

ТИМЧИШИН ВАСИЛЬ

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-8574-2561>e-mail: v.tymchyshyn@wunu.edu.ua

ОТОО ФРАНК

Західноукраїнський національний університет

e-mail: f.otoo@wunu.edu.ua

АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ВНАСЛІДОК ДИФУЗІЇ ДІОКСИДУ АЗОТУ В ҐРУНТАХ ТА ҐРУНТОВИХ ВОДАХ

У роботі запропоновано архітектуру програмного забезпечення, яке дозволить моделювати процеси забруднення ґрунтів внаслідок дифузії діоксиду азоту в ґрунтах і ґрунтових водах. Для досягнення цієї мети використані математичні моделі для прогнозування динаміки концентрацій шкідливих викидів, а також модель дифузії діоксиду азоту у ґрунті і водоймі. Застосування математичних моделей дозволить прогнозувати зміни концентрацій діоксиду азоту в певній точці забруднення. Крім того, модель дифузії діоксиду азоту у ґрунті і водоймі допоможе визначити шляхи поширення забруднення та його вплив на навколишнє середовище. Такі моделі базуються на різницевих рівняннях або диференціальних рівняннях в частинних похідних, які дозволяють описати залежність між різними факторами. Архітектура програмного забезпечення включає необхідні модулі для введення початкових умов, виконання обчислень, візуалізації результатів та можливості внесення коректив в моделі при необхідності. Наведено ряд діаграм, які ілюструють особливості взаємодії модулів системи на рівні класів та компонентів.

Ключові слова: екологічний моніторинг, дифузія діоксиду азоту математичне моделювання, архітектура програмного забезпечення.

TYMCHYSHYN VASYL, OTOO FRANK

West Ukrainian National University

ARCHITECTURE OF A SOFTWARE SYSTEM FOR SOIL POLLUTION PROCESSES MODELING AS A RESULT OF DIFFUSION OF NITROGEN DIOXIDE IN SOILS AND GROUNDWATER

The work proposes a software architecture that will allow simulating the processes of soil pollution due to the diffusion of nitrogen dioxide in soils and groundwater. To achieve this goal, mathematical models were used to predict the dynamics of concentrations of harmful emissions, as well as a model of diffusion of nitrogen dioxide in the soil and reservoir. The use of mathematical models will allow predicting changes in concentrations of nitrogen dioxide at a certain point of pollution. In addition, the model of diffusion of nitrogen dioxide in the soil and reservoir will help to determine the ways of the spread of pollution and its impact on the environment. Such models are based on difference equations or differential equations in partial derivatives, which allow to describe the dependence between various factors. The software architecture includes the necessary modules for entering initial conditions, performing calculations, visualizing results, and making adjustments to the model if necessary. A number of diagrams are presented that illustrate the features of interaction of system modules at the level of classes and components.

Keywords: environmental monitoring, diffusion of nitrogen dioxide, mathematical modeling, software architecture.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Забруднення довкілля внаслідок антропогенної діяльності людини є важливою проблемою людства, яка суттєво впливає на якість життя людей, та й усієї флори і фауни, спричиняючи різноманітні захворювання та патології. Особливої уваги потребує дослідження стану та ідентифікації особливо небезпечних джерел забруднення ґрунтів та ґрунтових вод. Як відомо [1] основними джерелами хімічного забруднення ґрунтів є хімічні речовини, використовувані в сільському господарстві (мінеральні добрива, пестициди, ядохімікати і т.д.); атмосферні опади в радіусі дії промислових підприємств (особливо хімічний і металургійних); видобуток корисних копалин; теплові й атомні електростанції, а також автотранспорт.

Значна частина джерел забруднення призводить до локальних забруднень, але деякі з них діють у регіональному і навіть у глобальному масштабі, особливо у випадку забруднення через атмосферні опади або унаслідок використання добрив на значних площах.

Хімічне забруднення ґрунтів переважно має дві першопричини [2]:

1. поглинанням верхнім шаром ґрунту викидів шкідливих речовин в атмосферу;
2. безпосереднім внесенням хімічних речовин у виді добрив, пестицидів, гербіцидів.

Перший спосіб забруднення особливо є актуальним для великих міст та ґрунтів, які знаходяться у безпосередній близькості до міст. Саме на цьому виді забруднень сконцентрована увага наведених у статті досліджень. Варто зазначити, що через випадання опадів, або через безпосередню близькість джерела викидів до ґрунту, відбувається забруднення ґрунтових вод і прилеглих водойм. Оскільки мова йде про дифузійні процеси в ґрунтах, на територіях прилеглих до великих міст, то найбільшим забрудником хімічними речовинами для великих міст є автотранспорт [3]. Тим більше, що сучасні тенденції планування та розбудови міст полягають у розміщенні шкідливих виробництв далеко за межами міста.

У вихлопних газах автотранспорту є цілий спектр шкідливих речовин, найбільш небезпечним серед яких у великих концентраціях є діоксид азоту. Хімічне забруднення ґрунтів через поглинання верхнім шаром ґрунту викидів шкідливих речовин в атмосферу автотранспорту є актуальним для великих міст, а також для прилеглих до них ґрунтів та водойм. Варто зазначити, що дослідження забруднення ґрунтів через атмосферне повітря розглянуто у працях [4,5]. Разом з тим, моніторингу даного виду забруднень ґрунтів і водойм приділено недостатньої уваги. Переважно розглядають опосередковане забруднення ґрунтів через випадання опадів [5]. Разом з тим, не беруть до уваги, наприклад забруднення ґрунтів та водойм шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту. У таких випадках, через високу вологість повітря цей вид забруднень через безпосередню близькість джерела викидів до ґрунту та водойм внаслідок дифузійних процесів спричинює забруднення ґрунтів, ґрунтових вод і прилеглих водойм [6]. На перший погляд такі забруднення не є критичними у порівнянні із іншими видами, наприклад забруднення діоксидом азоту чи іншими шкідливими речовинами теплоелектростанціями чи іншими хімічними виробництвами. Разом з тим, переважно такі об'єкти викидають забруднюючі речовини в атмосферу на великі відстані від приземистого шару і це сприяє частковому розсіюванню та перенесенню цих забруднюючих речовин в інші місця на великі відстані, за межі прилеглих територій, де вони осідають на ґрунт у меншій концентрації. Тому увага була сконцентрована саме на дифузійних процесах у верхніх шарах ґрунту діоксиду азоту, походження якого – вихлопні гази автотранспорту[7].

Іншою проблемою яка стосується забруднення питань забруднення ґрунтів сполуками азоту є наявність відповідних засобів для моніторингу цього процесу і для моделювання наслідків. Переважно на сьогоднішній день використовують Гауссівські моделі розсіювання та перенесення забруднень від шкідливих викидів[8-10] Також для моніторингу прогнозування на основі зазначених моделей розроблено ряд програмних середовищ[11]. Разом з тим універсальність цих середовищ надає можливість реалізувати інші не Гауссівські математичні моделі перенесення шкідливих викидів. Особливо це стосується процесів динаміки зміни концентрації діоксиду азоту на поверхні приземистого шару атмосфери і його переходу для соплук азотної кислоти. Така математична модель в достатній мірі описана в працях[3,7] проте авторами цих праць не надано можливість створення і застосування інструментальних засобів для оперування такого класу моделями тому метою даної праці є представлення програмного середовища для моделювання процесів забруднення ґрунтів внаслідок дифузії діоксиду азоту в ґрунти та ґрунтові води.

Постановка проблеми

Проблематика даної праці пов'язана зі шкідливими викидами діоксиду азоту внаслідок інтенсивного руху автотранспортних засобів та його дифузії у поверхневих шарах ґрунту і утворення солей азотної кислоти. Математичні моделі цих процесів в достатній мірі описані в працях[12, 13].

Метою праці є розробка та представлення інструментальних програмних засобів для моделювання та прогнозування зазначених процесів.

Математичне забезпечення

Математичні моделі прогнозування динаміки концентрації діоксиду азоту в точці

Для кращого розуміння негативних наслідків забруднення повітря на здоров'я людини важливо провести точну оцінку його впливу. Епідеміологічні дослідження надали велику кількість доказів, що підтверджують негативний вплив добової концентрації забруднювачів зовнішнього повітря на здоров'я людини. У таких дослідженнях зазвичай зосереджуються на масових концентраціях шкідливих часток та обраних газоподібних забруднювачів. Математичні моделі, які описують динаміку розповсюдження концентрації забруднень через шкідливі викиди у вихлопних газах автотранспорту[14], виражені у вигляді різницевого рівнянь, які є аналогами диференціальних рівнянь в частинних похідних, таких як моделі турбулентної дифузії. Однією з особливостей цих моделей є можливість врахування інтенсивності джерел концентрацій для розподіленого об'єкта, такого як автотранспорт

У цих моделях використовуються різницеві рівняння, які є дискретними аналогами диференціальних рівнянь. Вони розглядають розподіл концентрацій забруднень на певній просторовій сітці та визначають його зміну в часі. Для автотранспорту ці моделі дозволяють враховувати інтенсивність викидів з рухомих джерел та їх вплив на оточуюче середовище.

Математичні моделі розповсюдження концентрацій забруднень у вихлопних газах автотранспорту постійно вдосконалюються та адаптуються на основі нових наукових досліджень та експериментальних даних. Вони включають у себе різні фізичні та хімічні процеси, які відбуваються під час розповсюдження забруднень, такі як дифузія, конвекція, хімічні реакції та взаємодія з атмосферними компонентами.

Математичні моделі динаміки поширення концентрацій забруднень на основі різницевого рівнянь мають такий вигляд:

$$[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_{d-1}, \vec{u}_k) \cdot \vec{\varphi}(\vec{g}), k = d, \dots, K, \quad (1)$$

де $[\hat{v}_k]$, $[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+]$ – інтервальний вигляд модельованої концентрації шкідливих викидів на часовій дискреті k ,

$[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+]$ – відповідно, нижня та верхня межі інтервалу можливих значень концентрації шкідливих викидів,

$\vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k$ – вектори вхідних змінних (управлінь),

d – порядок дискретної динамічної моделі (ДДМ),

\vec{g} – вектор параметрів моделі,

$\vec{f}^T(\bullet)$ – вектор базисних функцій,

$\vec{\varphi}(\bullet)$ – вектор базисних функцій для параметрів.

Оскільки вимірювання можуть містити похибки, а межові значення відомі, результати спостережень в k -й момент часу можна представити у вигляді інтервалу.

$$[z_k] = [z_k^-; z_k^+] = [z_k - z_k \cdot \varepsilon; z_k + z_k \cdot \varepsilon], k = 0, \dots, N \quad (2)$$

де z_k – виміряне значення концентрації,

$z_k^-; z_k^+$ – гарантований інтервал іміряної концентрації,

ε – відносна похибка вимірювань.

За умови, що прогнозовані значення належать відповідному інтервалу виміряних значень, вектор параметрів \vec{g} різницевого оператора можна оцінити, незалежно від того, що сам вектор параметрів є невідомим [15]. Умови такої оцінки представлені наступним чином:

$$[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] \subseteq [z_k^-; z_k^+], k = 0, \dots, N \quad (3)$$

де $[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+]$ – прогнозований інтервал в загальному випадку обчислюється за формулою:

$$[\hat{v}_k] = \vec{g}^T \cdot \vec{f}([\hat{v}_0], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k), k = 0, \dots, N \quad (4)$$

де \vec{g} – вектор оцінок параметрів різницевого оператора, який отримуємо із умов належності (3).

Оператор, який використовує інтервальну арифметику для обчислення інтервалу прогнозованої концентрації \hat{v}_k за формулою (4), називається інтервальним різницеvim оператором (ІРО).

Якщо підставити інтервальні оцінки $[\hat{v}_k]$, які були обчислені за формулою (4), з початковими наближеннями $([\hat{v}_0], \dots, [\hat{v}_{k-1}])$ у вираз (3), то отримаємо інтервальну систему нелінійних алгебраїчних рівнянь (ІСНАР), яка буде мати наступний вигляд:

$$\hat{v}_k^- \leq \vec{g}^T \cdot \vec{f}([\hat{v}_0], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \leq \hat{v}_k^+, k = d, \dots, N \quad (5)$$

Для знаходження хоча б одного розв'язку ІСНАР, використовуються методи параметричної ідентифікації [16], які, в свою чергу, базуються на методах випадкового пошуку. Для визначення структури моделі було використано метод структурної ідентифікації, побудований на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії. За допомогою інтервальних даних, які наведені у праці [3] отримано таку структуру ІРО:

$$[\hat{v}_k] = g_0 + g_1 \cdot \hat{v}_{k-1} + g_2 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot \hat{v}_{k-3} + g_3 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot u_{1,k}/u_{1,k-1} - g_4 \cdot \hat{v}_{k-2} \cdot u_{1,k-1}/u_{1,k+1} \quad (6)$$

В результаті проведення параметричної ідентифікації моделі із застосуванням вищезгаданих процедур випадкового пошуку, отримано такі оцінки параметрів:

$$[\hat{v}_k] = 0,0365 + 0,3542 \cdot \hat{v}_{k-1} + 0,118 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot \hat{v}_{k-3} + 0,5059 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot u_{1,k}/u_{1,k-1} - 0,0154 \cdot \hat{v}_{k-2} \cdot u_{1,k-1}/u_{1,k+1} \quad (7)$$

Математична модель дифузії діоксиду азоту у ґрунті та водоймі

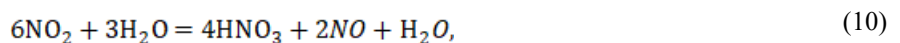
У вологому середовищі двоокис азоту взаємодіє із водою згідно із реакцією [17]:



Свою чергою азотиста кислота, яка утворюється при поглинанні окислу азоту, як малостійка сполука розпадається на окис азоту та азотну кислоту [17]:



В підсумку ми можемо розглядати реакцію



Скорочуючи обидві частини рівняння на молекулу води отримуємо основне рівняння формування азотної кислоти



У водних розчинах азотна кислота розщеплюється на йони, що свідчить про її високу кислотність. Ця кислота взаємодіє з основними та амфотерними оксидами, такими як мідь та цинк, з основами, і витісняє слабкі кислоти з їх солей, наприклад, карбонат кальцію, який міститься у вапняках та крейді. Двоокис азоту та азотна кислота є отруйними речовинами, і національні стандарти обмежують їх допустиму концентрацію. Якщо граничні допустимі дози перевищені, то необхідно здійснювати хімічну меліорацію ґрунтів за допомогою вапнякових добрив або будувати очисні споруди для водойм.

Основним механізмом масопереносу газів у ґрунті а також газообміну між ґрунтом та атмосферою є дифузія – переміщення газів під дією градієнта концентрацій. Конвективний (під дією температурних градієнтів), гравітаційний (під дією сили тяжіння) а також під дією перепадів атмосферного тиску механізми мають допоміжне значення [18].

Проаналізуємо підходи до моделювання концентрації двоокису азоту у ґрунті. Аналізовані ділянки забруднень характеризуються доволі значними розмірами у порівнянні із глибиною проникнення забруднень а концентрації забруднень на поверхні ґрунту не характеризуються значними градієнтами. Це дозволяє розглядати аналіз поля концентрацій забруднень в ґрунті як локальну задачу у кожній точці спостереження на поверхні із єдиним аргументом – віддаллю точки спостереження від поверхні ґрунту. В цьому випадку отримуємо одновимірне рівняння дифузії:

$$\frac{d}{dh} \left[D_S(h) \frac{dC_i^S(h)}{dh} \right] = 0, \quad (12)$$

де i – номер точки спостереження,

$D_S(h)$ – коефіцієнт дифузії двоокису азоту у ґрунті,

$C_i^S(h)$ – концентрація забруднень ґрунту в околі i – ої точки спостереження.

Нелінійне диференціальне рівняння дифузії (12) зведемо до вигляду зручного для застосування чисельних методів:

$$\frac{d^2 C_i^S(h)}{dh^2} + \frac{D_S'(h)}{D_S(h)} \frac{dC_i^S(h)}{dh} = 0 \quad (13)$$

Доповнимо його граничними умовами Діріхле на поверхні ґрунту ($h=0$), де використаємо результати спостережень P_i за забрудненнями поверхні в i -й точці спостережень, скоригованими на перепад значень коефіцієнтів дифузії у повітрі D_A та на поверхні ґрунту $D_S(0)$:

$$C_i^S(0) = P_i \frac{D_S(0)}{D_A} \quad (14)$$

На нижній межі найродючішого шару ґрунту H_y в першому наближенні застосуємо умову непроникнення типу Неймана

$$\left. \frac{dC_i^S(h)}{dh} \right|_{h=H_y} = 0 \quad (15)$$

Аналогічну задачу можна поставити і для водойми. Вважаючи коефіцієнт дифузії у воді постійним, можемо отримати аналітичне подання її розв'язку, однак саме допущення про постійність коефіцієнта дифузії азотної кислоти у воді є надмірним спрощенням. Зокрема за даними ресурсу [19] такий коефіцієнт дифузії залежить від концентрації самої кислоти. Враховуючи це, одновимірне рівняння дифузії азотної кислоти у воді

$$\frac{d}{dh} \left[D_W(C_i^W(h)) \frac{dC_i^W(h)}{dh} \right] = 0 \quad (16)$$

подамо наступним чином

$$D_W(C_i^W(h))'_{C_i^W} \left[\frac{dC_i^W(h)}{dh} \right]^2 + D_W(C_i^W(h)) \frac{d^2 C_i^W(h)}{dh^2} = 0 \quad (17)$$

За аналогією із задачею (13)-(15) отримуємо задачу (18)-(20) для побудови розподілу концентрації азотної кислоти у воді

$$\frac{d^2 C_i^W(h)}{dh^2} + \frac{D_W(C_i^W(h))' C_i^W}{D_W(C_i^W(h))} \left[\frac{dC_i^W(h)}{dh} \right]^2 = 0 \quad (18)$$

$$C_i^W(0) = P_i^W \quad (19)$$

$$\left. \frac{dC_i^W(h)}{dh} \right|_{h=H_b} = 0 \quad (20)$$

де i – номер точки спостереження,

$D_W(C)$ – функція дифузії азотної кислоти у воді в залежності від концентрації,

$C_i^W(h)$ - концентрація забруднень води в околі i – ої точки спостереження,

H_b - усереднена глибина водойми, над якою ведуться спостереження.

Архітектура програмної системи

Система моніторингу забруднення шкідливими речовинами, ґрунтується на апаратно-програмному забезпеченні. Це дозволяє проводити вимірювання концентрації шкідливих викидів на певній території в автономному режимі та зберігати та обробляти дані. Головною метою цього є ідентифікація та навчання математичних інтервальних моделей поширення концентрацій шкідливих викидів.

На рисунку 1 представлено загальний вигляд архітектури системи. Дана система складається з чотирьох незалежних модулів які взаємодіють між собою використовуючи різні технології. Базовим елементом для моніторингу концентрацій діоксиду азоту було обрано блок Sniffer4D Hyper-local Air Quality Analyzer, в середину якого інстальовано сенсор для вимірювання діоксиду азоту та підключено модуль телеметрії. Для обміну даними між сенсором та сервісом управління даними, на комп'ютері інстальовано програмне забезпечення Sniffer4D Mapper, яке дає можливість не тільки здійснювати попередню обробку телеметричних даних та запис їх в базу даних, але і візуалізувати результати вимірювань в реальному часі. Дані між модулями передаються по протоколу TCP/IP, який забезпечує достатню швидкість обміну великих об'ємів інформації.

Згідно наведеної архітектури, результати вимірювань в режимі реального часу передаються в підсистему для моделювання, де приводяться до інтервального вигляду та зберігаються в БД. Дані вимірювань концентрації забруднення повітря представлені у вигляді наборів, отриманих у інтервальному вигляді, за рахунок наявності похибок вимірювань.

Звдяки використанню CRUD операції сервіс управління даними взаємодіє з модулем зберігання даних, який знаходиться на рівні даних, тим самим забезпечуючи швидкий обмін інформацією між рівнем бізнес-логіки та базою даних. В якості системи управління базою даних було обрано MS SQL Server який підтримує реляційну модель даних, що в свою чергу полегшує роботу з організацією вимірюваних даних.

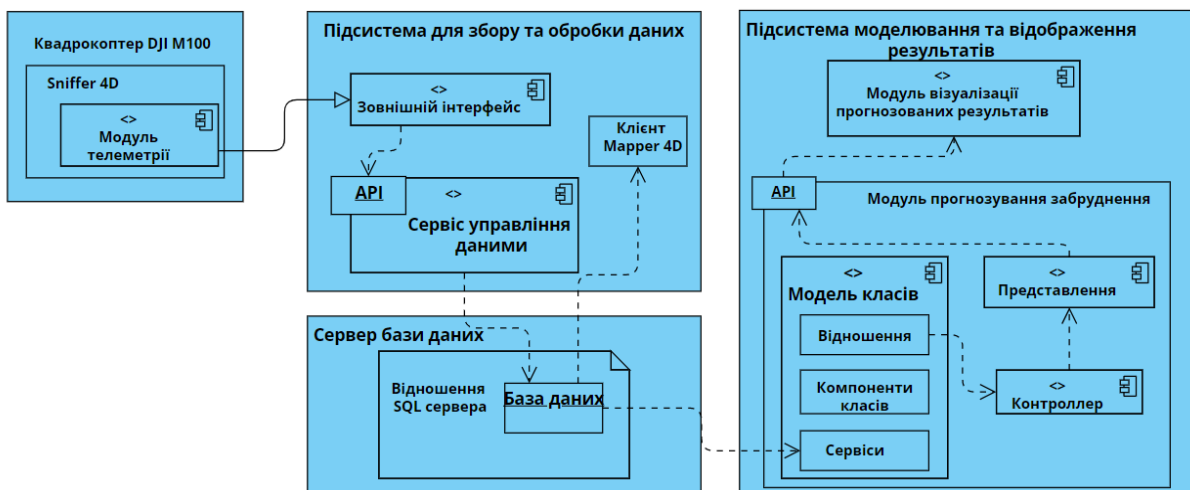


Рис 1. Загальна архітектура системи

Ядром системи моніторингу є підсистема моделювання та відображення результатів. Даний модуль побудований на основі патерну MVC, який дозволяє створювати кілька представлень для моделі класів системи. Крім того, у цьому підході дублювання коду дуже обмежене, оскільки воно відокремлює дані та бізнес-логіку від відображення що є хорошою перевагою при проектуванні та розбіці прикладного програмного забезпечення.

Рівень моделі класів в модулі прогнозування забруднення представлено сервісом дизайну математичної моделі прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту в точці(рисунку 2) та компонентою розрахунку дифузії діоксиду азоту в навколишньому середовищі(рисунку 3).

Як видно з рисунку 2 дизайн моделі починається з побудови інтервального різницевого оператора який в свою чергу взаємодіє з інтелектувальним модулем для формування структури моделі та сховищем формул і умов початкових моделювання. Після того як отриманно ІРО дані переходять до набору модулів які відповідають за побудову структури інтервального різницевого оператора. В основу взаємодії модулів на цьому етапі закладено поведінкову модель бджолиної колонії. Цей метод дозволяє знизити складність обчислень при виконанні структурної ідентифікації складних об'єктів, які представлені у вигляді інтервальних дискретних моделей. Для початку потрібно сформувати початкову кількість множин структурних елементів після чого визначаємо їхню якість. Далі формуються схожі структури та проводиться попарна селекція на основі якості початкової множини структур. Для проведення групової селекції селекції потрібно згенерувати новий набір множин після чого перевіряється лічильник вичерпності структур. Якщо ж для поточних структур знайдеться хоча б одна, для якої, немає заміни то звершується процедура структурної ідентифікації інтервальної моделі та проводиться параметрична ідентифікація, яка є останнім етапом дизайну математичної моделі.

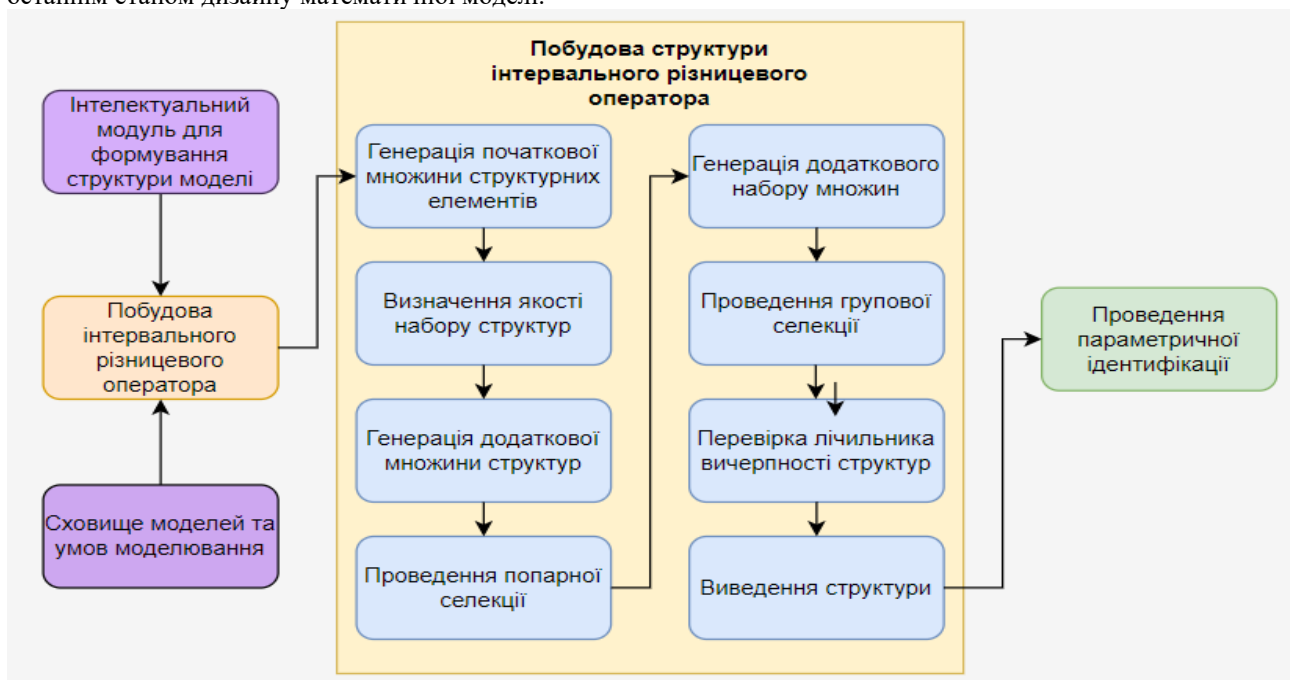


Рис. 2. Сервіс дизайну моделі прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту в точці

Щодо компоненти яка розраховує дифузії діоксиду азоту в навколишньому середовищі то робота починається на етапі обчислення різницевих апроксимацій на основі яких працюють модулі обчислення дифузії у воді і повітрі. Результати роботи цих модулів є базою для побудови концентрації азотної кислоти в ґрунті та ґрунтових водах.

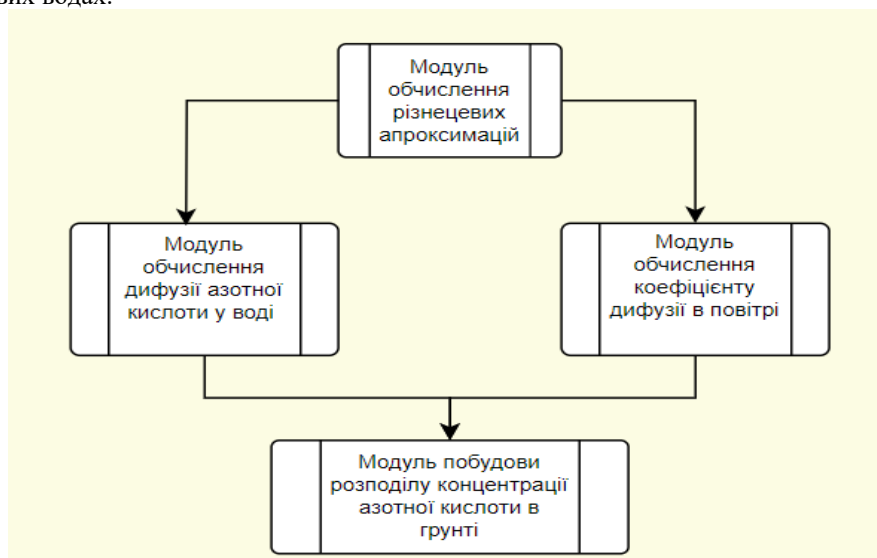


Рис. 3. Компонента розрахунку дифузії діоксиду азоту в навколишньому середовищі

На рисунку 4 зображено діаграму класів системи моделювання забруднення діоксидом азоту навколишнього середовища.

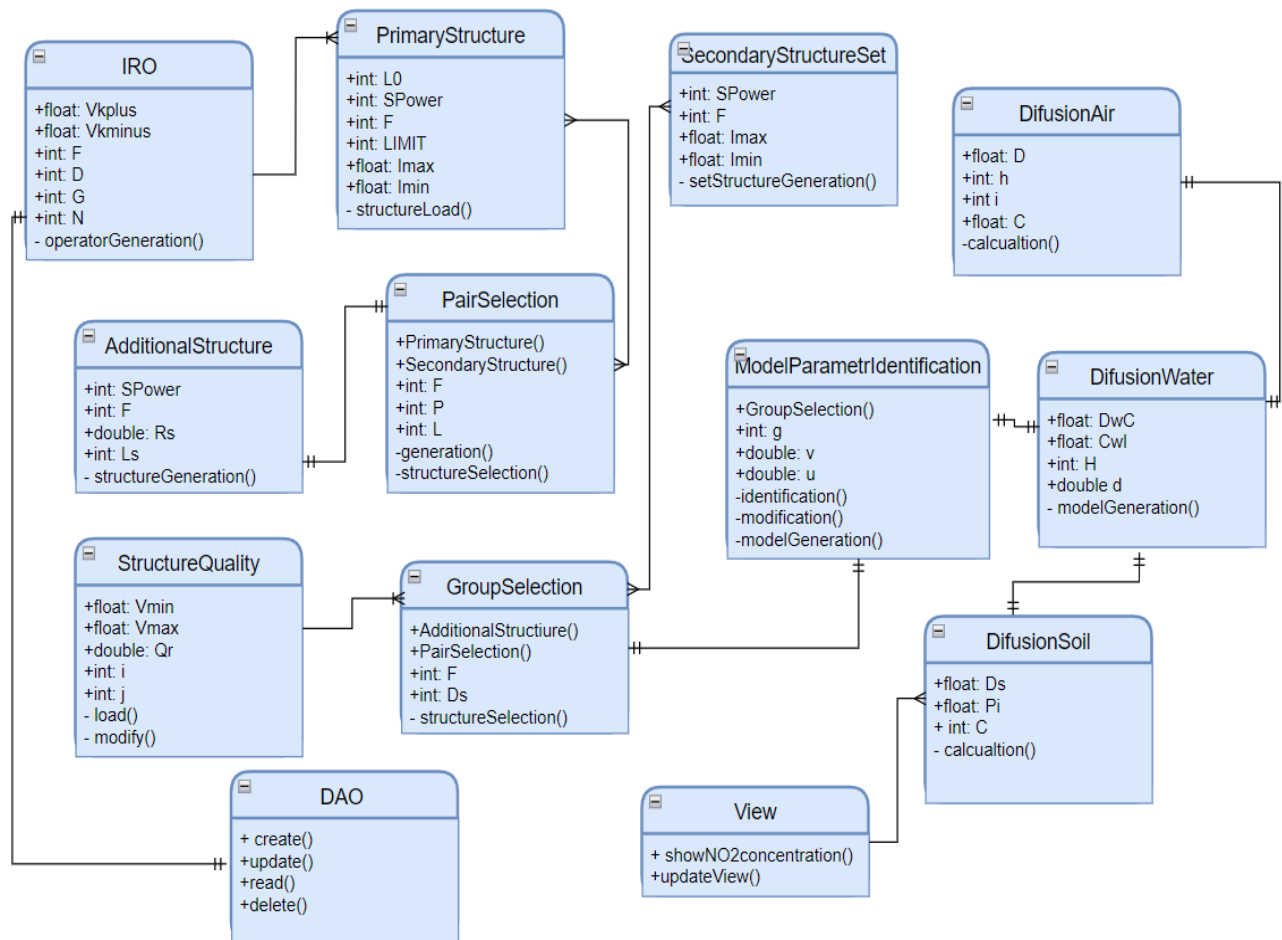


Рис. 4. Діаграма класів системи

Рівень об'єктно-орієнтованої моделі представлений набором класів, які забезпечують виконання основної бізнес логіки системи та включає в себе опис внутрішньої структури та типи взаємозв'язків між окремими об'єктами та підсистемами, що сприяє розвитку концептуальної моделі системи. Клас DAO (Data Access Object) відповідає за доступ до даних та сховищ моделей. Реалізовані методи в цьому класі описують CRUD операції, що забезпечує відокремлення доступу до даних від, що дозволяє забезпечити чистоту архітектури та підтримувати принципи модульності і повторного використання коду. Методи класів IRO, PairSelection, GroupSelection, ModelParametrIdentification базуються на математичному забезпеченні як описано вище. Слід зазначити що всі атрибути класів є `public` оскільки використовуються в методах інших класів. Більшість методів навпаки є `privat`, що забороняє їх виклик та використання в межах іншого класу. Класи в яких генеруються структури, множини структур та визначається їх якість є допоміжними та дозволяють виокремити загальні операції і функціональність, які використовуватися в інших місцях програми. Це дозволяє уникнути повторюваності коду і забезпечити більш підтримуваний код у випадку зміни математичних формул чи інтеграції зовнішніх сервісів.

З урахуванням побудованої моделі прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту в точці класи, в яких реалізовано процедуру обчислення дифузії цієї шкідливої речовини в ґрунті, водіймі та повітрі спираються на відповідні математичні моделі які описують цей процес. Після чого результати обчислень використовуються методами класу View, який забезпечує візуальне відображення концентрацій діоксиду азоту в ґрунтах та ґрунтових водах.

На рисунку 5 проілюстровано вигляд програмного інтерфейсу для візуалізації даних. Прогнозовані результати, отримані за допомогою моделей, відображаються на карті місцевості, яка використовується для моніторингу.



Рис. 5. Зовнішній вигляд системи

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В рамках цієї роботи запропоновано архітектуру програмного забезпечення для моделювання процесів забруднення ґрунтів внаслідок дифузії діоксиду азоту в ґрунтах та ґрунтових водах. Система включає необхідні модулі для введення початкових умов, виконання обчислень, візуалізації результатів та можливості внесення коректив в моделі при необхідності.

Для моделювання та прогнозування поширення концентрацій шкідливих викидів застосовано математичні моделі прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту в точці та математичну модель дифузії діоксиду азоту у ґрунті та водоймі. Розробка має потенціал у сфері оцінки та контролю забруднення ґрунтів і водойм діоксидом азоту, що дозволить приймати ефективні рішення з питань охорони навколишнього середовища та здоров'я населення.

Література

1. S. Baliuk, V. Medvedev, M. Miroshnichenko, Ye. Skrylnik, D. Timchenko, A. Fatieev, A. Khristenko, Yu. Tsapko. Environmental state of soils in Ukraine. National Scientific Center «Institute for Soil Science and Agrochemistry Research», 2015, Kharkiv, pp.38-42.
2. V.K. Matviychuk, I.O. Khar. Monograph. Atmospheric air pollution. National Academy of Management, Kyiv, 2013. - 272 p.
3. Дивак М.П., Масляк Ю.Б., Пукас А.В., Порплиця Н.П., Войтюк І.Ф., Тимчишин В.С. Архітектура системи екологічного моніторингу та приклад її застосування для моделювання концентрацій шкідливих викидів автотранс порту // Індуктивне моделювання складних систем: зб. наук. пр. Київ, 2017. Вип. 9. С. 69-84
4. V.A. Yurchenko, L.S. Mikhailova, M.V. Bepalova. Investigation of the influence of the road on the ecosystems of the roadside space. Bulletin of the Kharkiv National Automobile University: a collection of scientific papers. Kharkiv, 2018. - Issue 43. - pp. 29-32.
5. O.G. Melnikova, V.A. Yurchenko. Ecological consequences of technogenic load created by road-infrastructure complexes on soil ecosystems. IX International Scientific and Practical Conference. Ecological, legal and economic aspects of ecological security of the regions October 29-31, 2014 Kharkiv – 2014. pp. 232-236.
6. Dzhigirey V.S. Ecology and protection of the natural environment. - 3 edition. "Znannya", KO - 2014. - 309 p.
7. Dyvak, M.; Rot, A.; Pasichnyk, R.; Tymchyshyn, V.; Huliiev, N.; Maslyiak, Y. Monitoring and Mathematical Modeling of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions of Nitrogen Dioxide from Motor Vehicles. Sustainability 2021, 13, 2768.

8. Porplytsya, N.; Dyvak, M. Interval difference operator for the task of identification recurrent laryngeal nerve. In Proceedings of the 2015 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv, Ukraine, 2–5 September 2015; pp. 156–158.
9. Amin Al Manmi, D.A.M.; Abdullah, T.O.; Al-Jaf, P.M.; Al-Ansari, N. Soil and Groundwater Pollution Assessment and Delineation of Intensity Risk Map in Sulaymaniyah City, NE of Iraq. *Water* 2019, 11, 2158
10. La Cecilia, D.; Porta, G.M.; Tang, F.H.; Riva, M.; Maggi, F. Probabilistic indicators for soil and groundwater contamination risk assessment. *Ecol. Indic.* 2020, 115, 106424
11. Moranda, A.; Cianci, R.; Paladino, O. Analytical Solutions of One-Dimensional Contaminant Transport in Soils with Source Production-Decay. *Soil Syst.* 2018, 2, 40
12. Rausch, A. CMS Guide on Soil and Groundwater Contamination; CMS.Low.Tax.: Kyiv, Ukraine, 2019; p. 54.
13. M.R. Heal, J.N. Cape, A numerical evaluation of chemical interferences in the measurement of ambient nitrogen dioxide by passive diffusion samplers, *Atmospheric Environment*, Volume 31, Issue 13, 2017.
14. Дивак, М. П. Ідентифікація дискретних моделей систем з розподіленими параметрами на основі аналізу інтервальних даних [Текст] : монографія / М. П. Дивак, Н. П. Порплиця, Т. М. Дивак. – Тернопіль: Економічна думка ТНЕУ, 2018. – 220 с.
15. Дивак М. П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними: монографія / М. П. Дивак. - Т. : Економ. думка ТНЕУ, 2011. - 215 с.
16. Дивак М. П. Прикладні задачі структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів [Електронний ресурс] : монографія / М. П. Дивак, А. В. Пукас, Н. П. Порплиця, А. М. Мельник. - Тернопіль : Університетська думка, 2021. - 212 с.
17. Захаров І. І., Ліщишина Т. П., Захарова О. І. Екологічно чиста технологія відтворення азотної кислоти. *Вісник СХНУ імені Володимира Даля № 9 (216) 2014 р.*
18. Позняк С. П. Ґрунтознавство та географія ґрунтів. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2010. – Ч. 1. – 270 с.; Частина 2. – 285 с.
19. Hsi-Sheng, Wills G.B. Diffusion coefficient of aqueous Nitric Acid at 25oC as function of concentration. Available online: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/je60048a004>

References

1. S. Baliuk, V. Medvedev, M. Miroschnichenko, Ye. Skrylnik, D. Timchenko, A. Fatiev, A. Khristenko, Yu. Tsapko. Environmental state of soils in Ukraine. National Scientific Center «Institute for Soil Science and Agrochemistry Research», 2015, Kharkiv, pp.38-42.
2. V.K. Matviychuk, I.O. Khar. Monograph. Atmospheric air pollution. National Academy of Management, Kyiv, 2013. - 272 p.
3. M.P. Dyvak, Yu.B. Maslyak, A.V. Pukas, N.P. Porplytsya, I.F. Voitiuk, V.S. Tymchyshyn. Architecture of the ecological monitoring system and an example of its application for modeling concentrations of harmful emissions from motor transport. Inductive modeling of complex systems: Coll. Science. pr. - K.: ISTC ITS NAS and MES of Ukraine, 2017. - Issue. 9. – pp. 69-84.
4. V.A. Yurchenko, L.S. Mikhailova, M.V. Bespalova. Investigation of the influence of the road on the ecosystems of the roadside space. Bulletin of the Kharkiv National Automobile University: a collection of scientific papers. Kharkiv, 2018. - Issue 43. - pp. 29-32.
5. O.G. Melnikova, V.A. Yurchenko. Ecological consequences of technogenic load created by road-infrastructure complexes on soil ecosystems. IX International Scientific and Practical Conference. Ecological, legal and economic aspects of ecological security of the regions October 29-31, 2014 Kharkiv – 2014. pp. 232-236.
6. Dzhigirey V.S. Ecology and protection of the natural environment. - 3 edition. "Znannya", KO - 2014. - 309 p.
7. Dyvak, M.; Rot, A.; Pasichnyk, R.; Tymchyshyn, V.; Huliiev, N.; Maslyak, Y. Monitoring and Mathematical Modeling of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions of Nitrogen Dioxide from Motor Vehicles. *Sustainability* 2021, 13, 2768.
8. Porplytsya, N.; Dyvak, M. Interval difference operator for the task of identification recurrent laryngeal nerve. In Proceedings of the 2015 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv, Ukraine, 2–5 September 2015; pp. 156–158.
9. Amin Al Manmi, D.A.M.; Abdullah, T.O.; Al-Jaf, P.M.; Al-Ansari, N. Soil and Groundwater Pollution Assessment and Delineation of Intensity Risk Map in Sulaymaniyah City, NE of Iraq. *Water* 2019, 11, 2158
10. La Cecilia, D.; Porta, G.M.; Tang, F.H.; Riva, M.; Maggi, F. Probabilistic indicators for soil and groundwater contamination risk assessment. *Ecol. Indic.* 2020, 115, 106424
11. Moranda, A.; Cianci, R.; Paladino, O. Analytical Solutions of One-Dimensional Contaminant Transport in Soils with Source Production-Decay. *Soil Syst.* 2018, 2, 40
12. Rausch, A. CMS Guide on Soil and Groundwater Contamination; CMS.Low.Tax.: Kyiv, Ukraine, 2019; p. 54.
13. M.R. Heal, J.N. Cape, A numerical evaluation of chemical interferences in the measurement of ambient nitrogen dioxide by passive diffusion samplers, *Atmospheric Environment*, Volume 31, Issue 13, 2017.
14. Dyvak, M. P. Identification of discrete models of systems with distributed parameters based on the analysis of interval data [Text]: monograph / M. Dyvak, N. Porplitsia, T. M. Dyvak. – Ternopil: Economic Opinion of TNEU, 2018. – 220 p.
15. Dyvak M. P. Problems of mathematical modeling of static systems with interval data: monograph /M. Dyvak - T.: Econom. opinion of TNEU, 2011. - 215 p.
16. Dyvak M.P. Applied problems of structural and parametric identification of interval models of complex objects [Electronic resource]: monograph / M.V. Dyvak, A. V. Pukas, N. Porplitsia, A. M. Melnyk. - Ternopil: University Thought, 2021. - 212 p.
17. Zakharov I. I., Lishchyshyna T. P., Zakharova O. I. Ecologically pure technology for the nitric acid reproduction. *Visnyk of Eastern Ukrainian National University after Volodymyr Dahl № 9 (216) 2014*
18. Pozniak S.P. Soil science and geography of soils. - Lviv: Ivan Franko Lviv National University, 2010. - Part 1. - 270 p.; Part 2. - 285 p.
19. Hsi-Sheng, Wills G.B. Diffusion coefficient of aqueous Nitric Acid at 25oC as function of concentration. Available online: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/je60048a004>