

УДК 519.6:504.054

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280223.15.914

## ПРОГНОЗУВАННЯ РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У РАЗІ ЕКСТРЕМАЛЬНОЇ СИТУАЦІЇ НА АЕС

БІЛЯЄВ М. М.<sup>1</sup>, докт. техн. наук, проф.,  
БЕРЛОВ О. В.<sup>2\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
БІЛЯЄВА В. В.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
КОЗАЧИНА В. А.<sup>4</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
МАШИХІНА П. Б.<sup>5</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра гідравліки та водопостачання, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 247-16-01, e-mail: [berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua](mailto:berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

<sup>3</sup> Кафедра аерогідромеханіки та енергомасопереносу, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-98-22, e-mail: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

<sup>4</sup> Кафедра гідравліки та водопостачання, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

<sup>5</sup> Кафедра гідравліки та водопостачання, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: [gidro\\_eko@ukr.net](mailto:gidro_eko@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-3057-9204

**Анотація. Постановка проблеми.** Розглядається задача оцінювання рівня радіоактивного забруднення атмосферного повітря у разі виникнення екстремальної ситуації на території Запорізької АЕС, що спричинює миттєвий радіоактивний аерозольний викид. Здійснюється аналіз динаміки формування зон радіоактивного забруднення за напрямку вітру в бік м. Нікополь. Для оперативного розв'язання даної прогнозовної задачі потрібне створення багатофакторної чисельної моделі, що дозволяє оперативно аналізувати розміри та інтенсивність областей радіоактивного забруднення. **Мета роботи** – створення чисельної моделі та комп'ютерного коду для оперативного аналізу областей радіоактивного забруднення, що формуються за миттєвого викиду радіоактивних забруднювачів в атмосферу. **Методика.** Комп'ютерний код створений на базі чисельної моделі, що є різницеvim аналогом багатофакторного кінематичного рівняння масопереносу радіоактивної домішки в атмосферному повітрі. Рівняння масопереносу враховує поле швидкості вітру, атмосферну турбулентну дифузію, інтенсивність викиду радіоактивної речовини в повітря. Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу застосовується метод розщеплення з наступним використанням скінчено різницеvих схем. Обчислення значення величини об'ємної активності на кожному кроці розщеплення реалізується за явною формулою. **Наукова новизна.** Розроблено ефективну чисельну модель та здійснено її програмну реалізацію для оперативного аналізу формування областей радіоактивного забруднення в атмосфері за екстремальної ситуації на АЕС, що супроводжується емісією радіоактивних речовин. Модель враховує комплекс факторів, що впливають на процес поширення радіоактивної домішки в атмосфері. **Практична значущість.** Розроблено комп'ютерний код для розрахунку динаміки формування зон радіоактивного забруднення в атмосфері на базі розробленої чисельної моделі. Це дозволяє методом обчислювального експерименту аналізувати наслідки аварійних викидів на території АЕС. **Висновки.** Створено математичну модель для оперативного аналізу рівня радіоактивного забруднення атмосферного повітря внаслідок екстремальної ситуації на АЕС, що спричинює інтенсивний миттєвий викид радіоактивних речовин. Наведено результати обчислювального експерименту на базі розробленої чисельної моделі.

**Ключові слова:** АЕС; радіоактивне забруднення атмосфери; екстремальна ситуація; чисельне моделювання

## FORECASTING OF RADIOACTIVE CONTAMINATION OF ATMOSPHERIC AIR IN AN EXTREME SITUATION AT NPP

BILIAIEV M.M.<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,  
BERLOV O.V.<sup>2\*</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

BILIAIEVA V.V.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
KOZACHYNA V.A.<sup>4</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
MASHYKHINA P.B.<sup>5</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Hydraulics and Water Supply, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryan St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup> Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: [berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua](mailto:berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

<sup>3</sup> Department of Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharina Ave., Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 374-98-22, e-mail: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

<sup>4</sup> Department of Hydraulics and Water Supply, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryan St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

<sup>5</sup> Department of Hydraulics and Water Supply, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryan St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: [gidro\\_eko@ukr.net](mailto:gidro_eko@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-3057-9204

**Abstract. Problem statement.** The task of assessing the level of atmospheric air radioactive contamination in the case of an extreme situation on the territory of the Zaporizhzhya NPP, which leads to an instantaneous radioactive aerosol emission, is considered. An analysis of the dynamics for the zones' formation of radioactive contamination in the wind direction towards Nikopol is conducted. For the prompt solution of this of this forecast issue, the creation of a multifactorial numerical model is required, which allows for prompt analysis of the size and intensity of radioactive contamination areas. **The purpose of the article.** Creation of a numerical model and computer code for the operational analysis of radioactive contamination areas formed during the instantaneous release of radioactive pollutants into the atmosphere. **Methodology.** The computer code is based on a numerical model, which is a differential analogue of the multifactor kinematic equation of mass transfer of a radioactive impurity in atmospheric air. The mass transfer equation takes into account the wind speed field, atmospheric turbulent diffusion, and the intensity of radioactive substances emission into the air. For the numerical integration of the mass transfer equation, the splitting method is used followed by the use of finite-difference schemes. Determination of the volumetric activity value at each splitting step is implemented by an explicit formula. **Scientific novelty.** An effective numerical model was developed and its software implementation was conducted for operational analysis of the formation of radioactive contamination areas in the atmosphere during an extreme situation at a nuclear power plant, accompanied by the emission of radioactive substances. The model takes into account a complex of factors that affect the process of radioactive impurities spread in the atmosphere. **Practical value.** A computer code was developed for calculating the dynamics of the formation of radioactive contamination zones in the atmosphere based on the developed numerical model. This makes it possible to analyze the consequences of emergency emissions on the territory of the NPP using the computational experiment method. **Conclusions.** A mathematical model was developed for the operational analysis of radioactive contamination level of the atmospheric air due to an extreme situation at the nuclear power plant, which leads to an intense instantaneous release of radioactive substances. The results of a computational experiment based on the developed numerical model are presented.

**Keywords:** nuclear power plant; radioactive contamination of the atmosphere; extreme situation; numerical modeling

**Постановка проблеми.** Прогнозування рівня радіоактивного забруднення навколишнього середовища у випадку аварійної емісії радіоактивних речовин на АЕС – задача особливої важливості та відповідальності.

Такі емісії можуть мати місце в разі неправильної експлуатації агрегатів на станції, через помилки у проектуванні, відсутність належної кваліфікації персоналу. Але у випадку Запорізької атомної електростанції (ЗАЕС) (рис. 1), виникає особливо небезпечна ситуація – можливість аварійної емісії радіонуклідів внаслідок

артилерійського або ракетного обстрілу території АЕС.

Слід зазначити, що ця АЕС розташована поблизу районного центру – м. Нікополь (рис. 2). Тому у разі екстремальної ситуації на АЕС виникає ризик не тільки радіоактивного забруднення навколишнього середовища але й враження людей в місці та розташованих поблизу станції селищ.

Важливою проблемою стало оцінення рівня радіоактивного забруднення довкілля у випадку виникнення такої вкрай небезпечної ситуації на АЕС.

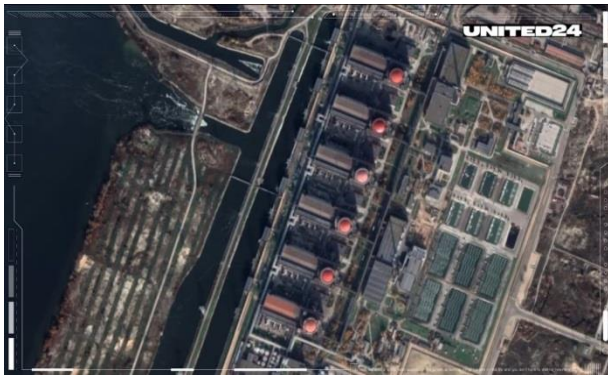


Рис. 1. Енергоблоки на території АЕС  
(Google Image, 2023)

**Аналіз останніх досліджень.** Проблема оцінювання наслідків імовірних аварійних викидів на АЕС привертає до себе значну увагу [7–11]. Увага приділяється оцінюванню інтенсивності та розмірів зон радіоактивного забруднення за різних імовірних сценаріїв розвитку екстремальних ситуацій. Зрозуміло, що аналіз можливих наслідків радіоактивного забруднення довкілля через екстремальні ситуації на АЕС можливо здійснити лише розрахунковим шляхом.

На практиці для розрахунку турбулентного переносу в атмосфері радіоактивних газоаерозольних викидів використовуються декілька напрямів. Перший – застосування аналітичного розв’язання рівняння турбулентного поширення неконсервативної домішки в атмосфері [1; 2]. Другий підхід – використання моделі Гаусса [2]. Зазначимо, що для прогнозування може використовуватися як «класична» модель Гаусса, так і моделі Гаусса, що спеціально розроблені для аналізу радіоактивного забруднення довкілля, наприклад, модель МАГАТЕ [2]. Третій підхід – це застосування методики ОНД-86 [1].

Усі ці підходи дають можливість швидко визначати розмір областей радіоактивного забруднення атмосфери. Але дані моделі мають низку недоліків, наприклад, не можуть урахувати зміну інтенсивності викиду з часом у разі екстремальної ситуації на об’єкті. Потужний інструмент прогнозування динаміки забруднення – використання чисельних

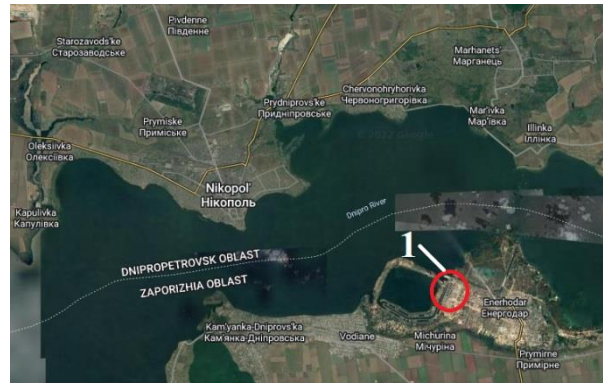


Рис. 2. Положення АЕС: 1 – енергоблоки ЗАЕС  
(Google Image, 2023)

моделей [3; 4; 6]. Але, в цілому, зараз має місце певний дефіцит математичних моделей для прогнозування наслідків екстремальних ситуацій на АЕС. Тому важливим напрямом стало створення більш потужних та фізично обґрунтованих математичних моделей, що дозволяють швидко здійснити оцінювання динаміки радіоактивного забруднення довкілля у випадку екстремальних ситуацій на АЕС.

**Мета статті** – створення чисельної моделі та комп’ютерного коду для оцінювання областей радіоактивного забруднення атмосфери, що формуються за екстремальної ситуації на ЗАЕС.

**Опис об’єкта.** АЕС розташована на р. Дніпро в Запорізькій області. На території ЗАЕС розташовано шість енергоблоків. Розглядається миттєвий викид радіонуклідів з другого енергоблока ЗАЕС. Ставиться задача оцінювання динаміки забруднення атмосферного повітря та визначення часу, коли забруднена хмара досягне м. Нікополь.

**Методика.** Процес поширення радіонуклідів в атмосфері, в разі аварійного викиду на АЕС, моделюється на базі осередненого по висоті переносу рівняння конвективної турбулентної дифузії. Розв’язується це рівняння чисельним шляхом. Для розв’язання задачі застосовується метод розщеплення моделювального рівняння на послідовність розв’язань рівнянь більш простої форми.

Для оцінювання радіоактивного забруднення атмосфери у випадку аварійного радіоактивного викиду  $Q$  [Ки] на АЕС використовується таке рівняння

поширення радіоактивних викидів в атмосферному повітрі [2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \lambda C + w_s C = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x - x_i, y - y_i), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $C$  – значення величини об’ємної активності, Ки/м<sup>3</sup>;  $u, v$  – компоненти вектора швидкості вітру в проекції на осі координат  $x$  і  $y$  відповідно, м/с;  $w_s$  – швидкість осадження радіоактивних частинок в атмосфері, осереднена по висоті переносу, 1/с;  $\lambda = 0,693/T_{1/2}$ , 1/с,  $T_{1/2}$  – час піврозпаду, роки;  $x_i, y_i$  – декартові координати  $i$ -го джерела радіоактивного викиду на АЕС, м;  $t$  – час, с;  $\mu_x, \mu_y$  – коефіцієнти атмосферної турбулентної дифузії, м<sup>2</sup>/с;  $\delta(x - x_i, y - y_i)$  – дельта-функція Дірака, за допомогою якої в моделі задається місце аварійного радіоактивного викиду на АЕС. У рівнянні (1) враховується, що інтенсивність радіоактивного викиду, осереднена по висоті переносу, може змінюватися з часом  $Q_i(t)$ .

Для проведення моделювання слід задати цю залежність  $Q(x, y) = f(t)$ . За такого підходу, в рамках однієї моделі можна моделювати різні типи аварійного викиду: миттєвий викид, напівнеперервний викид, тривалий викид тощо.

Граничні умови для рівняння (1) такі:

– на межі входу вітрового потоку в область дослідження:  $C = C|_{\text{entrance}}$  – відома фонові концентрація радіоактивного забруднення в атмосфері (для пілотних розрахунків приймається  $C = 0$ ).

– на межі виходу потоку вітру з області дослідження:  $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$ , де  $n$  – одиничний вектор зовнішньої нормалі до межі.

Початкова умова  $C|_{t=0} = 0$  або  $C|_{t=0} = C_0$ , де  $C_0$  – відома фонові концентрація. Значення коефіцієнтів атмосферної

турбулентної дифузії розраховується:  $\mu_y = k_0 \cdot u$ ,  $\mu_x = k_0 \cdot v$ , де  $u, v$  – компоненти вектора швидкості вітру в проекціях на координатні осі  $x$  та  $y$  відповідно,  $k_0 = 0,1$  [12]. Швидкість та напрям вітру є вхідними параметрами для задачі та задаються до даних метеорологічних спостережень.

Таким чином, для аналізу формування в атмосфері зон радіоактивного забруднення після аварії на АЕС потрібно розв’язати крайову задачу (1) з відповідними граничними та початковими умовами.

**Методика розв’язання.** Чисельне інтегрування рівняння (1) виконується за допомогою методу фізичного розщеплення. Для побудови різницевої схеми здійснювалося таке фізичне розщеплення моделювального рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \lambda C + w_s C = \\ = \sum_{i=1}^n Q_{Si}(t) \delta(x - x_i)(y - y_i). \end{aligned} \quad (2)$$

Перше рівняння із цієї системи – це рівняння конвективного переносу радіоактивної домішки, друге – рівняння дифузії, третє – рівняння, що показує зміну концентрації домішки внаслідок дії джерела емісії, а також внаслідок розпаду домішки та її гравітаційного осадження в атмосфері.

Для чисельного інтегрування використовуються такі залежності [3; 6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial uC}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}, \\ \frac{\partial vC}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}, \\ u^+ &= \frac{u + |u|}{2}, u^- = \frac{u - |u|}{2}, \\ v^+ &= \frac{v + |v|}{2}, v^- = \frac{v - |v|}{2}, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

Схема розщеплення для рівняння конвективного переносу радіоактивної домішки записується так:

– на першому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^k - C_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k + L_y^+ C^k = 0;$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} = 0.$$

Невідоме значення  $C$  у кожному рівнянні обчислюється за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного інтегрування рівняння дифузії використовується двоетапна різницева схема розщеплення, яка має вигляд [5]:

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[ \mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[ \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Для чисельного інтегрування третього рівняння з системи (2) застосовується метод Ейлера [5].

Здійснено програмну реалізацію розробленої чисельної моделі. Створено код «NuST» для експрес-аналізу динаміки формування областей радіоактивного забруднення атмосферного повітря в разі аварійної емісії радіонуклідів на АЕС.

**Результати.** На базі розробленої чисельної моделі здійснено розрахунок зон радіоактивного забруднення атмосферного повітря у випадку викиду на території Запорізької АЕС в кількості  $Q = 3\,000$  Ки. Розглядався сценарій, коли вітер дув у напрямку м. Нікополь, швидкість вітру 8 м/с.

Далі на рисунках показано, як формується область радіоактивного забруднення атмосферного повітря для різних моментів часу після емісії радіоактивного аерозольного викиду на АЕС.

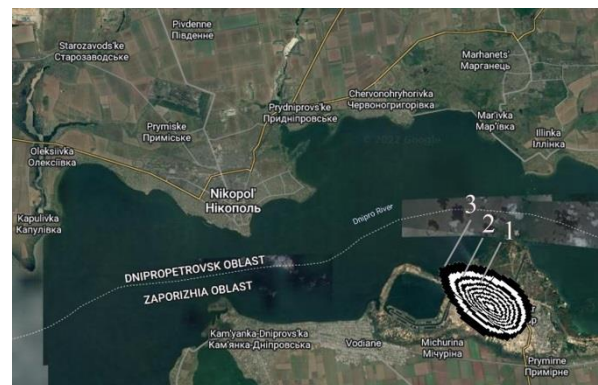


Рис. 3. Ізолінії об'ємної концентрації радіоактивності,  $t = 190$  с: 1 –  $C = 16$  Ки/м³; 2 –  $C = 38$  Ки/м³; 3 –  $C = 60$  Ки/м³

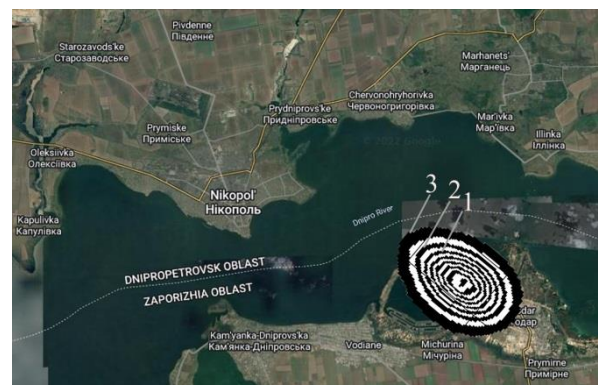


Рис. 4. Ізолінії об'ємної концентрації радіоактивності,  $t = 390$  с: 1 –  $C = 13$  Ки/м³; 2 –  $C = 30$  Ки/м³; 3 –  $C = 47$  Ки/м³





Рис. 5. Ізолінії об'ємної концентрації радіоактивності,  $t = 1\ 290\ c$ : 1 –  $C = 8\ Ku/m^3$ ; 2 –  $C = 12\ Ku/m^3$ ; 3 –  $C = 19\ Ku/m^3$

Як можна бачити з наведених рисунків, зона радіоактивного забруднення збільшується з часом у розмірах та має вигляд «плями», що рухається в напрямку вітру. Розрахунок показав, що приблизно за 40 хв. почнеться радіоактивне забруднення повітря в м. Нікополь.

Зазначимо, що час розрахунку складає 2 с.

**Наукова новизна та практична цінність.** Запропоновано чисельну модель та комп'ютерну програму, що дозволяє прогнозувати динаміку радіоактивного забруднення атмосферного повітря у випадку аварійної емісії радіоактивного аерозольного викиду на АЕС. Математична

модель дозволяє врахувати низку факторів, що впливають на формування областей радіоактивного забруднення атмосферного повітря, а саме: швидкість та напрям вітру, стан атмосфери, режим емісії радіоактивних викидів на АЕС, піврозпад радіоактивної домішки.

## Висновки

1. За допомогою розробленої чисельної моделі та створеного комп'ютерного коду можна заздалегідь оцінювати масштаб можливого радіоактивного забруднення довкілля у випадку аварії на АЕС.

2. Розроблена математична модель дозволяє на базі стандартної вхідної інформації отримати дані щодо визначення розмірів та інтенсивності областей радіоактивного забруднення, які формуються в атмосфері з часом після аварії на АЕС.

3. Результати обчислювального експерименту, отримані за допомогою розробленої математичної моделі, показали, що у випадку аварійного радіоактивного викиду на Запорізькій АЕС створюється загроза швидкого та інтенсивного радіоактивного забруднення повітря в м. Нікополь.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. 273 с.
2. Бруцкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов. Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. 443 с.
3. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. CFD моделювання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на робочих містах : монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. 268 с.
4. Пшинько А. Н., Беляев Н. Н., Машихина П. Б. Моделирование загрязнения атмосферы при техногенных авариях. Днепропетровск : Нова ідеологія, 2011. 166 с.
5. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.
6. 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.
7. Bashar M. Al-Zghoul, Wa'il Y. Abu-El-Sha'r. New Gaussian Plume Equation for the Impacts of Dust Storms on Radionuclide Transport. *Aerosol and Air Quality Research*. Vol. 20. 2020. Pp. 119–127.
8. Kandil Nema, Tawfik Faten. Evaluation of Radiation Doses for Hypothetical Accident Scenarios of Egyptian Second Research Reactor. *International Journal of Environmental Protection and Policy*. Vol. 9 (3). 2021. Pp. 59–68.
9. Kovalets I. V., Khalchenkov O. V., Maistrenko S. Ya., Dontsov-Zagreba T. O., Khurtsilava K. V., Sinkevich R. O., Udovenko O. I. Simulation of secondary radioactive air pollution in Ukraine due to the wind lift of radionuclides. *Mathematical Machines and Systems*. Vol. 1. 2021. Pp. 96–107.
10. Obrador E., Salvador-Palmer R., Villaescusa J. I., Gallego E., Pellicer B., Estrela J. M., Montoro A. Nuclear and Radiological Emergencies : Biological Effects. Countermeasures and Biodosimetry MDPI. *Antioxidants*. № 11 (6). 2022. DOI: 10.3390/antiox11061098.
11. Xoubi N. Assessment of environmental radioactive surface contamination from a hypothetical nuclear research reactor accident. *Heliyon*. № 6 (9). 2020. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04968.

## REFERENCES

1. Berlyand M.E. *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery* [Forecasting and regulation of atmospheric pollution]. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1985, 273 p. (in Russian).
2. Bruyaczkyj E.V. *Teoriya atmosfernoj diffuzii radioaktivnyh vubrosov* [Theory of atmospheric diffusion of radioactive emissions]. Kyiv : Institute of Hydromechanics NAS of Ukraine, 2000, 443 p. (in Russian).
3. Biliaiev M.M., Biliaieva V.V., Berlov O.V. and Kozachyna V.A. *CFD modelyuvannya v analizi efektyvnosti system zaxystu dovkillya ta pracivnykiv na robochyx miscyax : monografiya* [CFD modeling in the analysis of the effectiveness of the environmental protection system and workers at workplaces : monograph]. Dnipro : Zhurfond, 2022. (in Ukrainian).
4. Pshinko A.N., Belyayev N.N. and Mashihina P.B. *Modelirovanie zagryazneniya atmosfery pri tekhnogennyh avariayah* [Modeling of atmospheric pollution during technogenic accidents]. Dnipropetrovsk : Nova ideologiya Publ., 2011, 166 p. (in Russian).
5. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow : Nauka Publ., 1983, 616 p. (in Russian).
6. Zgurovskii M.Z., Skopetskii V.V., Khrutch V.K. and Biliaiev M.M. *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushey srede* [Numerical simulation of the spread of pollution in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).
7. Bashar M. Al-Zghoul and Wa'il Y. Abu-El-Sha'r. New Gaussian Plume Equation for the Impacts of Dust Storms on Radionuclide Transport. *Aerosol and Air Quality Research*. Vol. 20, 2020, pp. 119–127.
8. Kandil Nema and Tawfik Faten. Evaluation of Radiation Doses for Hypothetical Accident Scenarios of Egyptian Second Research Reactor. *International Journal of Environmental Protection and Policy*. Vol. 9 (3), 2021, pp. 59–68.
9. Kovalets I.V., Khalchenkov O.V., Maistrenko S.Ya., Dontsov-Zagreba T.O., Khurtsilava K.V., Sinkevich R.O. and Udovenko O.I. Simulation of secondary radioactive air pollution in Ukraine due to the wind lift of radionuclides. *Mathematical Machines and Systems*. Vol. 1, 2021, pp. 96–107.
10. Obrador E., Salvador-Palmer R., Villaescusa J.I., Gallego E., Pellicer B., Estrela J.M. and Montoro A. Nuclear and Radiological Emergencies : Biological Effects, Countermeasures and Biodosimetry MDPI. *Antioxidants*. No. 11 (6), 2022. DOI: 10.3390/antiox11061098.
11. Xoubi N. Assessment of environmental radioactive surface contamination from a hypothetical nuclear research reactor accident. *Heliyon*. No. 6 (9), 2020. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04968.

Надійшла до редакції: 12.01.2023.