

# ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

УДК 504.063

**Olena Voloshkina**, Dr, Professor of Department of Labour and Environment Protection  
ORCID ID: 0000-0002-3671-4449 *e-mail*: e.voloshki@gmail.com

**Artem Goncharenko**, graduate student  
ORCID ID: 0000-0001-5647-1360 *e-mail*: hosting.pat@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

## INFLUENCE OF MILITARY ACTIONS ON THE PROCESS OF THE FORMATION OF PRECIPITATION

**Abstract.** *This work concerns the study of the influence of military actions on the development of global ecological processes, in particular, the fall of acid rain from individual single explosions. A mathematical model is proposed, which takes into account the emission of pollutants into the subcloud washout zone and the kinetics of the condensation process. The concentration of combustion products in the atmosphere at the level of three to five diameters of the explosion area (the area of the formed explosion funnel) is found using the theory of a convective jet from a warm source to the environment. At the same time, we determined the speed of warm air that rises above the area of the explosion, the average temperature in the transition section of the convective jet, and the flow rate of polluted air in the upper part of the jet. The paper presents a system of dimensionless non-stationary differential equations for a high unshaded source, which can be used to determine the dispersion of the main acid-forming substances in the Boussinesq approximation with the variables "eddy velocity – current function – temperature – concentration" with appropriate initial and boundary conditions. Sulfuric anhydride was considered as an example of the main acid-forming substances and the most dangerous and toxic compounds of explosion products. The proposed mathematical model can be used to forecast the possible fall of acid rain on the territories adjacent to single explosions, thereby making a forecast of changes in environmental risk as a result of military operations for the environment and the population. and will make it possible to determine the zones of influence and dispersion from the place of the explosion.*

**Key words:** *acid precipitation; single explosions; military operations; mathematical model*

© О.С. Волошкіна, А.В. Гончаренко, 2022

О.С. Волошкіна, А.В. Гончаренко

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

## ВПЛИВ ВОЄННИХ ДІЙ НА ПРОЦЕС УТВОРЕННЯ КИСЛОТНИХ ОПАДІВ

***Анотація.** Дана робота присвячена вивченню впливу воєнних дій на розвиток глобальних екологічних процесів, зокрема випадінню кислотних опадів від окремих одиночних вибухів. Запропонована математична модель, яка враховує емісію забруднень в зону підхмарного вимивання та кінетику процесу конденсації. Концентрація продуктів згоряння в атмосфері на рівні трьох-п'яти діаметрів площі вибуху (площі утвореної воронки вибуху) знаходиться за допомогою теорії конвективного струменя з теплою джерела в навколишнє середовище. При цьому нами визначалася швидкість теплового повітря, яке здійснюється вгору над площею вибуху, середня температура в перехідному перерізі конвективного струменя, витрата забрудненого повітря у верхній частині струменя. В роботі наведена система безрозмірних нестационарних диференціальних рівнянь для високого незатіненого джерела, яка може бути використана для визначення розсіювання основних кислотоутворюючих речовин у наближенні Бусинеска зі змінними «вихор швидкості – функція струму – температура – концентрація» із відповідними початковими та граничними умовами. В якості приклада з основних кислотоутворюючих речовин і найбільш небезпечних і токсичних сполук продуктів вибуху розглядався сірчаний ангідрид. Запропонована математична модель може бути використана для прогнозу можливого випадання кислотних опадів на прилеглих до поодиноких вибухів територіях, тим самим дозволить робити прогноз змін екологічного ризику внаслідок воєнних дій для довкілля та населення та визначити зони впливу та розсіювання від місця вибуху.*

***Ключові слова:** кислотні опади; одиночні вибухи; воєнні дії; математична модель*

DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.4.5-14>

### Вступ

Одним із негативних наслідків воєнних дій є забруднення атмосфери небезпечними газами, які утворюються в результаті постійних артилерійських обстрілів та застосування вибухівки. Низка небезпечних хімічних сполук, таких як чадний газ (CO), вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>), водяна пара (H<sub>2</sub>O), бурий газ (NO), закис азоту (N<sub>2</sub>O), діоксид азоту (NO<sub>2</sub>), формальдегід (CH<sub>2</sub>O), пари ціанистої кислоти (HCN), азот (N<sub>2</sub>), сірчаний ангідрид (SO<sub>2</sub>), а також велика кількість токсичної органіки вивільняється в атмосферу, проходячи під час вибуху повне окислення. Вуглекислий газ і водяна пара відносяться до парникових газів, оксиди сірки та азоту спричиняють кислотні дощі з негативними наслідками (зміна рН ґрунту, опіки рослин, негативний вплив на організм живих істот тощо).

Кислотні дощі мають негативний вплив на організм людини, зокрема на стан слизових тканин та органи дихання, викликаючи при цьому підвищене слизовиділення в дихальних шляхах, кашель, хрипоту, подразнення слизових оболонок, запаморочення і нудоту. Тільки один кілограм вибухівки утворює декілька десятків кубометрів токсичних газів: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO.

Внаслідок утворення порівняно стійкої сполуки чадного газу з гемоглобіном – карбогемоглобіну, кров втрачає здатність передавати кисень тканинам організму і розвивається гіпоксія. Крім характерних уражень крові та кровотворних органів, при цьому також спостерігаються розлади функцій нервової системи, ураження печінки та органів внутрішньої секреції.

Дослідження 2014 року показали, що внаслідок обстрілів м. Щастя в Луганській області вміст небезпечних речовин в повітрі в декілька разів перевищив їх гранично допустимі концентрації. Зокрема, діоксиду сірки і нітрогену – в 5–8 разів [1].

Згідно з даними ЦГО ім. Б. Срезневського по м. Києву, 6 червня 2022 року загальний рівень забруднення повітря в Дарницькому районі Києва підвищився. Зафіксовано значне зростання вмісту  $\text{NO}_2$  та підвищення вмісту діоксиду сірки, що можна пояснити обстрілами о шостій ранку Дарницького району міста [2].

Таким чином, виникла необхідність визначення впливу воєнних дій на частоту та кількість випадіння кислотних опадів і їх впливу на навколишнє середовище та здоров'я населення.

## Постановка проблеми

Аналіз забруднення атмосферних опадів домішками та вплив цього забруднення проводився низкою вітчизняних та іноземних дослідників. Так, дослідники у роботі [3] на підставі вибраної мережі ділянок на півночі Китаю довели, що із загальної кількості опадів 28% припадало на кислотні з  $\text{pH} < 5,6$ . З цих кислотних проб 53% виявилися сильнокислими зі значенням  $\text{pH}$  нижче 5,0, що вказує на значно високий рівень їх підкислення. Більшість кислотності опадів обумовлена  $\text{H}_2\text{SO}_4$  і  $\text{HNO}_3$ , їх відносний внесок становить 72% і 28% відповідно. В роботі [4] аналіз зворотної траєкторії показав, що на хімічний склад дощової води в Сіані впливають місцеві джерела забруднення та ґрунтовий пил у місцевих і віддалених районах. Великі надходження ґрунтового пилу та спалювання вугілля взимку та навесні призвели до вищих значень основних іонів та значень  $\text{pH}$  у сухі сезони, ніж у вологі сезони. Аналіз основних факторів, кореляційний аналіз і розподіл джерел показали, що  $\text{SO}_4^{2-}$  і  $\text{NO}_3^-$  були з антропогенних джерел. Високі концентрації  $\text{SO}_4^{2-}$  і  $\text{NO}_3^-$  у дощовій воді вказують на те, що Сіань сильно забруднений та потребує покращення якості повітря шляхом скорочення викидів твердих частинок і викопного палива та викидів транспортних засобів. Автори роботи [5] на основі кореляційного аналізу натурних вимірювань довели, що надмірний викид сірки був основною причиною кислотності опадів у Ваньчжоу (КНР), тоді як у 2000-х роках у Ваньчжоу спостерігалось посилення внеску азотної кислоти в кислотність опадів.

В роботах [6, 7] автори на основі експериментальних досліджень та аналізу даних моніторингових спостережень за забрудненням атмосферного повітря міста локальними осередками забруднення дійшли до висновку їх взаємозв'язку з формуванням хімічного складу опадів. Мікроелементний склад опадів та результати математичного моделювання показують вплив викидів промислових підприємств на випадіння кислотних опадів на територіях, прилеглих до потенційно небезпечних об'єктів. Оцінка взаємозв'язку між окремими компонентами забруднення атмосферного повітря, показником  $\text{pH}$

та температурними умовами на основі аналізу моніторингових даних багаторічних спостережень досить детально розглянута в роботах [8, 9]. Дослідження даних авторів свідчать про збереження тенденції зміни показника рН в розрізі 2013–2017 років для м. Києва в бік зростання кислих опадів. Циклічна, сезонна та випадкова компоненти ряду рН зберігають свій характер практично без змін. Шляхи перенесень та перетворень природних та антропогенних емісій в атмосфері складаються з зони осадження при метеоумовах нестабільних за показником турбулентності атмосфери та градієнта розподілення температури по висоті. Емісію в зону підхмарного вимивання опадами та емісію в хмаринний покрив можна описати рівняннями турбулентного тепломасопереносу при відповідних метеоумовах [10]. Емісії по цих шляхах зумовлюють подальше забруднення та закислення хмар, з яких, нарешті, відбувається випадіння опадів, які часто мають понижений показник рН.

Наведені дослідження стосувалися, в основному, формування викидів промислових підприємств та урбанізованих територій. Проблема формування кислотних опадів в атмосферному повітрі Землі від наслідків воєнних дій є актуальною та маловивченою на сьогоднішній день, як теоретично, так і експериментально. Отже, внаслідок воєнної російської агресії для України постає актуальне питання вивчення наслідків впливу воєнних дій на довкілля і організм людини. Зокрема, вивчення формування кислотних опадів в атмосфері, враховуючи велику кількість постійних артилерійських обстрілів та застосування вибухівки. Особливу увагу слід звернути на проблему переміщення з'єднань сірки в атмосферному повітрі на великі відстані (до 1000 км) від джерела, оскільки кислотні дощі, що утворюються внаслідок вибуху та проходження відповідних реакцій в атмосфері, можуть випадати не тільки на прилеглих до вибуху, а й на віддалених територіях.

Оцінка та прогнозування впливу артилерійських обстрілів на стан атмосферного повітря з подальшим впливом на здоров'я населення на сьогодні майже не проводились та потребують створення практичної та дієвої теорії перетворення в кислоти вибухових викидів з вивченням їх подальшого випадіння, як на території міста вибуху, так і за його межами.

Мета даної роботи полягає в створенні математичної моделі процесів формування кислотних опадів та їх випадання на територіях, що прилягають до зони артилерійських обстрілів, яка враховує двовимірне тепло- та масоперенесення, кінетику процесу конденсації, дифузію та конвекцію пари оксидів сірки.

## **Виклад основного матеріалу досліджень**

Дослідження основних закономірностей процесу конденсації сірчаного ангідриду та формування частинок, здатних досягати поверхні Землі в процесі седиментації, проводилося залежно від факторів та умов:

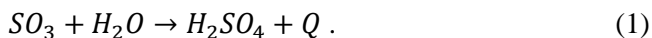
- початкової температури та концентрації з'єднань, що утворюються в повітрі при вибуху;
- пори року;
- розмірів ядер конденсації;
- швидкості вітру.

Постановка задачі формування кислих опадів в атмосферному повітрі прилеглих до місця вибуху територій формулюється наступним чином:

- за основну кислотоутворюючу речовину приймається сірчаний ангідрид, як одна з найбільш небезпечних і токсичних сполук продуктів вибуху;
- процес розсіювання в атмосфері продуктів згоряння здійснюється за безпосередньої взаємодії їх з повітрям; при цьому використовуються коефіцієнти бінарної дифузії для суміші «повітря – забруднювальна речовина»;
- задача вирішується у декартовій системі координат.

Сірчаний ангідрид  $SO_3$  утворюється при окисленні сірчастого ангідриду. Кінцевим продуктом реакції є аерозоль або розчин сірчаної кислоти в дощовій воді, що підкисляє ґрунт, спричиняє загострення захворювань дихальних шляхів людини. Випадання аерозолію сірчаної кислоти відзначається при низькій хмарності і високій вологості повітря.

Механізм утворення сірчаної кислоти, при якому сірчаний ангідрид  $SO_3$  поглинається водяною парою, характеризується рівнянням:



Реакція (1) відбувається практично миттєво та в сукупності з метеорологічними умовами визначає інтенсивність випадіння крапель кислоти поблизу вибуху.

Під час розробки математичної моделі будемо враховувати наступні процеси:

- 1) перенесення газоподібних продуктів вибуху;
- 2) зміну хімічного складу повітряного потоку;
- 3) конвективний теплообмін частинки сірчаної кислоти із зовнішнім середовищем.

Основні припущення:

- 1) не враховується випаровування краплі у процесі руху;
- 2) не береться до уваги вплив сонячної радіації;
- 3) ядро конденсації приймалося у вигляді кубу;
- 4) крапля сірчаної кислоти, що утворилася при конденсації при русі не деформується;
- 5) не враховується радіаційний теплообмін із зовнішнім середовищем;
- 6) приймається, що на частинку діють сили тяжіння та опору повітряного середовища.

Процес розсіювання в атмосфері димового факелу вибуху, що містить продукти згоряння, здійснюється за безпосередньої взаємодії їх із повітрям. Це дозволяє використовувати коефіцієнти бінарної дифузії для суміші «повітря – забруднювальна речовина».

Схему до постановки задачі в початковий момент часу наведено на рис. 1.

Конденсація сірчаного ангідриду відбувається зі змінною у часі швидкістю, величина якої залежить від температури поверхні частки, що змінюється в часі. Дана задача зводиться до рішення наведеної нижче системи безрозмірних нестационарних диференціальних рівнянь у наближенні Бусинеска зі змінними «вихор швидкості – функція струму – температура – концентрація» із відповідними початковими та граничними умовами.

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \frac{1}{Re} \cdot \left( \frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + \frac{Gr}{Re^2} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial X} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -\Omega \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial \Theta_1}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial \Theta_1}{\partial Y} = \frac{1}{Pr \cdot Re} \cdot \left( \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Y^2} \right) + \frac{Q \cdot W_K \cdot \delta_0}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_3}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial C_3}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial C_3}{\partial Y} = \frac{1}{Pr \cdot Se} \cdot \left( \frac{\partial^2 C_3}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C_3}{\partial Y^2} \right) - \frac{W_3^K \cdot \delta_0}{\rho \cdot U_0} \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_4}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial C_4}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial C_4}{\partial Y} = \frac{1}{Pr \cdot Se} \cdot \left( \frac{\partial^2 C_4}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C_4}{\partial Y^2} \right) - \frac{W_3^K \cdot \delta_0}{\rho \cdot U_0} \quad (6)$$

$$\frac{1}{Fo} \cdot \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Y^2} \quad (7)$$

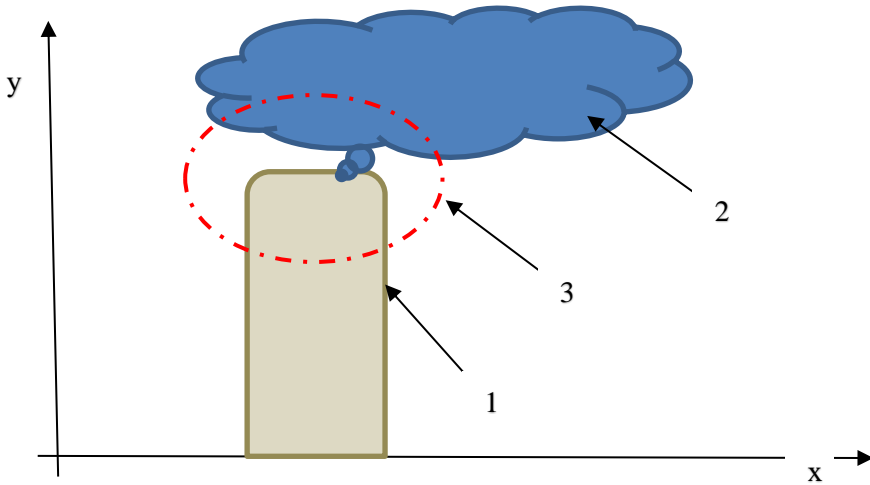


Рис. 1. Схема постановки задачі: 1 – стовп вибуху; 2 – напрямок руху вибухових газів; 3 – умовне локальне джерело викидів при розповсюдженні в атмосфері

Рівняння руху частки в напрямленні декартових координат X і Y відповідно має вигляд

$$\frac{dV_X}{d\tau} = - \frac{3 \cdot C_D \cdot \rho \cdot |V_X - U|^2}{8 \cdot \delta \cdot g} \quad (8)$$

$$\frac{dV_Y}{d\tau} = 1 - \frac{3 \cdot C_D \cdot \rho \cdot |V_Y|^2}{8 \cdot \delta \cdot g} \quad (9)$$

Позначення в даних рівняннях:

$\tau$  – час;  $\Theta$  – температура;  $C_3$  і  $C_4$  – концентрації сірчаного ангідриду та водяної пари відповідно;  $\Psi$  – функція току;  $\Omega$  – вихор швидкості;  $U$ ,  $V$  – швидкості руху газової хмари напрямку X і Y відповідно;  $V_x$  і  $V_y$  – швидкості частки в напрямку X і Y відповідно;  $Re$  – число Рейнольдса;  $Pr$  – число Прандля;  $S_c$  – число Шмідта;  $F_o$  – число Фур'є;  $\rho = \rho_1/\rho_2$  – відносна густина;  $g$  – безрозмірний аналог прискорення вільного падіння;  $C_D$  – коефіцієнт опору;  $Q$  – тепловий ефект реакції кДж/кг;  $W_3^K$  – масова швидкість конденсації сірчаного ангідриду і водяної пари кг/(м<sup>3</sup>\*с);  $\delta_0$  – геометричний розмір ядра конденсації, м;  $C_p$  – питома теплоємність Дж/(кг·К);  $U_0$  – швидкість вітру зовнішнього середовища, м/с.

Швидкість конденсації розраховуємо за формулою:

$$W^K = \beta \cdot \frac{P_A - P_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)}{\sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot T}{M}}}, \quad (10)$$

де  $P_A$  – атмосферний тиск, Па;  $P_0$  – предекспонент, Па;  $E$  – енергія активації процесу конденсації, Дж/кг;  $R$  – універсальна газова стала, Дж/(моль·К);  $M$  – молярна маса, кг/моль;  $\beta$  – коефіцієнт конденсації;  $T$  – температура суміші газів, К.

Початкові умови рівнянь (2)–(9):

$$\begin{aligned} \Omega(X, Y, 0) &= 0, V_X(X, Y, 0) = 0; \\ \Psi(X, Y, 0) &= 0, V_Y(X, Y, 0) = 0; \\ \Theta(X, Y, 0) &= 0, U(X, Y, 0) = 0; \\ C(X, Y, 0) &= 0, V(X, Y, 0) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Граничні умови рівнянь (2)–(9) запишуться у вигляді:

$$X = 0, 0 \leq Y \leq \delta_0: \frac{\partial \Theta}{\partial X} = 0, \Psi = 0, \Omega = 0 \quad (12)$$

$$X = 0, \delta_0 \leq Y \leq H: \Theta = \Theta_1, \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = U, \frac{\partial \Psi}{\partial X} = -V, C_3 = C_0 \quad (13)$$

$$X = \delta_0, 0 \leq Y \leq \delta_0: \frac{\partial \Theta_1}{\partial X} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\partial \Theta_2}{\partial X} + \frac{Q \cdot W_i^K \cdot \delta_0}{\Delta T \cdot \lambda_1}, \Theta_1 = \Theta_1, \quad (14)$$

$$\frac{\partial C_3}{\partial X} = \frac{W_i^K \cdot \delta_0}{D \cdot \rho}, \Psi = \Omega = 0$$

$$X = L, 0 \leq Y \leq H: \Theta = \Theta_1, \frac{\partial \Theta_1}{\partial X} = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial X} = 0, \frac{\partial \Omega}{\partial X} \quad (15)$$

$$Y = 0, 0 \leq X \leq \delta_0: \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = 0, C_3 = 0, \Psi = 0, \Omega = 0 \quad (16)$$

$$Y = 0, \delta_0 \leq X \leq L: \Theta = \Theta_1, C_3 = C_0, \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = U, \frac{\partial \Psi}{\partial X} = -V \quad (17)$$

$$Y = \delta_0, 0 \leq X \leq \delta_0: \frac{\partial \Theta_1}{\partial X} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\partial \Theta_2}{\partial X} - \frac{Q \cdot W_i^K \cdot \delta_0}{\Delta T \cdot \lambda_1}, \Theta_1 = \Theta_2 \quad (18)$$

$$\frac{\partial C_3}{\partial X} = \frac{W_i^K \cdot \delta_0}{D \cdot \rho}, \Psi = \Omega = 0$$

$$Y = H, 0 \leq X \leq L: \Theta = \Theta_1, \frac{\partial C_3}{\partial Y} = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0, \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = 0. \quad (19)$$

Для вирішення цієї системи застосовується метод кінцевих різниць. Система вирішується чисельним способом. Але для першого наближення з деякими припущеннями та узагальненнями можна використати аналітичний метод, як наведено в [11]. Порівняння обох методів для вирішення задачі щодо теплових викидів з високого джерела теплоелектростанції наведено авторами досліджень роботи [12], і ця розбіжність складає в середньому 21%.

Так, розрахунок вибуху при нейтральних умовах атмосфери, зроблений для окремої крилатої ракети типу «Калібр», яка має стартову масу 1400 кг, бойову

частину масою 450 кг, діаметр воронки від окремого вибуху, внаслідок якого утворюється конвективний струмінь над землею  $H = 10$  м з висотою близько  $3H$  при нейтральних умовах атмосфери, показав, що максимальна концентрація сірчистого ангідриду знаходиться на відстані 500 м від місця вибуху і в 1,9 раза перевищує нормативну ( $0,95$  мг/м<sup>3</sup>).

При нейтральних умовах атмосфери для визначення концентрації  $SO_3$  у верхній частині забрудненого струменя можна використати теорію конвективного струменя з теплого джерела в навколишнє середовище. При цьому нами визначалася швидкість теплого повітря, яке здійснюється вгору над площею вибуху, середня температура в перехідному перерізі конвективного струменя, витрата забрудненого повітря у верхній частині струменя. Даний підхід дозволяє визначити зони впливу окремих речовин та їх розсіювання від місця вибуху.

## Висновки

Постановка задачі формування кислих опадів в атмосферному повітрі внаслідок окремого вибуху формується математичною моделлю, яка враховує емісію забруднень в зону підмарного вимивання, кінетику процесу конденсації, дифузію та конвекцію пари оксидів сірки.

Рішення даної задачі можна отримати завдяки наведеній системі безрозмірних нестационарних диференціальних рівнянь у наближенні Бусинеска зі змінними «вихор швидкості – функція струму – температура – концентрація» із відповідними початковими та граничними умовами.

Для нейтральних умов атмосфери розсіювання сірчистого ангідриду можна отримати спрощеним рішенням, використовуючи теорію конвективного струменя з теплого джерела в навколишнє середовище та відому методику щодо прогнозування метеорологічних умов формування рівнів забруднення повітря в містах України.

Запропонована математична модель може бути використана для прогнозу можливого випадання кислотних опадів на прилеглих до поодиноких вибухів територіях, тим самим дозволить зробити прогноз змін екологічного ризику внаслідок воєнних дій для доквілля та населення та визначити зони впливу та розсіювання від місця вибуху.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Звіт про результати вивчення екологічної ситуації на території Донецької та Луганської області / О.І. Бондар, О.А. Улицький, В.М. Єрмаков / Міністерство з питань тимчасово окупованих територій та внутрішньо переміщених осіб України. – К.: Київ, 2018. – 70 с.
2. Про стан забруднення навколишнього природного середовища у Києві та Київській області за даними спостережень ЦГО ім. Б. Срезневського [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://cgo-sreznevsky.kiev.ua> (дата звернення 4.12.2022).
3. Yuesi Wang. Acid neutralization of precipitation in Northern China / Yuesi Wang, Wenpeng Yu, Yuepeng Pan, Dan Wu // Journal of the Air & Waste Management Association. – Vol. 62, Issue 2, 2012. – pp. 204-211 (doi.org/10.1080/10473289.2011.640761).
4. Xiao J. Chemical composition and source identification of rainwater constituents at an urban site in Xi'an // Environ Earth Sci. – Vol. 75 (209), 2016. (doi.org/10.1007/s12665-015-4997-z).



5. Liuyi Zhang. Chemical Characteristics of Precipitation in a Typical Urban Site of the Hinterland in Three Gorges Reservoir, China / Liuyi Zhang, Baoqing Qiao, Huanbo Wang, Mi Tian, Jian Cui, Chuan Fu, Yimin Huang, Fumo Yang // *Journal of Chemistry. Environmental Biogeochemistry of Elements and Emerging Contaminants* (doi.org/10.1155/2018/2914313).
6. Khalid A. Rasheed. Effects of Air Pollutants from Al-Dura Power plant in the Surrounding Area South Baghdad / Khalid A. Rasheed, Zaid A. Azeez, Ali A. Al-Salhy // *J. Int. Environmental Application & Science*. – Vol. 11(2), 2016. – pp. 170-175.
7. Mirzaei S. Concentration and potential source identification of trace elements in wet atmospheric precipitation of Shiras, Iran / Mirzaei S., Hashemi H., Hoseini M. // *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. – Vol. 16, 2018. – 229-237. (doi.org/10.1007/s40201-018-0310-x).
8. Voloshkina O. A study of air pollution with formaldehyde along the highways in Kyiv city / Voloshkina O., Sipakov R., Zhykova O., Bereznitska J. // *USEFUL*, is published by SVp4U, MIAMI, FL, 33130. – Vol. 2, 2018. – pp. 1-7.
9. Klimova I. Influence of meteorological factors on the secondary contamination of atmospheric air by formaldehyde (on example of city of Kyiv) / Klimova I., Sipakov R. // *Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky, Kosice, (Slovakia)*. – Volume 7, No. 2/2019, pp. 75–86. (doi:10.32557/issn.2640-9631/2019-1).
10. Рудаков Д.В. Математичні моделі в охороні навколишнього середовища: Навчальний посібник. – Д.: Видавництво Дніпропетр. ун-ту, 2004. – 160 с.
11. Методичні вказівки щодо прогнозування метеорологічних умов формування рівнів забруднення повітря в містах України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://meteo.gov.ua/files/content/docs/meteo\\_kerdoc/%D0%9A%D0%9452.9.4.01-09.pdf](https://meteo.gov.ua/files/content/docs/meteo_kerdoc/%D0%9A%D0%9452.9.4.01-09.pdf) (дата звернення 4.12.2022).
12. Dmitriy V. Gvozdyakov, Vladimir E. Gubin, Alexandr A. Gromov, Anton O. Tanishev, and Svetlana A. Shvab. Numerical Estimation of the Formation Process of Anthropogenic Precipitation in the Atmosphere [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/311777904\\_Numerical\\_Estimation\\_of\\_the\\_Formation\\_Process\\_of\\_Anthropogenic\\_Precipitation\\_in\\_the\\_Atmosphere](https://www.researchgate.net/publication/311777904_Numerical_Estimation_of_the_Formation_Process_of_Anthropogenic_Precipitation_in_the_Atmosphere) (дата звернення 4.12.2022) (DOI: 10.1051/mateconf/20179101005).

Стаття надійшла до редакції 15.09.2022 і прийнята до друку після рецензування 30.11.2022

## REFERENCES

1. Bondar, O.I., Ulytskyi, O.A., & Ermakov, V.M. (2018). Report on the results of studying the ecological situation in Donetsk and Luhansk regions. Kyiv [in Ukrainian].
2. About the state of pollution of the natural environment in Kyiv and the Kyiv region according to the observations of the CSO named after B. Sreznevskiy. Retrieved from: <http://cgo-sreznevsky.kiev.ua> [in Ukrainian].
3. Yuesi Wang, Wenpeng Yu, Yuepeng Pan, & Dan Wu (2012). Acid neutralization of precipitation in Northern China. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(2), 204-211. <https://doi.org/10.1080/10473289.2011.640761>.
4. Xiao, J. (2016). Chemical composition and source identification of rainwater constituents at an urban site in Xi'an. *Environ Earth Sci*, 75(209). <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4997-z>.
5. Liuyi Zhang, Baoqing Qiao, Huanbo Wang, Mi Tian, Jian Cui, Chuan Fu, Yimin Huang, & Fumo Yang (2018). Chemical Characteristics of Precipitation in a Typical Urban Site of the Hinterland in Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Chemistry. Environmental Biogeochemistry of Elements and Emerging Contaminants*. <https://doi.org/10.1155/2018/2914313>.

6. Khalid A. Rasheed, Zaid A. Azeez, & Ali A. Al-Salhy (2016). Effects of Air Pollutants from Al-Dura Power plant in the Surrounding Area South Baghdad. *J. Int. Environmental Application & Science*, 11(2), 170-175.
7. Mirzaei, S., Hashemi, H., & Hoseini, M. (2018). Concentration and potential source identification of trace elements in wet atmospheric precipitation of Shiras, Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 16, 229-237. <https://doi.org/10.1007/s40201-018-0310-x>.
8. Voloshkina, O., Sipakov, R., Zhykova, O., & Bereznitska, J. (2018). A study of air pollution with formaldehyde along the highways in Kyiv city. *USEFUL*, 2, 1-7 [in Ukrainian].
9. Klimova, I., & Sipakov, R. (2019). Influence of meteorological factors on the secondary contamination of atmospheric air by formaldehyde (on example of city of Kyiv). *Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky, Kosice, (Slovakia)*, 7(2/2019), 75–86. <https://doi.org/10.32557/issn.2640-9631/2019-1>.
10. Rudakov, D.V. (2004). *Mathematical models in environmental protection: Study guide*. Donetsk: Dnipropetrovsk University Publishing House [in Ukrainian].
11. Methodological guidelines for forecasting meteorological conditions for the formation of air pollution levels in cities of Ukraine. Retrieved from: [https://meteo.gov.ua/files/content/docs/meteo\\_kerdoc/%D0%9A%D0%9452.9.4.01-09.pdf](https://meteo.gov.ua/files/content/docs/meteo_kerdoc/%D0%9A%D0%9452.9.4.01-09.pdf).
12. Gvozdnyakov, D.V., Gubin, V.E., Gromov, A.A., Tanishev, A.O., & Shvab, S.A. (2017). Numerical Estimation of the Formation Process of Anthropogenic Precipitation in the Atmosphere. Retrieved from: [https://www.researchgate.net/publication/311777904\\_Numerical\\_Estimation\\_of\\_the\\_Formation\\_Process\\_of\\_Anthropogenic\\_Precipitation\\_in\\_the\\_Atmosphere](https://www.researchgate.net/publication/311777904_Numerical_Estimation_of_the_Formation_Process_of_Anthropogenic_Precipitation_in_the_Atmosphere). <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179101005>.

*The article was received 15.09.2022 and was accepted after revision 30.11.2022*

**Волошкіна Олена Семенівна**

д.т.н., професор кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва і архітектури

**Адреса робоча:** 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітрофлотський, 31

**ORCID ID:** 0000-0002-3671-4449 **e-mail:** e.voloshki@gmail.com

**Гончаренко Артем Вадимович**

аспірант Київського національного університету будівництва і архітектури

**Адреса робоча:** 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітрофлотський, 31

**ORCID ID:** 0000-0001-5647-1360 **e-mail:** hosting.pat@gmail.com