

УДК 004.42:621.039.58 (477.41)

DOI: 10.31673/2412-9070.2023.030011

І. С. СТАРОВІТ, аспірант,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

СИСТЕМА ПІДТРИМАННЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ НБК ЧАЕС

Метою нового безпечного конфайнменту (НБК) є захист навколишнього середовища під час видалення радіоактивних матеріалів із зруйнованого блока №4 та демонтажу нестабільних конструкцій зруйнованого об'єкта «Укриття». Оскільки заплановані роботи на ЧАЕС супроводжуються великими викидами радіоактивних аерозолів (РА), що становлять значний ризик для довкілля та персоналу — їх оцінювання, прогнозування, а також оптимальне керування вентиляційними установками (ВУ) з метою мінімізації цих викидів важливою мірою визначає успішність та безпечність проведення таких робіт. У статті розглянуто архітектуру та приклад практичної реалізації системи підтримання прийняття рішень (СППР) щодо керування вентиляційними установками НБК ЧАЕС, що дає змогу визначити оптимальні параметри роботи ВУ, із мінімізацією витрат електроенергії та зменшенням негативного впливу радіоактивних аерозолей, надає зручний інтерфейс користувача для моделювання та візуалізації роботи ВУ НБК. Описано підхід до розроблення, який забезпечує ізоляцію модулів, легкість тестування та перенесення розробленого ПЗ між середовищами, а також можливість подальшого розширення функціональності системи.

Ключові слова: система підтримання прийняття рішень; керування вентиляцією; модель програмного забезпечення; новий безпечний конфайнмент.

Вступ

Аварія, яка відбулася 26 квітня 1986 року на Чорнобильській атомній електростанції (ЧАЕС) призвела до однієї з найбільших техногенних катастроф у світовій історії. Її наслідком було вивільнення значних обсягів радіоактивних речовин у навколишнє середовище. У зв'язку з цим було розроблено та реалізовано об'єкт «Укриття» — споруди, завдання якої було спрямовано на утримання радіаційно небезпечних речовин та зменшення подальших витоків забруднення. Закладений термін її експлуатації становив 20-40 років, отже в 2000-х роках постала задача створення та введення в експлуатацію нового безпечного конфайнменту (НБК), метою якого є захист навколишнього середовища під час видалення радіоактивних матеріалів із зруйнованого блока №4 та демонтажу нестабільних конструкцій зруйнованого об'єкта «Укриття». Досягти повної герметичності такої великої конструкції (250×110×165м) неможливо, тому існують численні витікання повітря з НБК до навколишнього середовища через оболонки НБК між західними і східними стінами та будівельними конструкціями. Під час проектування НБК було оцінено теоретичні значення площі витікання на початку експлуатації споруди, які було переглянуто після введення об'єкта в експлуатацію: здобуті значення значно перевищували попередні. Прогнозується, що значення наявних витікань будуть продовжувати збільшуватись під час усього робочого терміну НБК [1], на що потрібно зважати під час планування робіт всередині об'єкта.

Оскільки заплановані роботи на ЧАЕС мають складний та комплексний характер і супроводжуються великими викидами радіоактивних аерозолів (РА), що становлять значний ризик для довкілля та персоналу, який працює навколо об'єкта — їх оцінювання та прогнозування важливою мірою визначають успішність та безпечність проведення таких робіт. У цьому контексті є потреба в розробленні ефективних рішень для візуалізації поточного стану, моделювання, прогнозування та оптимізації параметрів роботи систем НБК ЧАЕС, зокрема гідравлічного стану та системи вентиляції.

Аналіз останніх досліджень та постановка мети. Нині здійснено велику кількість досліджень гідравлічного стану НБК. Розроблено фізичні CFD-моделі (*Computational Fluid Dynamics*) [1], які дають змогу розрахувати термогазодинамічні та вологісні параметри об'єкта, однак вони відрізняються значним часом обчислення та складністю інтеграції в нове програмне забезпечення. У таких моделях показано, що визначальним для вхідних даних для гідравлічних розрахунків є швидкість та напрям вітру навколо НБК, які впливають на розподіл тиску навколо об'єкта. Більш перспективним для використання в режимі реального часу є спрощена модель [2] на основі рівнянь збереження мас та рівнянь Бернуллі. Ця модель не має попередньо наведених недоліків і дає можливість виконувати розрахунки за адекватний час, водночас зберігаючи прийнятну точність та деталізацію результатів. На основі запропонованої моделі розроблено спеціальне програмне ма-

тематичне забезпечення (СПМЗ), яке дає змогу визначати оптимальні параметри роботи вентиляційних установок за різних граничних умов та досягати значного зменшення викидів радіації з одночасною мінімізацією витрат електроенергії [3]. Показано також можливість застосування нейронних мереж для прискорення розрахунків, що може бути доцільним у процесі подальшого розвитку спрощених моделей даного типу та переходу до моделей більшої складності.

Також розроблено узагальнену багаторівневу архітектуру програмного забезпечення прогнозування і керування термогазодинамічними процесами і радіаційним станом НБК ЧАЕС на основі технології цифрових двійників [4], яка описує основні компоненти та рекомендовані принципи, що мають бути закладені під час проектування системи підтримання прийняття рішень (СППР), однак вона не розкриває рекомендовані технічні рішення щодо розроблення підсистеми керування системою вентиляції, а також не описує комплексний метод прогнозування гідравлічного стану об'єкта, який є обов'язковим для проактивного керування.

Метою роботи є репрезентація архітектури та приклад практичної реалізації системи підтримання прийняття рішень стосовно оптимального керування вентиляційними установками НБК ЧАЕС, що дасть змогу знайти оптимальні параметри роботи ВУ з мінімізацією витрат електроенергії та зменшенням негативного впливу радіоактивних аерозолей.

Основна частина

Розроблення СППР передбачає такі основні вигоди до даного типу ПЗ [5]:

♦ **модульність:** система має бути розділена на модулі, які можна вдосконалювати та доповнювати незалежно один від одного. Це дає можливість легко впроваджувати нові функції та поліпшення, не впливаючи на роботу інших компонентів;

♦ **аналіз та моделювання:** програмне забезпечення має надавати інструменти для аналізу проблеми, включно з можливістю побудови математичних та статистичних моделей. Тобто, відповідати на запитання: «Що буде, якщо ...?»;

♦ **збір та маніпуляція даними:** система має бути здатною збирати, інтегрувати та обробляти дані з різних джерел (зокрема, підтримувати додавання нових джерел) для подальшого аналізу;

♦ **методи прийняття рішень:** ПЗ повинно надавати набір методів та алгоритмів для прийняття рішень, включно зі статистичними методами, аналізом чутливості, оптимізацією тощо;

♦ **інтерактивність та візуалізація результатів:** система має підтримувати взаємодію з користувачем, забезпечуючи можливість нала-

штування параметрів, введення даних та вибору рішень. Важливо, щоб система надавала можливість візуалізувати результати аналізу та рішень у зручному для розуміння вигляді.

На основі наведених вимог, особливостей функціонування НБК ЧАЕС, а також діаграми прецедентів (рис. 1) спроектовано архітектуру СППР (рис. 2) та розроблено прототип відповідного ПЗ.

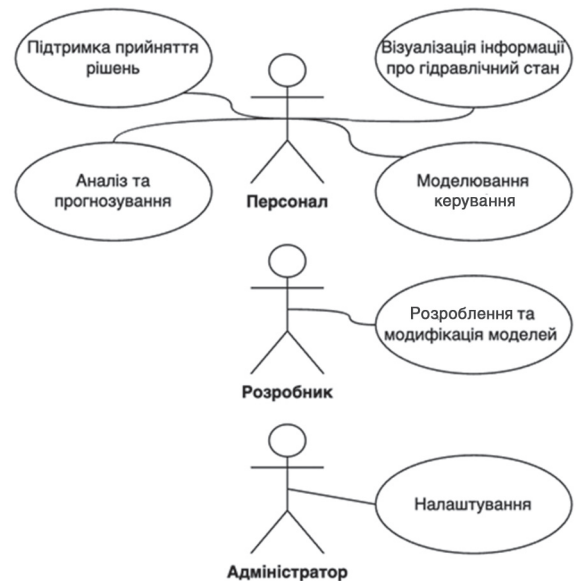


Рис. 1. Узагальнена діаграма прецедентів СППР щодо оптимального керування вентиляцією НБК

Далі розглянемо основні модулі розробленої СППР.

1. ETL (Extract, Transform, Load) модуль, який дає змогу отримувати експлуатаційні дані з дачців НБК та метеорологічної станції ЧАЕС, а також із відкритих метеорологічних API.

2. База даних (БД), в якій зберігаються всі експлуатаційні дані, записи із сесій користувача, актуальні та історичні параметри фізичних моделей СПМЗ. Як БД використовується PostgreSQL, перевагою якої є відкритий вихідний код та підтримання широкого спектра функціональності. Для керування та адміністрування БД PostgreSQL застосовується безплатний графічний інтерфейс pgAdmin.

3. Модуль прогнозування погодних даних дає можливість визначати очікувані швидкості та напрям вітру, використовуючи попередні історичні дані. Закладено здатність застосування популярних підходів щодо прогнозування параметрів вітру [6]: статистичний підхід на основі сезонності, аналіз часових рядів (наприклад, ARIMA) та нейронних мереж. Вибір оптимального підходу залежить від вікна прогнозування та бажаного розрахункового часу.

4. СПМЗ керування вентиляційним обладнанням є основним розрахунковим модулем, містить у собі алгоритм рішення «прямої» задачі з відшу-

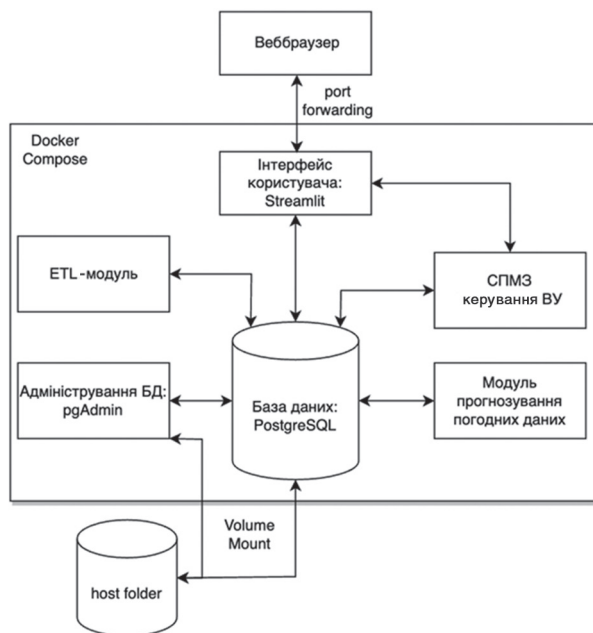


Рис. 2. Архітектура розробленого СППР

кання тисків всередині НБК методом простих ітерацій, «оберненої» задачі з визначення площі витікання (через мінімізацію середньоквадратичної похибки між розрахунковими та експлуатаційними значеннями перепадів тисків):

$$L = f(\text{areas}) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^k \frac{1}{nk} \sqrt{(\Delta P_{ij}^{\text{реальне}} - \Delta P_{ij}^{\text{розрахункове}})^2} \rightarrow 0, \quad (1)$$

де k — кількість давачів; n — кількість вимірів.

Також цей модуль розв’язує оптимізаційну задачу з пошуку оптимальних параметрів роботи ВУ за різних граничних умов. Приклад оптимізованої витрати ВУ основного об’єму залежно від напрямку вітру зображено на рис. 3.

5. Вебінтерфейс користувача виконано за допомогою Python модуля Streamlit, яка підтримує інтеграцію з популярними бібліотеками для аналізу даних, зокрема Pandas та Matplotlib. Це дає змогу створювати динамічні та візуально привабливі інтерфейси, що надають користувачам можливість легко взаємодіяти з аналітичними інструментами.

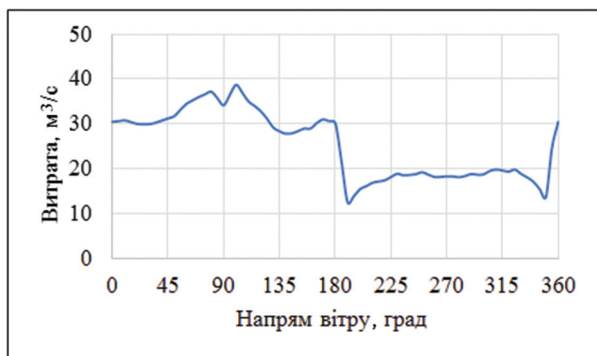


Рис. 3. Оптимізована витрата витяжки з основного об’єму залежно від напрямку вітру з фіксованою швидкістю вітру (6 м/с)

Основні екрани інтерфейсу користувача, що збігаються із сценаріями використання, зображеними на діаграмі прецедентів (див. рис. 1), і відтворюють основні послідовності взаємодії користувачів із системою, наведено далі.

1. Екран візуалізації актуального гідравлічного стану НБК з розподілами тисків усередині та навколо об’єкта і розрахованими неконтрольованими витіканнями РА, а також рекомендованими параметрами роботи ВУ під час стандартного режиму роботи.

2. Екран візуалізації історичних даних (експлуатаційних та метеорологічних).

3. Екран для розрахунку очікуваних викидів, оптимальних параметрів роботи ВУ та рекомендацій для оператора, зокрема з використанням змінної концентрації РА всередині НБК, розрахованих за допомогою наявних зовнішніх моделей [7] (під час виконання робіт всередині об’єкта), із застосуванням прогнозованих метеорологічних даних.

Для розроблення ПЗ було взято комбінацію відкритого програмного забезпечення (open source) та мови програмування Python (з використанням бібліотек для аналізу даних та модульного тестування pytest). Розгортання відбувалося за допомогою Docker Compose, що спрощує процес розгортання, роблячи його більш передбачуваним та легким для відтворення; додатково було використано Volume Mount, що дало змогу зберігати дані поза контейнером, гарантуючи стійкість до зупинки контейнера. Загалом, описаний підхід забезпечує ізоляцію модулів, а також легкість тестування та перенесення розробленого ПЗ між середовищами.

Висновки

У статті описано систему підтримання прийняття рішень для оптимального керування вентиляційним устаткуванням нового безпечного конфайнменту (НБК) ЧАЕС. Система передбачає кілька ключових модулів, зокрема отримання даних із давачів та метеорологічної станції, зберігання й аналіз даних, прогнозування погодних параметрів, розрахунок та оптимізацію параметрів вентиляції, а також вебінтерфейс для взаємодії з користувачем. Розроблена система дає змогу враховувати фізичні особливості об’єкта, прогнозувати метеорологічні умови, визначати оптимальні режими роботи вентиляції, підвищувати ефективність та мінімізувати негативні наслідки під час роботи персоналу за допомогою аналізу і візуалізації результатів.

Список використаної літератури

1. Model of thermogasdynamic, humid and radiation state A.S. of the new safe confinement and the «Shelter» Object / P. G. Kruckovskiy, M. O. Metel, Polubinskiy [et al.] // II International Conference

«International Conference on Nuclear Decommissioning and Environment Recovery» INUDECO. April 25-27, 2017, Slavutych, Ukraine, P. 347–350.

2. **Unorganized emissions of air with radioactive aerosols from the new safe confinement of the Chernobyl Nuclear Power Plant into the surrounding environment** / P. G. Krukovskyyi, E. V. Dyadyushko, D. I. Sklyarenko, I. S. Starovit // *Issues of atomic science and technology*, 2021. 6. P. 181–186.

3. **Development of special mathematical software for controlling the ventilation units of the new safe confinement of the ChNPP** / Y. Pysmennyi, Y. Havrylko, P. Krukovskyyi [et al.] // *Nuclear & radiationsafety*, 2022. 2(94). P. 35–43.

4. **Loboda P. P., Starovit I. S. Development of software architecture for forecasting and management**

of thermogasdynamics processes and the radiation state of the New Safe Confinement of the ChNPP. Bulletin of the Kherson National Technical University. Technical sciences, 2022. №4(83). P. 67–73.

5. **Holsapple C. W., Whinston A. B. Decision Support Systems (a knowledge based approach)**. New York: West Publishing Company, 2003. 860 p.

6. **Wang X., Guo P., Huang X. A review of wind power forecasting models** // *Energy Procedia* 2011. №12. P. 770–778.

7. **Динаміка зміни концентрації радіоактивних аерозолів під час вилучення паливовміщуючих матеріалів з об'єкта «Укриття»** / В. Г. Батій, А. О. Сізов, Д. В. Федорченко, А. О. Холодюк // *Ядерна та радіаційна безпека*. 2015. Вип. 4. С. 41–44.

I. S. Starovit

DECISION-MAKING SUPPORT SYSTEM REGARDING OPTIMAL VENTILATION CONTROL OF NBK CHANPP

The purpose of the New Safe Confinement (NSC) is to protect the environment during the removal of radioactive materials from the destroyed block #4 and the dismantling of unstable structures of the destroyed "Shelter" facility. Since the planned work at the Chernobyl NPP is accompanied by large emissions of radioactive aerosols (RA), which pose a significant risk to the surrounding environment and personnel — their assessment, forecasting, as well as optimal management of ventilation units (VU) in order to minimize these emissions to an important extent determines success and safety carrying out such works. This paper presents the architecture and an example of the practical implementation of the decision support system (DSPR) for the management of ventilation units of the National Nuclear Power Plant of the Chernobyl Nuclear Power Plant, which allows finding the optimal operating parameters of the nuclear power plant, while minimizing the consumption of electricity and reducing the negative impact of radioactive aerosols, provides a convenient user interface for modeling and visualization works of the NBK University. An approach to development is described, which provides isolation of modules, ease of testing and transfer of the developed software between environments, and the possibility of further expansion of the system's functionality.

Keywords: decision support system; ventilation control; software model; New Safe Confinement.