

УДК 504.5:551.577.13

М. М. БІЛЯЄВ¹, В. Д. ПЕТРЕНКО², В. В. БІЛЯЄВА³, О. В. БЕРЛОВ^{4*},
О. В. ЗВОНАРЬОВА⁵

¹Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 53, ел. пошта petrenko.diit@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

³Каф. енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, пр. Науки, 4, Дніпро, Україна, 49600 тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{4*}Каф. «Охорони праці, цивільної та техногенної безпеки», Український державний університет науки і технологій, вул. Архітектора Олега Петрова, 24а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 247 16 01, ел. пошта berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

⁵Каф. «Вища математика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (067) 647 96 54, ел. пошта zvonareva.olyga@gmail.com, ORCID 0009-0001-9545-6996

Математичне моделювання процесу формування кислотних дощів у разі викидів із ТЕС

Мета. Відомо, що кислотні дощі негативно впливають на навколишнє середовище. Формування кислотних опадів в атмосфері відбувається внаслідок хімічної взаємодії продуктів горіння палива та атмосферної вологості. Кислотні дощі призводять до втрати врожаю, погіршення плодючості землі, закислення води у водоймах. Актуальною проблемою залишається розробка науково обґрунтованих методів дослідження інтенсивності такого кислотного забруднення атмосферного повітря та поверхні ґрунту в регіонах, де мають місце значні викиди від ТЕС. Для розв'язання цієї задачі важливо використовувати математичне моделювання, оскільки визначити експериментальним шляхом вплив викидів від ТЕС на формування кислотних дощів неможливо. Тому основною метою роботи є створення математичної моделі для прогнозування утворення кислотних дощів у разі викидів з ТЕС. **Методика.** Для прогнозування процесу формування кислотного дощу використано тривимірне рівняння конвективно-дифузійного переносу забруднювача, що враховує профіль швидкості вітру, атмосферну стратифікацію, інтенсивність емісії домішки, напрям вітру. Це рівняння також використано для опису процесу перенесення водної пари в атмосферному повітрі. Щоб описати процес утворення кислоти в атмосферному повітрі, використано стехіометричне співвідношення. Чисельне інтегрування модельовального рівняння переносу здійснено за допомогою методу розщеплення. **Результати.** Побудовано багатофакторну чисельну модель, що дозволяє визначати зони, де формуються кислотні дощі. Розглянуто задачу прогнозування формування кислотного дощу в разі викидів від ТЕС на базі побудованої чисельної моделі. **Наукова новизна.** Запропоновано чисельну модель для прогнозування виникнення кислотного дощу внаслідок викидів із ТЕС. Модель є багатофакторною та враховує конвекцію, атмосферну дифузію, нерівномірний профіль вітру. Створено комп'ютерний код, що дозволяє оперативно оцінювати зони кислотного забруднення. **Практична значимість.** Розроблений комп'ютерний код для аналізу зон кислотного забруднення довкілля в разі промислових викидів дає можливість прогнозувати інтенсивність такого забруднення в різних метеоумовах.

Ключові слова: кислотний дощ; ТЕС; забруднення атмосфери; математичне моделювання; промислові викиди

Вступ

Від середини ХХ ст. помітне значне випадання кислотних дощів та взагалі підвищення їх кислотності, що суттєво вплинуло на науковий інтерес до даної проблеми [3, 7–10, 13, 14]. В Україні кислотні дощі випадають часто, що обумовлено значним техногенним навантаженням регіонів. Це несе загрозу здоров'ю людини

та навколишньому середовищу. Кислотний дощ утворюється в результаті реакції між атмосферною водою і такими забруднювачами, як діоксид сірки (SO₂) і різні оксиди азоту (NO_x). Далі утворюються розчини кислот: сірчаної, сірчистої, азотистої й азотної. Джерелами кислотоутворювальних викидів є теплові електростанції, автотранспорт, металургійні і хімічні підприємства, авіація, тваринництво, спалювання

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

вугілля і деревини та ін. Також воєнні дії в Україні можуть спричинити генерацію кислотних дощів, якщо станеться влучання дронів чи ракет в об'єкти паливно-енергетичного комплексу чи інфраструктуру хімічної промисловості. Потім разом з атмосферними опадами розчини кислот випадають на землю, чим спричиняють значні ушкодження територій, сільгоспугідь та особливо можуть спричинити проблеми зі здоров'ям людей. Забруднення повітря діоксидом сірки та оксидами азоту може викликати респіраторні захворювання (астма, бронхіт, пневмонія та ін.) чи загострити їх.

Кислотні опади завдають шкоди лісам, оскільки розчиняють поживні речовини, такі як магній і кальцій, необхідні для здоров'я дерев. Крім того, кислотні дощі спричиняють виділення алюмінію в ґрунт, що ускладнює поглинання води деревами. Деревина, що росте у гірських районах на великій висоті, наприклад, ялинки, стають більш вразливими через вплив кислотних хмар і туману, які містять більше кислоти, ніж дощ або сніг. Кислотні хмари і туман позбавляють важливих поживних речовин листя та хвою, що призводить до розвитку інфекцій, комах та пошкодження від холодної погоди дерев і лісів.

Наслідки впливу кислотних опадів на рослинність включають: пошкодження листя та голок хвої; порушення процесів фотосинтезу; зниження стійкості до патогенних організмів; ослаблення та порушення росту рослин та ін.

Кислотні опади пошкоджують озера і струмки. До забруднення та кислотних дощів більшість водойм мала рівень *pH* близько 6,5. Проте кислотні дощі призвели до того, що багато озер і струмків мають значно нижчий рівень *pH*. Крім того, алюміній, який потрапляє в ґрунт, врешті надходить до водоймищ і може спричинити шкоду місцевій фауні.

Відомі наслідки впливу кислотних дощів на ґрунт: збільшення кислотності ґрунту; пошкодження кореневої системи рослин; порушення процесів усмоктування води та поживних речовин; вимивання мікроелементів та поживних речовин; пригнічення та загибель азотфіксуючих бактерій та ін. (рис. 1). Кислотні дощі завдають шкоди житловим і промисловим будівлям та об'єктам, пам'ятникам, архітектурним пам'яткам, автомобілям та ін. Хімічні сполуки, які містяться в кислотних дощах, можуть приз-

вести до відшаровування фарби, а кам'яні структури можуть здатися старими та пошкодженими, що знижує їхню цінність і естетичний вигляд. Основною реакцією, що викликає руйнування мрамору та інших матеріалів, є утворення сульфатів на їхній поверхні.



Рис. 1. Наслідки кислотних дощів після хімічного викиду (https://24tv.ua/pislya_himvikidu_v_krimu_proydut_ne_bezpechni_kislotni_doshhi_n1027257)

Fig. 1. Consequences of acid rain after a chemical spill (https://24tv.ua/pislya_himvikidu_v_krimu_proydut_ne_bezpechni_kislotni_doshhi_n1027257)

Слід зазначити, що до числа потужних техногенних джерел, які сприяють формуванню кислотних дощів, належать ТЕС. Хімічні перетворення продуктів горіння органічного палива після потрапляння в атмосферне повітря вступають у реакцію з водяною парою та формують кислоти, що осідають на поверхню землі або вільну поверхню водойм. Інтенсивність викидів із ТЕС відома, але для оцінювання їх впливу на формування кислотних дощів, визначення масштабу саме такого забруднення довкілля потрібно мати науково обґрунтовані методи дослідження. У зв'язку з цим важливою є розробка методів оцінювання впливу викидів від промислових об'єктів на формування кислотних дощів та визначення масштабу такого специфічного забруднення довкілля. Зрозуміло, що для розв'язання цієї важливої задачі потрібно мати математичні моделі, бо експериментальним шляхом визначити вплив підприємств на формування кислотних дощів неможливо. Для рішення даної проблеми має сенс використання моделі Гауса, аналітичних моделей або чисельних моделей [1, 4, 6, 11, 12]:

Мета

Робота спрямована на створення математичної моделі для прогнозування процесу утворення кислотних дощів у разі викидів із ТЕС (рис.2).



Рис. 2. Викиди від Придніпровської ТЕС
(<https://cutt.ly/eJMj7Ag>)

Fig. 2. Emissions from Prydniprovskia TPP
(<https://cutt.ly/eJMj7Ag>)

Методика

Розглянемо процес формування кислотного дощу в разі викиду продуктів горіння від труб Придніпровської ТЕС (рис. 2).

Для оцінювання впливу викидів із ТЕС на формування кислотних дощів потрібно мати інформацію:

- 1) про просторовий розподіл концентрації домішки в атмосферному повітрі, яка є «ядром» процесу утворення кислот;
- 2) про розподіл вологи в атмосферному повітрі;
- 3) про механізм хімічного формування кислоти внаслідок взаємодії «домішка – волога».

Для моделювання поширення домішки (NO_2) в атмосферному повітрі (викид із ТЕС) використовуємо 3D-рівняння масопереносу [1, 2, 4, 5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \\ + \sum Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i). \end{aligned} \quad (1)$$

де C – концентрація NO_2 в повітрі; u, v, w – компоненти вектора швидкості вітру; Q – інтенсивність викиду NO_2 від ТЕС; μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти атмосферної турбулентної дифузії; t – час.

Положення джерела емісії (труби ТЕС) моделюємо за допомогою дельта-функції Дірака:

$$\delta(x - x_i), \delta(y - y_i), \delta(z - z_i),$$

де x_i, y_i, z_i – декартові координати джерела викиду (труби).

Постановку крайових умов для рівняння (1) розглянуто в [2, 5]. Відзначимо, що на межі, де потік входить до розрахункової зони, ставлять граничну умову $C = 0$. Для початкового моменту $t = 0$ беремо $C = 0$.

Для моделювання перенесення водяної пари в атмосферному повітрі також використовуємо рівняння масопереносу, що має такий вигляд [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial wS}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial S}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

де S – концентрація водяної пари в атмосферному повітрі; значення інших параметрів такі самі, що і для рівняння (1). На межі, де потік входить до розрахункової зони, ставимо граничну умову $S = S_0$, де S_0 – фонові концентрація водяної пари в атмосферному повітрі. Для моменту $t = 0$ беремо $S = 0$. Рівняння (2) збігається за виглядом із рівнянням (1), але в рівнянні (2) немає джерела емісії водяної пари.

У разі практичного використання рівнянь масопереносу (1) та (2) враховують нерівномірний профіль швидкості вітру, а саме: на вході до розрахункової зони профіль швидкості вітру визначають за моделлю Швець – Юдіна :

$$u = u_1 \left(\frac{\lg \frac{z}{z_0}}{\lg \frac{z_1}{z_0}} \right),$$

де u_1 – швидкість вітру на висоті z_1 ; z_0 – шорсткість.

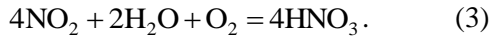
Коефіцієнти атмосферної дифузії визначаємо так :

$$\mu_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m;$$

$$\mu_x = k_0 \cdot u; \quad \mu_y = k_0 \cdot v,$$

де $k_0 = 0,1$; $k_1 = 0,2$.

Процес формування кислотних опадів визначаємо на базі наступного рівняння :



Отже, алгоритм розв'язання задачі полягає в такому :

1. Чисельно розв'язуємо рівняння (1) та визначаємо концентрацію NO_2 в атмосферному повітрі для часу t .

2. Чисельно розв'язуємо рівняння (2) та визначаємо концентрацію водяної пари в атмосферному повітрі для часу t .

3. Здійснюємо розрахунок концентрації азотної кислоти на базі рівняння (3).

4. Визначаємо зміну концентрації NO_2 , водяної пари в розрахунковій зоні для нового часу.

Чисельна модель. Для чисельного розв'язування рівнянь масопереносу (1) та (2) використовуємо скінченнорізницеві схеми. Для чисельного інтегрування рівняння (1) здійснюємо таке його геометричне розщеплення:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right); \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right); \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (w - w_g)C}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \sigma C &= \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)). \quad (4) \end{aligned}$$

Під час побудови чисельної моделі тут і далі будемо використовувати позначку $w = w - w_g$.

Виконаємо такі перетворення:

$$\begin{aligned} \frac{\partial uC}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}; \\ \frac{\partial vC}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}; \\ \frac{\partial wC}{\partial z} &= \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z}; \\ \frac{\partial wC}{\partial z} &= \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z}, \end{aligned}$$

де використано такі позначення:

$$\begin{aligned} u^+ &= \frac{u + |u|}{2}; u^- = \frac{u - |u|}{2}; \\ v^+ &= \frac{v + |v|}{2}; v^- = \frac{v - |v|}{2}; \\ w^+ &= \frac{w + |w|}{2}; w^- = \frac{w - |w|}{2}. \end{aligned}$$

Здійснимо апроксимацію похідних за формулами :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} - \\ &- \mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}; \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} - \\ &- \mu_y \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}; \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) &\approx \mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} - \\ &- \mu_z \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} = M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1}; \\ \frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}; \\ \frac{\partial v^+ C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1}; \\ \frac{\partial v^- C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}. \end{aligned}$$

Для першого рівняння масопереносу скінченнорізницеву схему записуємо так :

– крок 1:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k = M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n;$$

– крок 2:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} = M_{xx}^+ C^n + M_{xx}^- C^{n+1}.$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Скінченнорізницеву схему для другого рівняння масопереносу записуємо таким чином:

– крок 1:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_y^+ C^k = M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n;$$

– крок 2:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_y^- C^{n+1} = M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^{n+1}.$$

Скінченнорізницеву схему для третього рівняння масопереносу запишемо так:

– крок 1:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_z^+ C^k = M_{zz}^+ C^k + M_{zz}^- C^n;$$

– крок 2:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_z^- C^{n+1} = M_{zz}^+ C^n + M_{zz}^- C^{n+1}.$$

Для інтегрування останнього рівняння із (3) використовуємо метод Ейлера. Розрахункова залежність має вигляд :

$$C^{n+1} = C^n - dt \cdot \sigma C + dt \cdot \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)) \delta(z - z_i(t)).$$

Аналогічно будуємо різницеву схему для чисельного інтегрування рівняння (2).

Розроблено комп'ютерну програму, що реалізує розглянуті дискретні рівняння.

Результати

Далі наведено результати математичного моделювання зони кислотного забруднення повітря в разі емісії NO_2 на Придніпровській ТЕС.

Розрахункова зона показана на рис. 3. Для проведення розрахунків взято : швидкість вітру на висоті 10 м – 3 м/с (рис. 4) та 7 м/с (рис. 5); швидкість гравітаційного осадження крапель кислоти, що утворюються в атмосферному повітрі, – 0,003 м/с; концентрація водяної пари в атмосфері 11 мг/м³ ; m = 1.

Розглянуто різний напрям вітру: східний та західний. У разі західного вітру має місце рух домішки в напрямі житлового масиву Перемога, у разі східного вітру – в приміському на-

прямі м. Дніпро. Інтенсивність викиду домішки на ТЕС взято з відкритих джерел.

Далі на рисунках показано зону кислотного забруднення повітря для розглянутих сценаріїв.

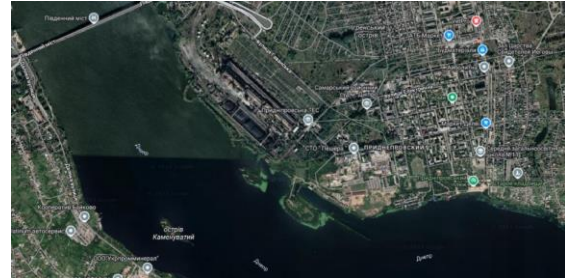


Рис. 3. Розрахункова зона (Google Image 2024)

Fig. 3. Computational area (Google Image 2024)



Рис. 4. Ізолінії концентрації азотної кислоти, рівень $z = 25$ м:

$$1 - C = 0,82 \text{ мг/м}^3; 2 - C = 0,61 \text{ мг/м}^3, \\ 3 - C = 0,22 \text{ мг/м}^3$$

Fig. 4. Isolines of nitric acid concentration, level $z = 25$ m:

$$1 - C = 0,82 \text{ mg/m}^3; 2 - C = 0,61 \text{ mg/m}^3, \\ 3 - C = 0,22 \text{ mg/m}^3$$



Рис. 5. Ізолінії концентрації азотної кислоти, рівень $z = 10$ м:

$$1 - C = 0,54 \text{ мг/м}^3; 2 - C = 0,28 \text{ мг/м}^3, \\ 3 - C = 0,11 \text{ мг/м}^3$$

Fig. 5. Isolines of nitric acid concentration, level $z = 10$ m:

$$1 - C = 0,54 \text{ mg/m}^3; 2 - C = 0,28 \text{ mg/m}^3, \\ 3 - C = 0,11 \text{ mg/m}^3$$

Як можемо бачити з рис. 4, зона кислотного забруднення має форму шлейфа, що напрямлений у напрямі руху повітряних мас. Формування такого шлейфу призводить до закислення поверхні землі на присадибних ділянках. Аналіз зони кислотного забруднення, що наведений на рис. 5, показує, що значному кислотному забрудненню піддається акваторія р. Дніпро, унаслідок чого слід очікувати додаткового техногенного забруднення водного середовища.

Відзначимо, що час розрахунку кожного варіанту задачі складає 4 с. Таким чином, побудована математична модель дозволяє в рамках одного комп'ютерного коду швидко розраховувати форму та інтенсивність зон кислотного забруднення, що формуються в атмосферному повітрі для різних метеоумов.

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано чисельну модель для прогнозування виникнення кислотного дощу внаслідок викидів із ТЕС. Модель є багатофактор-

ною та враховує конвекцію, атмосферну дифузію, нерівномірний профіль вітру, хімічне перетворення домішки. Створено комп'ютерний код, що дозволяє оперативно оцінювати зони кислотного забруднення.

Висновки

1. Побудовано багатофакторну чисельну модель, що дозволяє визначати зони, де формуються кислотні дощі внаслідок викидів із ТЕС.

2. Запропонована чисельна модель дає можливість розв'язувати задачі оцінки впливу на довкілля (ОВНД) на новому якісному рівні: визначати не тільки зони «впливу» ТЕС на забруднення довкілля, але і зони кислотного забруднення, чого не дозволяють зробити наявні моделі, які використовують на практиці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Берлянд М. Е. *Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы*. Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. 273 с.
2. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.
3. Нічук Н. В. Аналіз поширення кислотних опадів в Україні. *Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ* (Вінниця, 27–28 квітня 2020). *Вінницький національний технічний університет*. Вінниця, 2020. С. 1–3.
4. Пляцук Л. Д., Бойко В. В. Аналіз методів математичного моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері. *Вісник КНУ ім. Михайла Остроградського*. 2010. Вип. 6. С. 1–4.
5. Пшинько А. Н., Беляев Н. Н., Машихина П. Б. *Моделирование загрязнения атмосферы при техногенных авариях*. Днепропетровск : Нова ідеологія, 2011. 166 с.
6. Самарский А. А. *Теория разностных схем*. Москва : Наука, 1983. 616 с.
7. Acid rain. *New World Encyclopedia*. 2012. URL: http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Acid_rain
8. Biliaiev M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI*. 2012. P. 87–91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15
9. Butler Th. J., Likens G. E. Acid rain. *Encyclopedia Britannica*. URL: <https://www.britannica.com/science/acid-rain>
10. Hunt P. Putting Asian acid rain on the map. *New Scientist*. 1992. URL: <https://www.newscientist.com/article/mg13618510-700-putting-asian-acid-rain-on-the-map/>
11. Ilić P., Ilić S., Stojanović Bjelić L. Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life (Banja Luka) – APEIRON*. 2018. Vol. 16, No 1–2. P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i>
12. Lacombe J.-M., Truchot D., Duplantier S., Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes* (Bologna, 9-12 Oct. 2017). Bologna, 2017. P. 1–5.

13. Sivaramanan S. *Acid rain, causes, effects and control strategies*. 2015.
URL:
https://www.researchgate.net/publication/275344491_ACID_RAIN_CAUSES_EFFECTS_AND_CONTROL_STRATEGIES
14. Verma A., Tewari A., Azami A. An impact of simulated acid rain level on different pH-levels on some major vegetable plants in India. *Reports and opinion*. 2010. Vol. 2 (4). P. 38–40.

M. M. BILIAIEV¹, V. D. PETRENKO², V. V. BILIAIEVA³, O. V. BERLOV^{4*},
O. V. ZVONAROVA⁵

¹Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Dep. «Transportation Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 53, e-mail petrenko.dii@gmail.com, ORCID 0000-0003-2201-3593

³Dep. Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{4*}Dep. «Labor Protection, Civil and Technogenic Safety», Ukrainian State University of Science and Technologies, Architect Oleg Petrov St., 24a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 756 34 57, e-mail berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

⁵Dep. «Higher Mathematics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (067) 647 96 54, e-mail zvonareva.olyga@gmail.com, ORCID 0009-0001-9545-6996

Mathematical Modeling of the Process of Acid Rain Formation in Case of Emissions from Thermal Power Plants

Purpose. It is known that acid rain has a negative impact on the environment. The formation of acid precipitation in the atmosphere occurs as a result of the chemical interaction of fuel combustion products and atmospheric humidity. Acid rain leads to crop losses, deterioration of soil fertility, and acidification of water in reservoirs. The development of scientifically based methods for studying the intensity of such acidic pollution of the air and soil surface in regions with significant emissions from thermal power plants remains an urgent problem. To solve this problem, it is important to use mathematical modeling, since it is impossible to determine the impact of emissions from thermal power plants on the formation of acid rain experimentally. Therefore, the main goal of the work is to create a mathematical model for predicting the formation of acid rain in the event of emissions from thermal power plants. **Methodology.** To predict the process of acid rain formation, a three-dimensional equation of convective diffusion transport of a pollutant is used, which takes into account the wind speed profile, atmospheric stratification, emission intensity of an impurity, and wind direction. This equation is also used to describe the process of water vapor transport in atmospheric air. To describe the process of acid formation in atmospheric air, a stoichiometric relationship is used. The numerical integration of the modeling equation of transfer was carried out using the splitting method. **Findings.** A multifactorial numerical model was built that allows determining the zones where acid rain is formed. The problem of predicting the formation of acid rain in the case of emissions from thermal power plants on the basis of the constructed numerical model is considered. **Originality.** A numerical model is proposed to predict the occurrence of acid rain due to emissions from thermal power plants. The model is multifactorial and takes into account convection, atmospheric diffusion, and an uneven wind profile. A computer code has been created that allows for rapid assessment of acid pollution zones. **Practical value.** The developed computer code for analyzing the zones of acidic pollution of the environment in the case of industrial emissions makes it possible to predict the intensity of such pollution in various meteorological conditions.

Keywords: acid rain; thermal power plants; air pollution; mathematical modeling; industrial emissions

REFERENCES

1. Berlyand, M. E. (1985). *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery* Leningrad: Gidrometeoizdat (in Russian)
2. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)

3. Nichuk, N. V. (2020). Analiz poshyrennia kyslotnykh opadiv v Ukraini. In *Materialy XLIX naukovo-tekhnichnoi konfere-ntsii pidrozdiliv VNTU* (pp. 1-3). Vinnytsia National Technical University. Vinnitsa, Ukraine. (in Ukrainian)
4. Plyatsuk, L. D., & Boyko, V. V. (2010). The analysis of mathematical modeling methods of pollutants diffusion in the atmosphere. *Bulletin of the Mykhailo Ostrogradsky Kyiv National University*, 6, 1-4. (in Ukrainian)
5. Pshinko, A. N., Belyayev, N. N., & Mashihina, P. B. (2011). *Modelirovanie zagryazneniya atmosfery pri tekhnogennykh avariyah*. Dnepropetrovsk: Nova ideologiya. (in Russian)
6. Samarskiy, A. A. (1983). *Teoriya raznostnykh skhem*. Moscow: Nauka. (in Russian)
7. Acid rain. (2012). *New World Encyclopedia*. Retrieved from http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Acid_rain (in English)
8. Biliaiev, M., & Kharytonov, M. M. (2012). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI*, 87-91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)
9. Butler, Th. J., & Likens, G. E. Acid rain. *Encyclopedia Britannica*. Retrieved from <https://www.britannica.com/science/acid-rain> (in English)
10. Hunt, P. (1992). Putting Asian acid rain on the map. *New Scientist*. Retrieved from <https://www.newscientist.com/article/mg13618510-700-putting-asian-acid-rain-on-the-map/> (in English)
11. Ilić, P., Ilić, S., & Stojanović Bjelić, L. (2018). Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life (Banja Luka)-APEIRON*, 16(1-2), 38-45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i> (in English)
12. Lacombe, J. M., Truchot, D., & Duplantier, S. (2017). Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. In *18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes* (pp. 1-5). Bologna, Italy. (in English)
13. Sivaramanan, S. (2015). *Acid rain, causes, effects and control strategies*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/275344491_ACID_RAIN_CAUSES_EFFECTS_AND_CONTROL_STRATEGIES (in English)
14. Verma, A., Tewari, A., & Azami, A. (2010). An impact of simulated acid rain level on different pH-levels on some major vegetable plants in India. *Reports and opinion*, 2(4), 38-40. (in English)

Надійшла до редколегії: 01.02.2024

Прийнята до друку: 03.06.2024