше порівняно з концентрацією активного хлору. У такому випадку відповідна складова коефіцієнта деструкції може бути подана у вигляді:

$$k_{org} = k_1 C_{org},$$

де C_{org} – концентрація розчинених органічних речовин, а k_1 – емпірична константа, що залежить від хімічного складу органіки та температури води.

Біотичне споживання хлору зумовлене його реакціями з клітинними оболонками мікроорганізмів та внутрішньоклітинними компонентами. За умови відносно стабільної чисельності мікробіоти на часовому інтервалі моделювання цей процес також може бути зведений до псевдопершого порядку:

$$k_{bio} = k_2 N,$$

де N – концентрація мікроорганізмів у воді, а k_2 – коефіцієнт, що узагальнює інтенсивність їх взаємодії з хлором.

Взаємодія хлору з розчиненим киснем зазвичай має менший внесок у загальний баланс, однак за достатньо високих концентрацій кисню може впливати на

швидкість зменшення концентрації активного хлору. Вклад цього процесу враховано співвідношенням:

$$k_{O_2} = k_3 C_{O_2},$$

де C_{O_2} – концентрація розчиненого кисню.

З урахуванням наведених чинників для заданих гідрохімічних та біологічних умов ефективний коефіцієнт деструкції було прийнято рівним

$$k = 0,03 \text{ хв}^{-1} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}.$$

Для миттєвого точкового джерела аналітичний розв'язок рівняння конвекції–дифузії має вигляд:

$$C(x,t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(x-x_0-ut)^2}{4Dt} - kt\right).$$

Даний вираз дозволяє визначити просторово-часовий розподіл концентрації хлору вздовж русла річки.

Спочатку проведемо часовий аналіз розподілу концентрації хлору. Максимальна концентрація у фіксованій точці спостерігається в момент проходження фронту забруднення, час якого визначається як:

$$t_{\max} = \frac{x-x_0}{u}.$$

Для контрольної точки, розташованої на відстані 6 км від початку ділянки моделювання (тобто на 3 км нижче місця скиду), отримуємо $t_{\max} = 42$ хв.

Підставлення цього значення у розв'язок дає максимальну концентрацію $C_{\max} = 0,0065$ мг/л.

З рисунку 1 видно, що залежність концентрації хлору від часу розповсюдження має вигляд нормального розподілу. Отримані результати свідчать про імпульсний характер забруднення. Зі зміною фіксованої відстані від місця початку

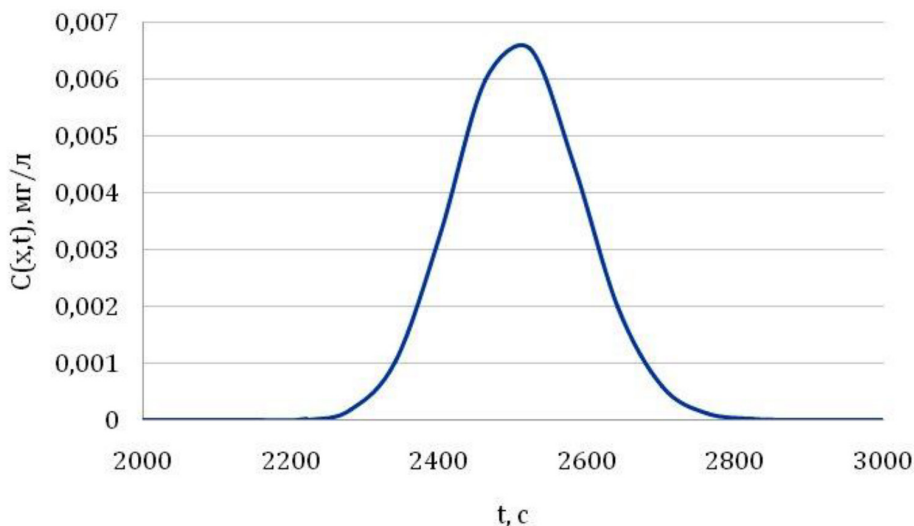


Рис. 1. Залежність концентрації хлору від часу розповсюдження для $x = 6000$ м

моделювання характер залежності не змінюється. У перші 1–2 години після аварії формується зона підвищених концентрацій, яка швидко зміщується вниз за течією. Подальше зниження концентрації відбувається внаслідок турбулентного розсіювання та хімічної деструкції хлору.

Для отримання просторово-часових розподілів концентрації хлору рівняння конвекції–дифузії з урахуванням хімічної деструкції розв'язувалося чисельно методом кінцевих різниць. Такий підхід дозволяє врахувати задані гідрологічні параметри, часову дискретизацію моделювання та особливості аварійного скиду.

Досліджувана ділянка річки довжиною L була розбита на рівномірну просторову сітку з кроком Δx . Часовий інтервал моделювання становив 24 години з часовим кроком $\Delta t = 30$ хвилин, що відповідає вимогам оперативного прогнозування аварійних ситуацій.

Координати вузлів сітки та часові шари задаються як: $x_i = i\Delta x$, $i = 0, 1, \dots, N$, $t^n = n\Delta t$, $n = 0, 1, \dots, M$.

Концентрація хлору у вузлі сітки позначається як $C_i^n = C(x_i, t^n)$.

Для чисельного розв'язання використано явно-неявну схему, що поєднує стійкість і обчислювальну простоту. Конвективний член апроксимовано односторонньою різницею першого порядку, дифузійний – центральною різницею другого порядку, а реакційний член – неявно.

Різницева форма рівняння має вигляд:

$$\frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{\Delta t} + u \frac{C_i^n - C_{i-1}^n}{\Delta x} = D \frac{C_{i+1}^n - 2C_i^n + C_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} - kC_i^{n+1}.$$

Звідси явний вираз для обчислення концентрації на наступному часовому кроці:

$$C_i^{n+1} = \frac{C_i^n - \frac{u\Delta t}{\Delta x}(C_i^n - C_{i-1}^n) + \frac{D\Delta t}{(\Delta x)^2}(C_{i+1}^n - 2C_i^n + C_{i-1}^n)}{1 + k\Delta t}.$$

Такий запис дозволяє явно врахувати перенесення та розсіювання і водночас уникнути нестійкості, пов'язаної з жорсткістю реакційного члена.

Миттєвий точковий скид реалізується шляхом задавання початкової концентрації у вузлі, найближчому до координати аварійного скиду x_0 :

$$C_i^0 = \begin{cases} \frac{M}{A\Delta x}, x_i \approx x_0 \\ 0, \text{ в інших вузлах} \end{cases}.$$

На верхній границі ділянки моделювання задається умова відсутності забруднення: $C(0, t) = 0$, тоді як на нижній границі використовується умова вільного виносу (нульовий градієнт):

$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=L} = 0,$$

що в різницевій формі записується як:

$$C_N^n = C_{N-1}^n.$$

Для забезпечення стійкості та коректності чисельного розв'язку виконувались умови Куранта та дифузійної стійкості:

```

*1.py - C:/Users/user/AppData/Local/Programs/Python/Python313/1.py (3.13.0)*
File Edit Format Run Options Window Help
import matplotlib.pyplot as plt
import math
# 1. Геометрія та гідродинаміка
L = 10000.0      # довжина ділянки, м
b = 40.0        # ширина річки, м
h = 3.0         # глибина, м
A = b * h       # площа перерізу, м^2
u = 1.2         # швидкість течії, м/с
# Дисперсія та деструкція
D = 2.16        # коефіцієнт дисперсії, м^2/с
k = 5e-4        # коефіцієнт деструкції, 1/с
# Аварійний скид
V = 2.0         # об'єм скиду, м^3
C0 = 300000.0   # концентрація, мг/м^3 (300 мг/л)
M = V * C0      # маса хлору, мг
x0 = 3000.0     # координата скиду, м
# 2. Чисельна сітка
dx = 100.0      # просторовий крок, м
dt = 1800.0     # часовий крок, с (30 хв)
Nx = int(L / dx) + 1
Nt = int(24 * 3600 / dt)
x = [i * dx for i in range(Nx)]
Co = u * dt / dx
Fo = D * dt / dx**2
print("Courant number Co =", round(Co, 2))
print("Fourier number Fo =", round(Fo, 2))
# 3. Початкові умови
C = [0.0 for _ in range(Nx)]
# реалізація миттєвого точкового скиду
i0 = int(x0 / dx)
C[i0] = M / (A * dx)
C_history = []
C_history.append(C[:])
for n in range(Nt):
    C_new = C[:]
    for i in range(1, Nx - 1):
        adv = -u * (C[i] - C[i - 1]) / dx
        diff = D * (C[i + 1] - 2 * C[i] + C[i - 1]) / dx**2
        C_new[i] = (C[i] + dt * (adv + diff)) / (1 + k * dt)
        if C_new[i] < 0.0:
            C_new[i] = 0.0
    # граничні умови
    C_new[0] = 0.0      # вхідний створ
    C_new[-1] = C_new[-2] # вільний винос
    C = C_new
    C_history.append(C[:])
# 5. Побудова графіків
plt.figure(figsize=(9, 5))
hours = [0.5, 1, 2, 4, 8, 12, 24]
for hour in hours:
    n = int(hour * 3600 / dt)
    C_plot = [c / 1000.0 for c in C_history[n]] # мг/л
    plt.plot([xi / 1000.0 for xi in x], C_plot, label=f"{hour} год")
plt.xlabel("Відстань, км")
plt.ylabel("Концентрація, мг/л")
plt.title("Поширення хлору після аварійного скиду")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Рис. 2. Алгоритм розрахунку

$$C_0 = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \leq 1,$$

$$F_0 = \frac{D\Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2}.$$

Чисельний розрахунок методом кінцевих різниць являє собою достатньо складну задачу.

Для спрощення розрахунків нами була створена програма на Python.

Алгоритм розрахунку наведено на рисунку 2.

Чисельна схема дозволяє відтворити формування та еволюцію хвилі забруднення, її переміщення вниз за течією та поступове зменшення пікових концентрацій.

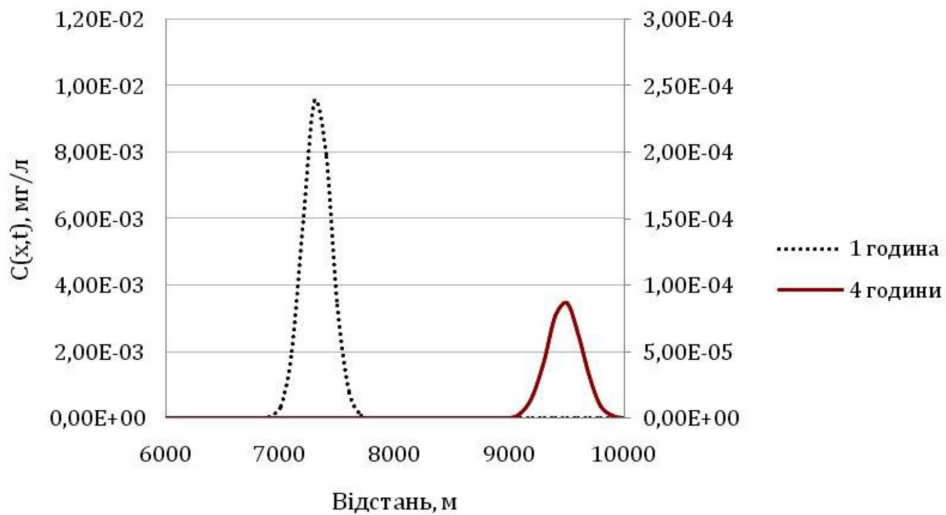


Рис. 3. Еволюція плями хлорного забруднення у часі

З рис. 3 видно просторову еволюцію плями хлорного забруднення у різні моменти часу після аварійного скиду. Через 1 годину після аварії формується компактна зона підвищених концентрацій із чітко вираженим максимумом, локалізованим поблизу положення, визначеного конвективним переносом зі швидкістю течії. Через 4 години максимум концентрації зміщується далі вниз за течією, при цьому його величина суттєво зменшується, а просторова ширина плями зростає. Це свідчить про домінування турбулентної дисперсії, яка призводить до розтягнення імпульсу забруднення вздовж русла. На момент 12 годин після аварії пікові концентрації зменшуються більш, ніж на декілька порядків, а просторова аномалія стає слабо вираженою. Така поведінка обумовлена сумарною дією дифузійного розсіювання та хімічної деструкції хлору, що підтверджує ефективність природних процесів самоочищення річкової системи за умов одноразового скиду.

Отримані результати узгоджуються з аналітичним розв'язком для миттєвого джерела і підтверджують коректність чисельної реалізації.

Наслідки такого аварійного скиду можуть полягати у:

- загибель фітопланктону та зоопланктону;
- порушення мікробіологічного балансу;

- пригнічення процесів самоочищення;
- токсичний вплив на рибу та безхребетних;
- утворення вторинних хлорорганічних сполук.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У результаті проведеного аналізу встановлено, що поширення хлору в річковому середовищі визначається гідродинамічними, фізико-хімічними та біологічними факторами. Хлор швидко розчиняється та переноситься течією, але інтенсивно реагує з органічними речовинами та мікроорганізмами.

Модель на основі рівняння конвекції-дифузії дозволяє спрогнозувати концентрацію речовини забруднення в різних точках річки та оцінити екологічні наслідки.

Розрахунки виконано на основі рівняння конвекції-дифузії з урахуванням хімічного розкладу хлору.

При чисельному моделюванні процесів переносу та трансформації хлору в річкової системі отримано просторово-часові розподіли концентрації забруднювача після аварійного скиду.

Аналіз просторових профілів концентрації показав, що в перші години після аварії формується чітко виражена зона підвищених концентрацій, максимум якої зміщується вниз за течією зі швидкістю потоку.

Це підтверджує домінуючу роль конвективного переносу у річках з помірною та високою швидкістю течії.

З часом спостерігається розширення плями забруднення внаслідок дифузії та турбулентного перемішування, а також зменшення пікових концентрацій через хімічну деструкцію хлору та його взаємодію з органічними речовинами.

Через 12 годин після аварійного скиду концентрації хлору значно зменшуються на всій досліджуваній ділянці, а через 24 години вони наближаються до фонових значень. Це свідчить про ефективну роль природних процесів самоочищення річкової системи за умови одноразового скиду та відсутності повторного надходження забруднювача.

Аналіз часової динаміки концентрації у фіксованій контрольній точці (6 км від початку ділянки) показав імпульсний характер забруднення.

Максимальна концентрація фіксується у момент проходження хвилі забруднення, після чого відбувається різке зниження її рівня.

Така поведінка є типовою для аварійних скидів миттєвого типу та свідчить про відносно короткочасний, але потенційно небезпечний вплив на гідробіонти.

Отримані результати підтверджують, що найбільшу екологічну загрозу хлорне забруднення становить у перші години після аварії, коли концентрації можуть перевищувати гранично допустимі значення.

У подальшому ризику зменшуються, однак можливе утворення вторинних хлорорганічних сполук може зумовлювати довготривалий негативний вплив на водну екосистему.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Samim Obaid et al. Modelling free residual chlorine decay in water distribution and aquatic systems using smart monitoring data. *Journal of Water Process Engineering*. 2022. Vol. 48. 102831. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06378-5>
2. Kachiashvili K. J. et al. Modeling and Simulation of Pollutants Transport in Rivers. *Applied Mathematical Modelling*. 31(7). P. 1371–1396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.02.015>

3. Zhang L. et al. Modelling chlorine residuals in drinking water: a review. *International journal of Environmental Science and Technology*. 2022. 19(4). P. 11613–11630. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-022-03924-3>
4. Li X., Dong Z. Turbulent dispersion and mixing. *Environmental Hydraulics of Open Channel Flows*. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-075066165-2.50039-4>
5. Kondratiev S. et al. Quantitative design of emergency monitoring network for river chemical spills based on discrete entropy theory. *Water Research*. 2018. Vol. 134. P. 140–152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.057>
6. N. S. Loboda, Y. V. Bozhok Water resources of Ukraine in the XXI century under climate change scenarios (RCP4.5 AND RCP8.5). *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. № 17. С. 114–122. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.13>
7. Т. Trysnyuk. Mobile environmental monitoring system of the dniester: modeling of technical system of hydro resources and extreme floods. *Екологічна безпека та природокористування*, № 2 (38), 2021. С. 121–128. DOI:10.32347/2411-4049.2021.2.121–128.
8. H. D. Lim et al. Application of turbulent diffusivity models to point-source dispersion in outdoor and indoor flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2025. Vol. 115. 109833. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2025.109833>

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026