

# Розробка спеціального програмного математичного забезпечення управління вентиляційними установками нового безпечного конфайнменту ЧАЕС

- **Письменний Євген Миколайович**, д-р техн. наук, проф.  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6403-6596>
- **Гаврилко Євген Володимирович**, д-р техн. наук, проф.  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9437-3964>
- **Круковський Павло Григорович**, д-р техн. наук, проф.  
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6726-0550>
- **Старовіт Іван Сергійович**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6511-4610>
- **Дядюшко Євгеній Валентинович**  
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2601-4633>

У статті досліджено процеси переміщення повітряних мас з радіоактивними аерозолями як всередині, так і за межі нового безпечного конфайнменту об'єкта «Укриття» Чорнобильської атомної електростанції.

Новий безпечний конфайнмент є відносно герметичною спорудою, однак унаслідок великого розміру об'єкта він має нещільності в місцях з'єднань конструкцій, загальна площа яких може сягати 15 м<sup>2</sup>. На процес обігу та витоків повітря суттєво впливають гідрометеорологічні умови, особливо напрям та швидкість вітру, температура і вологість повітря.

Процеси переміщення повітряних мас з радіоактивними аерозолями описуються складною гідравлічною моделлю об'єкта, котра залежить як від зовнішніх умов, так і від роботи внутрішнього устаткування.

До устаткування, що забезпечує управління переміщенням повітряних мас в новому безпечному конфайнменті належать вентиляційні установки. Одним із завдань цих установок є контроль процесів переміщення великих об'ємів повітря всередині, уникнення та мінімізація викидів радіоактивних аерозолів через нещільності за межі нового безпечного конфайнменту.

У результаті аналізу інформації, отриманої від установи, котра займається експлуатацією нового безпечного конфайнменту об'єкта «Укриття», зроблено висновки, що процес прийняття рішень щодо оптимального управління вентиляційним обладнанням можливий лише за умови неперервної обробки

різноманітних даних, котрі змінюються впродовж усього строку експлуатації нового безпечного конфайнменту та внесення постійних змін до параметрів використаних моделей, що є складним технічним завданням.

Для вирішення цього технічного завдання необхідно розв'язати наукову задачу, яка полягає у необхідності розробки спеціального програмного математичного забезпечення на основі застосування методів машинного навчання, а саме нейронних мереж, яке б було спроможне врахувати багатофакторні показники та знайти оптимальні алгоритми управління вентиляційними установками нового безпечного конфайнменту. Метою статті є наведення способів оптимізації роботи вентиляційних установок для забезпечення мінімуму викидів радіоактивних аерозолів за межі нового безпечного конфайнменту в режимі реального часу, при обмеженнях на вартість електроенергії.

У статті на основі аналізованих факторів, що впливають на неконтрольовані викиди повітря з радіоактивними аерозолями, запропоновано спеціальне програмне математичне забезпечення, яке дозволило виконати завдання та досягти мети дослідження. У його складі застосована нейронна мережа, навчання котрої проведено на основі розрахованих з експлуатаційних даних показників обігу повітря всередині та ззовні нового безпечного конфайнменту.

Ключові слова: машинне навчання, нейронні мережі, радіоактивні аерозолі, новий безпечний конфайнмент, вентиляційні установки, Чорнобильська АЕС.

© Письменний Є. М., Гаврилко Є. В., Круковський П. Г., Старовіт І. С., Дядюшко Є. В., 2022

## Вступ

Законодавство України встановлює пріоритет безпеки людини та навколишнього природного середовища, регулює діяльність, пов'язану з використанням ядерних об'єктів, радіоактивних відходів (РАВ), зобов'язує забезпечувати оптимальні заходи радіаційної безпеки.

Тому, з метою захисту населення та території навколишнього природного середовища в зоні відчуження від некерованих викидів радіоактивних аерозолей (РА) під час експлуатації та виконання в майбутньому робіт з вилучення РАВ із зруйнованого 4 енергоблока та демонтажу нестабільних конструкції зруйнованого об'єкта «Укриття» Чорнобильської АЕС компанією NOVARKA та спіль-

ним підприємством французьких компаній VINCI Construction Grands projets і bouygues розроблено, збудовано і введено в експлуатацію новий безпечний конфайнмент (НБК), сучасний вигляд якого наведено на фото (рисунок 1).

Наголосимо, що НБК (рисунок 2) є надвеликою інженерною спорудою з відповідним інженерним обладнанням і устаткуванням, яка має впродовж 100 років забезпечити зберігання радіоактивних матеріалів Чорнобильської АЕС. Для забезпечення радіаційної безпеки зокрема використовуються потужні вентиляційні установки (ВУ), які забезпечують ефективне керування гідравлічними потоками повітря.

Їх поділено на 3 основних типи: ті, що забезпечують подання повітря ззовні до основного об'єму НБК (далі – ВУ типу А); до кільцевого



Рисунок 1 – Новий безпечний конфайнмент об'єкта «Укриття» Чорнобильської АЕС

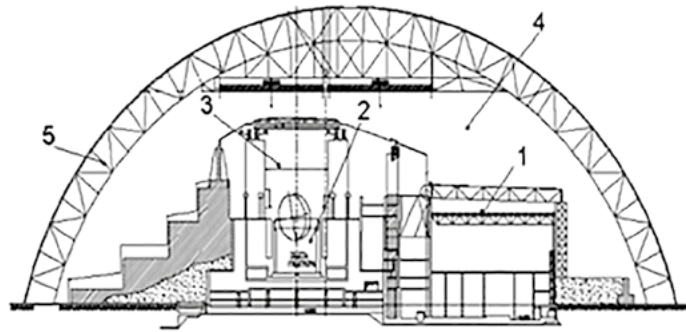


Рисунок 2 – Схема НБК: 1 – турбінна зала, 2 – зруйнований реактор, 3 – центральна зала, 4 – основний об'єм та 5 – кільцевий простір НБК

простору НБК (далі – ВУ типу Б); з НБК назовні через відповідні фільтруючі-поглинаючі системи, зокрема і для контролю за розповсюдженням РА об'єкта «Укриття» (далі – ВУ типу В) [1].

Одним із завдань ВУ є запобігання витіканню повітря назовні, минаючи відповідні фільтруючо-поглинаючі системи в умовах невідповідного потрапляння зовнішнього повітря (внаслідок вітру різної сили).

На такі потоки впливає велика кількість показників, що потребують математичного узагальнення і прийняття системою керування відповідних рішень. Персонал діє відповідно до Технологічного регламенту, в якому систематизовано режими роботи ВУ залежно від різних факторів. Однак, ця систематизація має спрощений характер, відповідно необхідною задачею є надання рекомендацій, які дозволять «удосконалити» цей регламент.

Для забезпечення радіаційної безпеки на етапах експлуатації та під час вилучення РАВ, елементів конструкцій у процесі утилізації об'єкта «Укриття» Чорнобильської АЕС виникає наукова задача, яка може бути розв'язана розробкою відповідного спеціального програмного математичного забезпечення (СПМЗ).

Згадане СПМЗ є елементом системи підтримки прийняття рішень більш високого рівня на основі використання нейро-нечітких систем, розробка якої триває.

### Аналіз літературних даних

У роботі [1] описано гідравлічну модель НБК, яка за допомогою рішення системи рівнянь Бернуллі за різних граничних умов (напрямок вітру та витрати ВУ) дозволяє визначити орієнтовні площі протікань у різних місцях конструкції та величини неконтрольованих витрат. Ці протікання можуть суттєво відрізнитись від протікань на основі критеріїв допустимих нещільностей. Ця модель додатково верифікована [2], описано її застосування для контролю роботи ВУ з кроком в 1 годину методом послідовного підбору мінімально допустимих

витрат. Основним недоліком використання цієї моделі є її висока ресурсозатратність, що неприйнятно у разі переходу на крок регулювання розміром у декілька хвилин. Проблема полягає в тому, що складність цієї моделі й відповідно недостатня швидкість розрахунків призведе до перевищення максимально допустимого проміжку часу, необхідного для прийняття рішення щодо регулювання.

У цій статті пропонується оптимізація роботи ВУ НБК поєднанням гідравлічної моделі (а саме отриманих з неї площ неконтрольованих протікань) з нейронною мережею (НМ), що дозволяє визначити тиски всередині НБК.

Використання НМ в аналогічних задачах [3], [4], [5] показало їх високу точність, можливість коректування параметрів моделі за допомогою додатково «навчання» та низьку ресурсозатратність.

### Постановка завдань дослідження та мета статті

Розробити СПМЗ на основі застосування методів машинного навчання НМ, яке б було спроможне врахувати багатофакторні показники та запропонувати алгоритми управління ВУ НБК.

Метою є оптимізація роботи ВУ для забезпечення мінімуму викидів РА за межі НБК при обмеженнях на вартість електроенергії в режимі реального часу.

### Виклад основного матеріалу

З огляду на складність системи, отримати найкращий результат можливо комбінуванням використання методів машинного навчання та фізичних моделей.

Розроблене СПМЗ управління вентиляційними установками НБК об'єкта «Укриття» Чорнобильської АЕС містить такі елементи:

1. **Підготовка даних.** Реальні експлуатаційні дані, що містять інформацію щодо напрямів кутів сили і напору вітру, витрат ВУ типу А, Б, В ( $G_A^i, G_B^i, G_C^i$ ) і розрахункові значення тиску  $p_O^i$  всередині Основ-

ного об'єму (ОО) НБК у вузлі 1 (рисунок 3) та тиску  $p_{кп}^i$  в Кільцевому просторі (КП) у вузлі 2, поперечно знаходяться за допомогою гідравлічної моделі [1], [2], [5], обробляються та вносяться в базу даних. Отримані в результаті розрахунків значення тиску приймаються однаковими за цими об'ємами.

Напрямок та сила вітру за допомогою поперечно змодельованого обтікання НБК [3], [4] переводяться в розподіли тиску в 5 характерних точках, а саме в зонах контролю:

- західного зазору ОО  $p_{33}^i$ ;
- східного зазору ОО  $p_{с3}^i$ ;
- західної частини КП  $p_3^i$ ;
- східної частини КП  $p_c^i$ ;
- циліндричної частини КП  $p_{ц}^i$ .

У результаті в кожен момент часу маємо 3 експлуатаційні витрати  $\{G_A^i, G_B^i, G_C^i\}$ , одночасно 5 значень тисків  $\{p_{33}^i, p_{с3}^i, p_3^i, p_c^i, p_{ц}^i\}$  навколо (поза) НБК та 2 результуючих значення тиску всередині НБК  $\{p_O^i, p_{кп}^i\}$ .

Кінцевим етапом підготовки даних є їх лінійна нормалізація:

$$z = \frac{x - \bar{X}}{S_x}, \quad (1)$$

де  $\bar{X}$  – середнє значення вибірки;  
 $S_x$  – стандартне відхилення вибірки.

**2. Навчання НМ.** Отримані дані розмірністю  $A_{n \times k}$ , де  $n$  – кількість вимірів (точки в різний момент часу), а  $k$  – розмірність вектора експлуатаційних даних у конкретний момент (у цьому випадку таких значень десять), поділяються на вхідну матрицю  $B_{n \times (k-2)}$  та два вихідних вектора  $C_{n \times 2}$  розподілів тиску в ОО та КП.

Запропонована НМ складається з 8 вхідних та 8 прихованих нейронів (рисунок 4), як передавальна функція використовується функція ReLU (зрізаний лінійний вузол), а як алгоритм оптимізації функції середньоквадратичної похибки в запропонованому СПМЗ вперше для таких моделей застосовано адаптивний метод Adam [4].

Для кожного вихідного параметра (тиску в ОО та тиску в КП) використовуються дві окремі НМ, які навчаються на половині вибірки

$(N \times K - 2)$  та відповідно перевіряються на відкладеній вибірці.

Як результат навчених НМ отримуємо можливість «передбачати» тиски всередині НБК залежно від граничних умов (характеристик вітру) та роботи ВУ.

$$p_O^i = f\{G_A^i, G_B^i, G_C^i, p_{33}^i, p_{с3}^i, p_3^i, p_c^i, p_{ц}^i\}, \quad (2)$$

$$p_{кп}^i = f\{G_A^i, G_B^i, G_C^i, p_{33}^i, p_{с3}^i, p_3^i, p_c^i, p_{ц}^i\}. \quad (3)$$

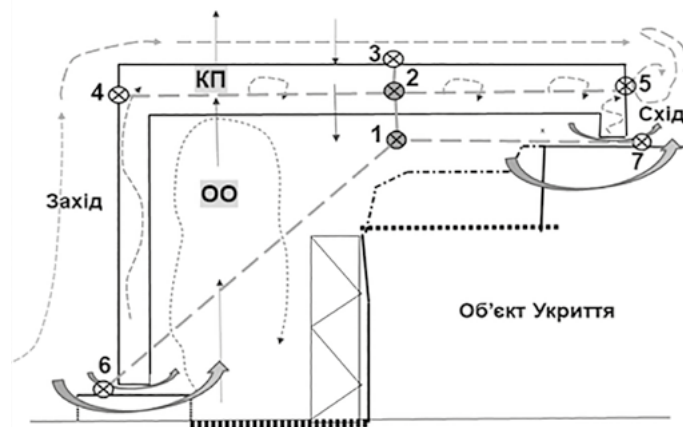


Рисунок 3 – Модель умовної гідравлічної схеми перетікання повітряних мас в та за НБК

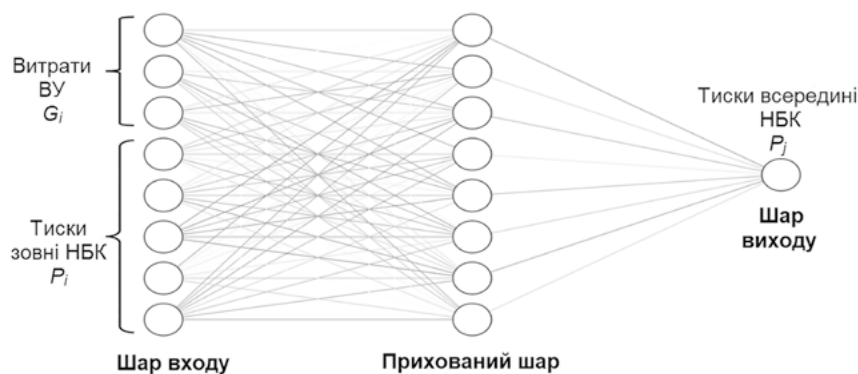


Рисунок 4 – Схема нейронної мережі для розрахунку тисків всередині НБК

3. **Оптимізація роботи ВУ.** У кожен момент часу  $i$ , для відомих граничних умов (зовнішніх тисків  $\{p_{гв}^i\}$ ) виконується знаходження оптимальних витрат ВУ типу В  $G_{в\_опт}^i$  (ВУ типу А та Б працюють у номінальному та мінімальному режимі відповідно), таких що витрати з ОО до ОС та з ОО до КП мінімальні  $G_{out}^i = (G_{OO\_кп}^i + G_{OO\_ос}^i)$ :

$$G_{в\_опт}^i \rightarrow 0, \text{ при } G_{out}^i \rightarrow 0. \quad (4)$$

Знаходження оптимальних витрат ВУ типу В  $G_{в\_опт}^i$  з проміжку  $(0, G_{max})$ , де  $G_{max}$  – максимально фізично можлива витрата, а весь проміжок дискретизовано до  $d$  можливих значень, полягає в рівномірному проході вказаного проміжку та обчисленні тисків в ОО та КП за допомогою НМ, а потім й об'ємних витоків з ОО за допомогою рівняння Бернуллі та площ протікань ( $2,4 \text{ м}^2$  для західних і  $4,5 \text{ м}^2$  для східних протікань) за рівняннями:

$$G = R \cdot \Delta P, \quad (5)$$

де  $G$  – витрата,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\Delta P$  – перепад статичних тисків;

$R$  – гідравлічна провідність,  $\text{м}^3/(\text{Па}\cdot\text{с})$ .

Водночас гідравлічну провідність можливо розрахувати за виразом [1]:

$$R = 0,6 \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho \cdot |\Delta P|}}, \quad (6)$$

де  $0,6$  – коефіцієнт витрати;

$S$  – умовна площа протікання між вибраними частинами НБК і оточуючим середовищем;

$\rho$  – густина повітря.

### Інтерпретація результатів та їх апробація

Описана методика перевірялась на вибірці розміром у 6536 годин (9 місяців роботи), відповідно НМ навчалась та перевірялась на вибірках розміром у 3268 значень.

На рисунку 5 показані абсолютні похибки прогнозування тисків в ОО та КП, які визначались порівнянням розрахункових та експлуатаційних значень тисків в ОО та КП. Як видно з рисунка 5, похибка прогнозування тисків в ОО та КП мають відносно мале значення (значення середньої абсолютної похибки склали  $0,27 \text{ Па}$  та  $0,34 \text{ Па}$  відповідно для вітрів різних напрямків і швидкостей), отже НМ дозволяє обчислювати внутрішні тиски в НБК з високою точністю.

Оптимізація роботи ВУ типу В проводилась для всієї вибірки, результати зображено на рисунках 6-7. На рисунку 6 наведено розрахункове значення витоків повітря з основного об'єму НБК через нещільності, без оптимізації та з оптимізацією. Оптимізований режим роботи ВУ типу В наведено на рисунку 7.

Результати, отримані завдяки створеному СПМЗ оптимізації роботи ВУ типу В, зведено в таблицю 1. Зменшення витоків основного об'єму в 30 разів було досягнуто завдяки відключенню ВУ, що нагнітає повітря в ОО, і оптимальному керуванню ВУ, що видаляє повітря із ОО.

Зменшення розрахункових значень витоків через нещільності основного об'єму в разі проведення демонтажу нестабільних конструкцій дозволяє зменшити неконтрольовані викиди повітря з РА поза межі НБК в еквіваленті  $5,74 \text{ Гбк}$  (за середньомісячної об'ємної активності нуклідів джерел  $\beta$ -випромінювання  $210 \text{ Бк}/\text{м}^3$ ) [6].

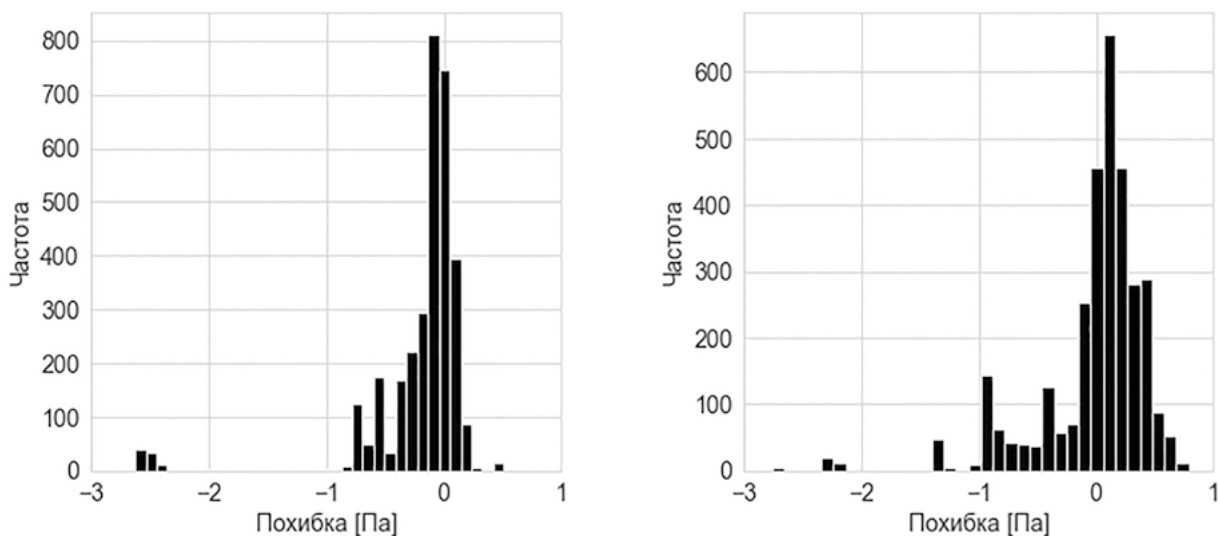


Рисунок 5 – Розподіл похибки прогнозованих тисків в ОО (зліва) та КП (справа)

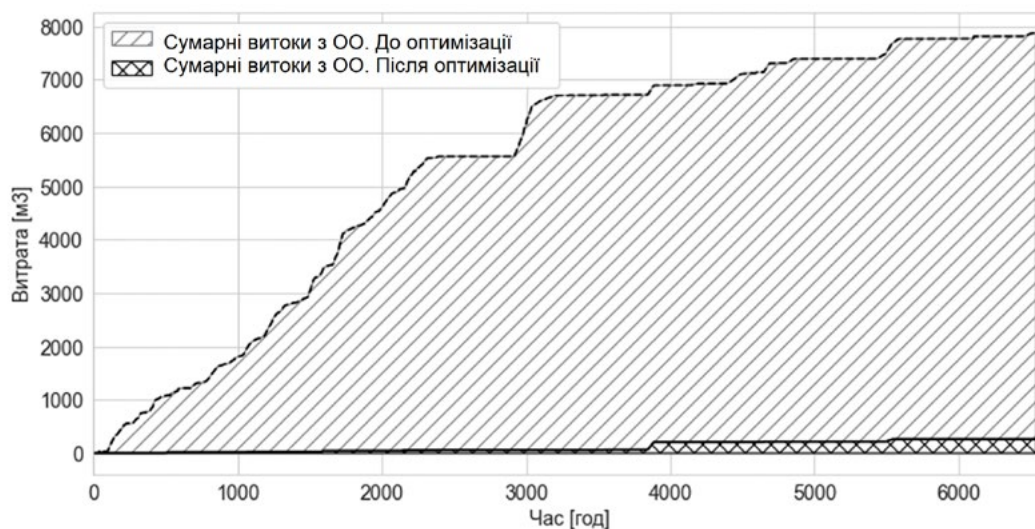


Рисунок 6 – Порівняння сумарних витрат з ОО за дослідний час: до та після оптимізації

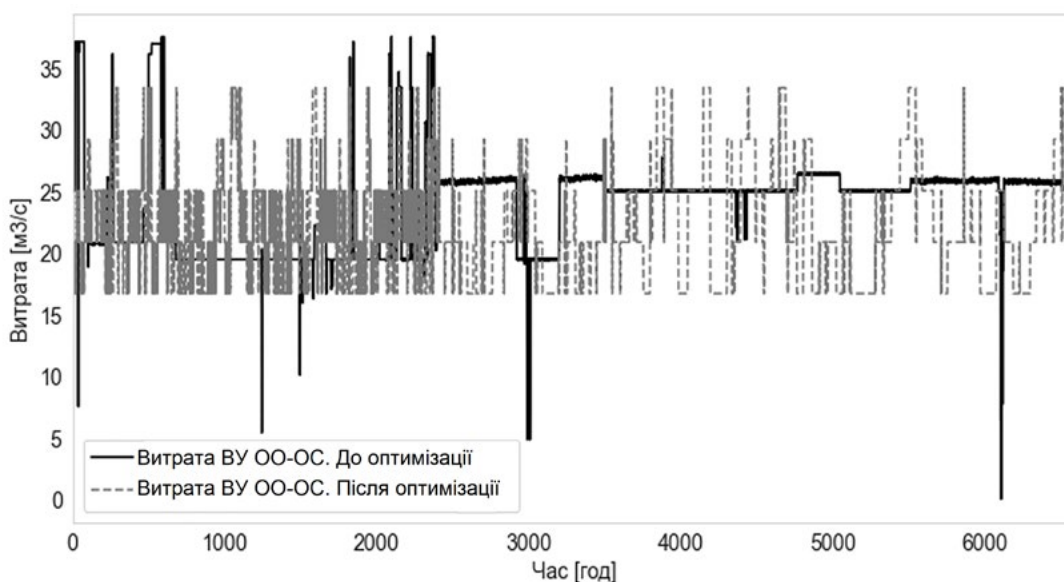


Рисунок 7 – Порівняння витрат ВУ типу В до та після оптимізації

Таблиця 1 – Результати оптимізації

Стан	Середня витрата ВУ типу В (м³/с)	Середні витоків з ОО до навколишнього середовища (м³/с)	Сумарні витоків з ОО до навколишнього середовища за T=6536 годин (млн м³)	Викиди РА в оточуюче середовище за T=6536 годин (ГБк) під час проведення робіт
Експлуатаційні показники до оптимізації	23,9	1,205	28,3	5,94
Розрахункові данні після проведення оптимізації	22,46	0,04	0,94	0,197

Отже, в статті описано СПМЗ, розроблене на основі методів машинного навчання з використанням НМ, яке спроможне врахувати багатофакторні показники та запропонувати алгоритми ефективного управління ВУ НБК. За допомогою цього СПМЗ забезпечено мінімізацію викидів РА за межі НБК при обмеженнях на вартість електроенергії в режимі реального часу.

## Висновки

1. Проаналізовано фактори, з урахуванням роботи вентиляційних установок, які впливають на неконтрольовані викиди зараженого РА повітря з НБК об'єкта «Укриття» Чорнобильської АЕС.

2. Описано СПМЗ, розроблене на основі застосування методів машинного навчання, а саме НМ, яке спроможне врахувати багатофакторні показники обігу повітря в та поза НБК і оптимізувати роботу ВУ.

3. Установлено, що теоретичні значення середніх абсолютних похибок прогнозованих тисків в ОО та КП за заздалегідь відомих точних вихідних даних про характеристики НБК склали 0,27 Па та 0,34 Па відповідно, отже НМ дозволяє обчислювати внутрішні тиски з високою точністю.

4. Запропоноване СПМЗ дозволяє зменшити на 11 % витрати електроенергії, що йдуть на роботу ВУ НБК.

5. Запропоноване СПМЗ дозволяє зменшити викиди РА за межі НБК до 30 разів.

6. Для більш ефективного застосування запропонованого методу планується додаткове вивчення впливу невизначеностей вихідних даних на результати (фактичні нещільності, розподіл тиску навколо НБК за різних погодних умов тощо).

## Список використаної літератури

1. Круковский П. Г., Метель М. А., Скляренко Д. И., Краснов В. А., Сулимов В. П., Бороздин В. Г., Поклонский В. Г. Новый Безопасный Конфайнмент Чернобыльской АЭС (расчетно-экспериментальный анализ при проектировании и эксплуатации): монография / Под ред. П. Г. Круковского, В. А. Краснова, В. П. Сулимова. Киев: ООО «Франко Пак», 2019. 300 с.

2. Круковский П. Г., Скляренко Д. І., Дядюшко Є. В., Кондратенко С. О. Аналіз неорганізованого повітрообміну Нового Безпечного Конфайнменту з оточуючим середовищем (попередні результати моделювання за експлуатаційними даними). Проблеми зняття з експлуатації

об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища : зб. тез V міжнародної конференції INUDECO, 27-29 квітня 2020 р. Славутич, С. 109-117.

3. Khlaponin Y. I., Khoroshko V. O., Khokhlacheva Y. E., Gavrilko E. V. Parametric Monitoring of Computing Processes in Information and Computing Systems. *CEUR Workshop Proceedings*, (2017). pp. 125–132.

4. Каширина И. Л., Демченко М. В. Исследование и сравнительный анализ методов оптимизации, используемых при обучении нейронных сетей. *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. (2018). № 4, С. 123-132.

5. Krukovskyi P. G., Diadiushko Y. V., Skliarenko D. J., Starovit I. S. Unorganized air releases with radioactive aerosols from the New Safe Confinement of ChNPP into the environment. *Problems of atomic science and technology*, (2021). Vol. 6, pp. 181–186. doi: 10.46813/2021-136-181.

6. Батій В. Г., Сізов А. О., Федорченко Д. В., Холодюк А. О. Динаміка зміни концентрації радіоактивних аерозолів під час вилучення паливовміщуючих матеріалів з об'єкта «Укриття». *Ядерна та радіаційна безпека*. 2015. № 4(68), С. 41-44. doi: 10.32918/nrs.2015.4(68).08.

## References

1. Krukovsky, P. G., Metel, M. A., & Sklyarenko, D. I. (2019). New Safe Confinement of the Chornobyl NPP (calculation and experimental analysis in design and operation). Kyiv.

2. Krukovsky, P. G., Sklyarenko, D. J., Diadiushko, Y. V., & Kondratenko, S. O. (2020, April). Analysis of unorganized air exchange of the New Safe Confinement with the environment (preliminary results of modeling according to operational data). *Problems of Decommissioning of Nuclear Energy Facilities and Restoration of the Environment*, 109–117.

3. Khlaponin, Y. I., Khoroshko, V. O., Khokhlacheva, Y. E., & Gavrilko, E. V. (2017). Parametric Monitoring of Computing Processes in Information and Computing Systems. *CEUR Workshop Proceedings*, 125–132.

4. Kashirina, I. L., & Demchenko, M. V. (2018). Research and comparative analysis of optimization methods used in training neural networks. *Bulletin of VSU. Series: System Analysis and Information Technology*, (4), 123-132.

5. Krukovskyi, P. G., Diadiushko, Y. V., Skliarenko, D. J., & Starovit, I. S. (2021). Unorganized air releases with radioactive aerosols from the New Safe Confinement of ChNPP into the environment. *Problems of atomic science and technology*, 6, 181–186. doi: 10.46813/2021-136-181

6. Batiy, V. G., Sizov, A. O., Fedorchenko, D. V., & Kholodyuk, A. O. (2015). Dynamics of Changes in Concentration of Radioactive Aerosols during Retrieval of Fuel-Containing Materials from the Shelter. *Nuclear and Radiation Safety*, 4, 41–44. doi: 10.32918/nrs.2015.4(68).08.

## Development of Mathematical Software for Control of Ventilation Equipment in the New Safe Confinement

**Y. Pysmenny<sup>1</sup>, Y. Havrylko<sup>1</sup>, P. Krukovsky<sup>2</sup>, I. Starovit<sup>1</sup>, Y. Diadiushko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The processes of air masses movement with radioactive aerosols (RA) both inside and outside the Shelter's New Safe Confinement (NSC) of the Chernobyl Nuclear Power Plant are studied.

The NSC is a relatively airtight structure but, because of large sizes, has leaks at the joints of structures, the total area of which can reach 15 m<sup>2</sup>. The process of air circulation and leakage is significantly influenced by hydrometeorological conditions, especially wind direction and speed, temperature, and humidity. The processes of RA mass transfer are described by a complex hydraulic model of the facility, which depends on both external conditions and the operation mode of internal equipment.

The equipment that provides control of the air masses movement in the NSC includes ventilation systems (VS). Their main purpose is to control the movement of large volumes of air inside and to avoid and minimize unfiltered RA emissions outside the NSC.

Analysis of the information received from the institution operating the NSC allowed the conclusion that the decision-making process for optimal management of ventilation equipment was possible only with continuous processing of various data that change throughout the NSC and with constant changes made to the parameters used, which is a complex technical problem.

With the aim of solving such a complex technical problem, it is necessary to solve a scientific problem, which leads to the development of mathematical software based on machine learning methods, especially neural networks, which would be able to take into account multifactor indicators and find the optimal control algorithms. The aim of the work is to optimize the operation of VS to ensure minimum RA emissions outside the NSC with restrictions on the cost of electricity in real time.

The article, in accordance with the analyzed factors influencing uncontrolled air emissions with radioactive aerosols, proposes mathematical software. Neural network training was conducted on the basis of actual indicators of air circulation inside and outside the NSC, which allowed the problems to be solved and the research goal to be achieved.

Keywords: machine learning, neural networks, radioactive aerosols, New Safe Confinement, ventilation systems, Chernobyl Nuclear Power Plant.

Отримано 05.01.2022