

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА
КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА-Е23мг-1

спеціальності : 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/ Іван ВОЛКОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/ Павло БУДАНОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/ _____
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/ Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____/ Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/ _____
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти

здобувачу вищої освіти Іван ВОЛКОВ

1. Тема «Удосконалення алгоритму системи моніторингу та контролю герметичності елементів ядерного реактора для підвищення безпеки та ефективності експлуатації»
затверджена наказом по академії №___ від «___» _____ 20__ р.

2. Термін здачі закінченої роботи «___» _____ 20__ р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Параметри ядерного реактора. Алгоритм системи моніторингу та контролю герметичності елементів ядерного реактора.

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ
МОНІТОРИНГУ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА; РОЗДІЛ 2.
УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ МОНІТОРИНГУ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ
ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА; РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГЕРМЕТИЧНОСТІ В
СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА.

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання« ____ » _____ 20 ____ р.

Керівник

(підпис)

Павло БУДАНОВ

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Іван ВОЛКОВ

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.24 – 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 – 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 – 29.10.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)

Іван ВОЛКОВ

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)

Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Сторінок тексту – 64; рисунків – 1 ; таблиць – 1;

літературних джерел – 25.

Тема магістерської роботи: «Удосконалення алгоритму системи моніторингу та контролю герметичності елементів ядерного реактора для підвищення безпеки та ефективності експлуатації».

Метою роботи є удосконалення алгоритмів системи моніторингу та контролю герметичності елементів ядерного реактора для підвищення безпеки та ефективності їх експлуатації. Для досягнення цієї мети передбачено вирішення таких основних завдань:

- аналіз сучасних підходів до моніторингу герметичності – розгляд існуючих методів і технологій, що використовуються для оцінки герметичності в ядерних реакторах;
- розробка математичних моделей для оцінки герметичності елементів реактора та прогнозування потенційних витоків;
- удосконалення алгоритмів моніторингу з урахуванням новітніх технологій, таких як машинне навчання, інтелектуальні системи аналізу даних, математичне моделювання;
- оцінка ефективності запропонованих алгоритмів через порівняння з існуючими підходами та технологіями моніторингу герметичності.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу герметичності елементів ядерного реактора, зокрема алгоритми, що використовуються для виявлення порушень герметичності в реальному часі та прогнозування їх розвитку.

Предметом дослідження є математичні моделі, алгоритми збору, обробки та аналізу даних для моніторингу герметичності елементів ядерного реактора, а також методи їх удосконалення для підвищення безпеки та ефективності експлуатації ядерних установок.

Ключові слова: ядерний реактор, метод контролю герметичності оболонки, алгоритм системи моніторингу, параметри ядерного реактору

ABSTRACT

Pages of text – 64; pictures – 1 ; tables – 1 ;

literary sources – 25 .

The topic of the Master's thesis: "Improvement of the Algorithm for the Monitoring and Leak-tightness Control System of Nuclear Reactor Components to Enhance Safety and Operational Efficiency."

The aim of the work is to improve the algorithms of the monitoring and leak-tightness control system of nuclear reactor components to enhance their safety and operational efficiency. To achieve this goal, the following key tasks are set:

Analysis of modern approaches to leak-tightness monitoring – reviewing existing methods and technologies used for assessing leak-tightness in nuclear reactors;

Development of mathematical models for assessing the leak-tightness of reactor components and predicting potential leaks;

Improvement of monitoring algorithms by incorporating cutting-edge technologies such as machine learning, intelligent data analysis systems, and mathematical modeling;

Evaluation of the effectiveness of the proposed algorithms by comparing them with existing approaches and technologies for leak-tightness monitoring.

The object of the study is the process of monitoring the leak-tightness of nuclear reactor components, particularly the algorithms used for detecting breaches in leak-tightness in real-time and predicting their development.

The subject of the study is the mathematical models, algorithms for data collection, processing, and analysis for monitoring the leak-tightness of nuclear reactor components, as well as methods for improving them to enhance the safety and efficiency of nuclear power plant operations.

Keywords: nuclear reactor, leak-tightness control method, monitoring system algorithm, nuclear reactor parameters.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА	10
1.1 Принципи роботи ядерного реактора та важливість герметичності елементів реактора	10
1.2 Сучасні методи моніторингу герметичності в атомній енергетиці	17
1.3 Огляд існуючих алгоритмів моніторингу та контролю герметичності	21
1.4 Проблеми та обмеження існуючих систем моніторингу герметичності	29
Висновки до розділу	31
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ МОНІТОРИНГУ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА	35
2.1 Визначення параметрів герметичності елементів ядерного реактора	35
2.2 Методи збору та обробки даних для моніторингу герметичності	40
Висновки до розділу 2	46
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГЕРМЕТИЧНОСТІ В СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА	50
3.1 Математичне моделювання процесів герметичності в системах моніторингу	50
3.2 Розробка алгоритму для автоматизованої оцінки герметичності елементів реактора	55
Висновки до розділу 3	63
ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні ядерні технології займають важливе місце в енергетичному секторі, забезпечуючи значну частину світових потреб у електричній енергії. Проте безпека ядерних установок залишається одним з основних пріоритетів у їх експлуатації. Одним із найважливіших аспектів забезпечення безпеки є герметичність елементів ядерного реактора, оскільки будь-яке порушення герметичності може призвести до витоку радіоактивних матеріалів, що становить серйозну загрозу для навколишнього середовища, здоров'я людей і нормальної експлуатації енергетичних установок [1-7].

Для мінімізації таких ризиків необхідне постійне моніторингу і контроль стану герметичності усіх критичних елементів реактора. Сучасні системи моніторингу герметичності включають використання різноманітних датчиків і сенсорів для вимірювання таких параметрів, як тиск, температура, концентрація газів, рівень радіації тощо. Водночас для досягнення високої ефективності та надійності цих систем необхідно розробляти нові алгоритми, здатні забезпечити не лише своєчасне виявлення порушень герметичності, але й точну оцінку їхнього розвитку, а також прогнозування можливих аварійних ситуацій [8-14].

У цьому контексті важливою є розробка та удосконалення алгоритмів, які інтегрують дані від різних сенсорів, дозволяють швидко обробляти великі обсяги інформації, а також здійснювати прогностичний аналіз. Використання новітніх технологій, таких як штучний інтелект, машинне навчання та математичне моделювання, відкриває нові можливості для підвищення точності та надійності таких систем, знижуючи ймовірність помилок і збоїв, що в свою чергу підвищує рівень безпеки експлуатації ядерних реакторів [15-20].

Актуальність дослідження визначається необхідністю розробки нових алгоритмів моніторингу та контролю герметичності, що зможуть ефективно функціонувати в умовах постійного зростання складності ядерних установок і

збільшення вимог до їх безпеки. Удосконалення цих алгоритмів є необхідним етапом для підвищення не лише безпеки, а й ефективності експлуатації ядерних реакторів, що в свою чергу сприяє стійкому розвитку атомної енергетики.[21-25].

Метою роботи є удосконалення алгоритмів системи моніторингу та контролю герметичності елементів ядерного реактора для підвищення безпеки та ефективності їх експлуатації. Для досягнення цієї мети передбачено вирішення таких основних завдань:

- аналіз сучасних підходів до моніторингу герметичності – розгляд існуючих методів і технологій, що використовуються для оцінки герметичності в ядерних реакторах;
- розробка математичних моделей для оцінки герметичності елементів реактора та прогнозування потенційних витоків;
- удосконалення алгоритмів моніторингу з урахуванням новітніх технологій, таких як машинне навчання, інтелектуальні системи аналізу даних, математичне моделювання;
- оцінка ефективності запропонованих алгоритмів через порівняння з існуючими підходами та технологіями моніторингу герметичності.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу герметичності елементів ядерного реактора, зокрема алгоритми, що використовуються для виявлення порушень герметичності в реальному часі та прогнозування їх розвитку.

Предметом дослідження є математичні моделі, алгоритми збору, обробки та аналізу даних для моніторингу герметичності елементів ядерного реактора, а також методи їх удосконалення для підвищення безпеки та ефективності експлуатації ядерних установок.

Теоретична значущість роботи полягає в удосконаленні методів математичного моделювання та алгоритмів моніторингу, що дозволяє покращити точність та ефективність оцінки герметичності в системах ядерних реакторів. Розроблені математичні моделі та алгоритми можуть бути застосовані для вдосконалення існуючих методів оцінки герметичності, що в

свою чергу дозволить значно знизити ймовірність техногенних аварій, спричинених витокami радіоактивних матеріалів.

Практична значущість роботи полягає в можливості впровадження розроблених алгоритмів і математичних моделей у реальні системи моніторингу та контролю герметичності ядерних реакторів. Це дозволить підвищити рівень безпеки та надійності експлуатації ядерних установок, зменшити ймовірність виникнення аварій та витоків радіоактивних матеріалів, а також оптимізувати експлуатаційні витрати завдяки більш точному та своєчасному виявленню проблем.

Розробка нових технологій для моніторингу герметичності має не лише наукове, але й важливе соціальне значення, оскільки сприяє збереженню екології та здоров'я людей, що є ключовими факторами для забезпечення сталого розвитку атомної енергетики у світі.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

1.1 Принципи роботи ядерного реактора та важливість герметичності елементів реактора

Ядерний реактор є складною системою, що забезпечує контрольований процес ядерного розпаду, який використовується для виробництва електричної енергії. Принцип його роботи базується на поділі атомних ядер (зазвичай урану або плутонію), в результаті якого виділяється велика кількість енергії у вигляді тепла. Це тепло потім використовується для нагрівання води та утворення пари, що обертає турбіну генератора.

Важливим аспектом безпеки є герметичність елементів реактора, особливо його теплоносія, що містить радіоактивні ізотопи, які можуть потрапити в навколишнє середовище при порушенні герметичності. Герметичність забезпечує запобігання витоку радіоактивних матеріалів і має прямий вплив на безпеку ядерної установки. Оскільки в реакторах використовуються високі температури та тиск, навіть незначні порушення герметичності можуть призвести до серйозних аварійних ситуацій.

Ключові елементи, щодо яких важливо забезпечити герметичність, включають:

Корпус реактора — основний контейнер, що містить активну зону реактора.

Теплообмінники — елементи, через які відбувається передача тепла від активної зони до системи охолодження.

Паливні елементи — в яких відбувається ядерний розпад.

Проміжні трубопроводи і контейнери — що забезпечують рух теплоносія.

У разі порушення герметичності в системі, існує ризик потрапляння радіоактивних матеріалів у середовище, що ставить під загрозу не тільки безпеку персоналу, а й довкілля.

Розглянемо принципи роботи ядерного реактора та важливість герметичності елементів реактора.

Ядерний реактор є складною технічною системою, що використовує ядерні процеси для виробництва тепла, яке потім перетворюється на електричну енергію. Основний принцип його роботи базується на контролюваному процесі ядерного розпаду. В якості палива для реактора зазвичай використовуються ізотопи урану (зокрема, U-235) або плутонію (Pu-239), які можуть зазнавати поділу при зіткненні з нейтронами.

Під час ядерного поділу, один атом урану або плутонію поглинає нейтрон, що призводить до його нестабільності і розпаду на два або більше нових атомних ядра, виділяючи при цьому велику кількість енергії у вигляді тепла. Це тепло в свою чергу використовується для нагрівання теплоносія — зазвичай води або газу, що циркулює через реактор. Теплоносій передає отримане тепло до теплообмінників, де вода перетворюється на пару, яка обертає турбіну генератора, що, в свою чергу, виробляє електричну енергію.

Для стабільної та безпечної роботи реактора важливо підтримувати баланс між кількістю нейтронів, що взаємодіють з ядерним паливом, і кількістю нейтронів, що втрачаються в процесі реакції. Це контролюється за допомогою регулюючих стрижнів, що складаються з матеріалів, здатних поглинати нейтрони, а також за допомогою модераторів, таких як вода або графіт, які сповільнюють нейтрони для досягнення більш ефективного поділу.

Існує кілька типів ядерних реакторів, залежно від застосовуваного палива і теплоносія. Наприклад:

Тискозбірні реактори (PWR) використовують воду під високим тиском як теплоносій, щоб уникнути її кипіння при високих температурах.

Киплячі водяні реактори (BWR) використовують воду, яка кипить безпосередньо в активній зоні реактора, а отримана пара обертає турбіну.

Газоохолоджувані реактори (AGR) застосовують вуглецевий модератор і газ (зазвичай вуглекислий газ) як охолоджувач.

Важливість герметичності елементів реактора. Однією з основних вимог до ядерного реактора є герметичність усіх елементів, що містять радіоактивні матеріали. Герметичність забезпечує безпеку як операцій персоналу, так і довкілля. Системи, що містять теплоносії, а також компоненти, що взаємодіють із паливними елементами, можуть стати джерелом витоку радіоактивних ізотопів, якщо порушена герметичність.

Основні компоненти, щодо яких критично важливо забезпечити герметичність, включають:

Корпус реактора є основним елементом, що утримує активну зону реактора, де відбувається ядерний розпад. Він має забезпечувати повну ізоляцію від навколишнього середовища. Через нього проходить теплоносій, що нагрівається внаслідок ядерних реакцій. У разі порушення герметичності корпусу можливий витік радіоактивних речовин у навколишнє середовище, що становить значну небезпеку.

Теплообмінники забезпечують передачу тепла від активної зони реактора до системи охолодження або до парової турбіни. Це дуже важливі елементи, оскільки при порушенні герметичності теплообмінника може статися витік радіоактивного теплоносія, що може мати катастрофічні наслідки. Наприклад, у водяних реакторах порушення герметичності теплообмінника може призвести до витоку радіоактивної води.

Паливні елементи (паливні стрижні). В паливних елементах відбувається безпосередньо ядерний розпад. Вони містять ядерне паливо — зазвичай це таблетки з урану або плутонію, запечатані в спеціальні оболонки з металу (наприклад, з цирконію). Порушення герметичності паливного елемента може призвести до витоку радіоактивних матеріалів, що може спричинити забруднення навколишнього середовища та небезпеку для здоров'я персоналу.

Проміжні трубопроводи та контейнери для теплоносія. Теплоносій, що циркулює через реактор, проходить через систему трубопроводів, клапанів та інших контейнерів. Якщо ці елементи втрачають герметичність, є ризик витоку радіоактивного матеріалу або навіть катастрофічних аварій, таких як підвищення тиску, що може призвести до вибуху.

Контейнери для відпрацьованого палива. Після того як паливо в реакторі вичерпає свій ресурс, його видаляють і зберігають в спеціальних контейнерах. Зберігання відпрацьованого палива вимагає забезпечення герметичності контейнерів, щоб уникнути витоку радіоактивних матеріалів і небезпеки для навколишнього середовища.

Ризики і наслідки порушення герметичності. Порушення герметичності в системі ядерного реактора може призвести до таких небезпечних наслідків:

Витік радіоактивних матеріалів. Найсерйознішою загрозою є витік радіоактивних матеріалів у навколишнє середовище, що може призвести до радіаційного забруднення території, загрози для здоров'я та життя людей, а також екологічних катастроф.

Підвищення температури або тиску в системі. Якщо герметичність порушена в системі охолодження, це може призвести до зниження ефективності охолодження активної зони реактора і підвищення температури, що створює ризик перегріву та пошкодження реактора.

Невизначені наслідки для персоналу. Негерметичність може становити прямий ризик для операторів і персоналу, які працюють з реактором. У разі витоку радіоактивних матеріалів, вони можуть бути піддані опроміненню, що в довгостроковій перспективі може призвести до важких захворювань або смерті.

Виклик аварії. У разі серйозного порушення герметичності, таких як витік радіоактивних газів, може статися аварія, що вимагатиме масштабних евакуацій та тимчасового закриття атомної станції.

Таким чином, герметичність елементів ядерного реактора є критично важливою для забезпечення безпеки, ефективності та екологічної чистоти

роботи атомних станцій. Порушення герметичності може призвести до серйозних аварій, що мають далекосяжні наслідки для здоров'я людей і навколишнього середовища. Тому ефективні методи моніторингу та підтримки герметичності є невід'ємною частиною сучасної атомної енергетики.

Розглянемо проблеми, пов'язані з герметичністю ядерного реактора. Проте, забезпечення герметичності реактора не є простою задачею. Існує кілька важливих факторів, які ускладнюють підтримання належного рівня герметичності в системах ядерного реактора:

Високі температури і тиски. У процесі роботи реактора створюються дуже високі температури і тиски, що значно підвищують вимоги до матеріалів, з яких виготовлені герметизуючі елементи. Це стосується як внутрішніх елементів, таких як паливні стрижні та теплообмінники, так і зовнішніх, наприклад, корпусу реактора і трубопроводів. Підвищена температура може викликати розширення металів, а також їх знос, що з часом веде до можливих мікротріщин чи порушень герметичності.

Експлуатаційне старіння матеріалів. Протягом тривалого періоду експлуатації реактора матеріали, з яких виготовлені герметизуючі елементи (наприклад, цирконієві оболонки паливних елементів), можуть зазнавати змін через радіаційне випромінювання та хімічні реакції з теплоносієм. Це призводить до розвитку тріщин і мікрodefектів, що знижує герметичність і призводить до витоків.

Механічні навантаження. Під час роботи реактора виникають значні механічні навантаження — від термічного розширення до сейсмічних коливань та вібрацій, пов'язаних з рухом теплоносія і обертанням турбін. Це також може сприяти розвитку тріщин або деформацій, що в свою чергу, можуть порушити герметичність.

Корозія та ерозія матеріалів. Високий рівень температури, тиску та радіації сприяє активізації корозійних процесів в металах, які використовуються в конструкціях реактора. Проблема корозії особливо

актуальна для теплообмінників, трубопроводів і корпусу реактора. Це може призвести до витоків радіоактивних матеріалів або зниження ефективності охолодження.

Витік радіоактивних газів. Окремою проблемою є витік радіоактивних газів, таких як радіоактивний водень (дегідрогеновані ізотопи) або інші газоподібні продукти розпаду, які можуть проникати через мікроскопічні тріщини або дефекти в герметизуючих матеріалах.

Визначення малих витоків. Одним з основних викликів є виявлення дуже малих витоків, які можуть не проявлятися через візуальні або стандартні методи моніторингу. Такі витoki часто є критичними, оскільки можуть розвиватися без явних ознак, поки не досягнуть критичних масштабів.

Технічні засоби і методи забезпечення герметичності. Для запобігання витоків та забезпечення герметичності елементів реактора розроблено кілька підходів та технологій, що включають:

Використання високоякісних матеріалів. Герметичність досягається завдяки використанню спеціальних сплавів та матеріалів, стійких до високих температур і радіації. Це включає цирконієві сплави для оболонок паливних стрижнів, які мають високу корозійну стійкість, а також нержавіючу сталь і інші матеріали, що використовуються для виготовлення трубопроводів і контейнерів.

Моніторинг стану герметичності. Використання різноманітних сенсорів та датчиків, здатних контролювати зміни параметрів у реальному часі, таких як тиск, температура та рівень радіації, є важливим кроком для забезпечення раннього виявлення витоків. Застосування ультразвукових методів та візуальних перевірок дає змогу контролювати стан трубопроводів і корпусів реактора на предмет можливих тріщин та дефектів.

Технічне обслуговування та перевірки. Регулярне технічне обслуговування та планові перевірки герметичності є важливою частиною стратегії збереження безпеки. Перевірки проводяться за допомогою герметичних випробувань, під час яких система тестується на наявність

витоків. Використовуються також методи інфрачервоної термографії для виявлення температурних аномалій, що можуть свідчити про витoki.

Моделювання та аналіз. Сучасні моделі, засновані на чисельних методах, дозволяють проводити аналіз на основі даних експлуатації і прогнозувати можливі ризики порушення герметичності. Ці моделі використовують дані про поточні умови роботи реактора, характеристики матеріалів та поведінку теплоносія для передбачення можливих проблем.

Системи автоматичного контролю та управління. Системи автоматичного контролю, які інтегровані з іншими елементами безпеки, дозволяють оперативно реагувати на будь-які аномальні зміни в роботі реактора. Вони здатні зупинити реактор або активувати аварійні охолоджувальні системи, якщо система виявить порушення герметичності або інші небезпечні умови.

Таким чином, герметичність елементів ядерного реактора є фундаментальним аспектом для забезпечення безпеки на атомних станціях. Вона запобігає витокam радіоактивних матеріалів, що може мати серйозні наслідки для здоров'я людей і навколишнього середовища. Однак підтримання цієї герметичності ускладнюється багатьма факторами, такими як високі температури, радіаційне навантаження, корозія та ерозія матеріалів, а також механічні навантаження.

Для забезпечення належної герметичності необхідне використання високоякісних матеріалів, постійний моніторинг стану елементів реактора, а також регулярне технічне обслуговування та перевірки. Важливими є також розвиток методів моделювання та прогнозування, що дозволяють оперативно реагувати на потенційні загрози.

Ці підходи мають на меті не тільки забезпечення безпеки операторів і персоналу, а й збереження довкілля та безпечної експлуатації ядерних реакторів в цілому. У результаті, ефективна система моніторингу герметичності є ключовим елементом для забезпечення безпечної роботи атомних енергетичних установок у довгостроковій перспективі.

1.2 Сучасні методи моніторингу герметичності в атомній енергетиці

Моніторинг герметичності є важливим елементом забезпечення безпеки ядерних установок. Для цього використовуються різноманітні методи та технології, які дозволяють виявляти навіть незначні порушення герметичності. Серед основних методів моніторингу герметичності можна виділити:

Візуальні методи. Застосовуються для виявлення зовнішніх пошкоджень на поверхні елементів реактора або їхніх ізоляцій. Використовуються за допомогою спеціальних оглядових камер або зорових систем.

Метод контролю тиску (герметичні випробування). Це один із найстаріших і найбільш поширених методів, який полягає в підтримці певного тиску у системі та моніторингу його змін. Якщо тиск знижується — це може свідчити про витік.

Методи витоку газу. Вимірювання концентрації специфічних газів (наприклад, гелію або водню), що використовуються в системах охолодження або як індикатори витоків.

Ультразвукові методи. Використовуються для виявлення мікротріщин і дефектів у матеріалах конструкцій реактора. За допомогою ультразвукових хвиль можна виявити порушення на рівні, що не видно неозброєним оком.

Радіаційні методи. Використовуються для виявлення аномальних рівнів радіації, які можуть бути викликані витоками радіоактивних матеріалів.

Методи на основі лазерної технології. Лазерні технології дозволяють здійснювати точний контроль за станом герметичності за допомогою лазерних сканерів та інфрачервоних датчиків.

Моделювання та математичні методи. Математичні моделі використовуються для симуляції поведінки системи при різних порушеннях герметичності та для прогнозування можливих витоків на основі реальних даних.

Розглянемо сучасні методи моніторингу герметичності в атомній енергетиці. Моніторинг герметичності є одним із найважливіших елементів забезпечення безпеки ядерних установок. Порушення герметичності елементів реактора або трубопроводів може призвести до витоків радіоактивних матеріалів, що становить серйозну загрозу як для персоналу, так і для навколишнього середовища. Для своєчасного виявлення таких порушень використовуються різноманітні методи та технології, які дозволяють забезпечити високу точність і надійність виявлення навіть незначних витоків або дефектів у конструкціях. Нижче розглянуті основні сучасні методи моніторингу герметичності в атомній енергетиці.

Візуальні методи є одними з найбільш базових, але водночас важливих для виявлення зовнішніх пошкоджень елементів ядерного реактора. Вони включають використання різних видів камер і зорових систем, що дозволяють здійснювати огляд поверхні конструкцій, трубопроводів та ізоляційних матеріалів на наявність тріщин, корозії, подряпин або інших дефектів, які можуть призвести до порушення герметичності.

Сучасні візуальні методи включають: Використання тепловізорів для виявлення аномальних температурних змін, які можуть свідчити про витoki теплоносія або радіоактивних матеріалів. Віддалене спостереження за допомогою безпілотних апаратів (дронів), які здатні оглядати важкодоступні ділянки та проводити аналіз в реальному часі. Хоча візуальні методи ефективні для первинної оцінки стану герметичності, вони обмежені в здатності виявляти внутрішні дефекти та мікротріщини, тому вони часто використовуються в поєднанні з іншими методами.

Метод контролю тиску, або герметичні випробування, є одним з найстаріших і найбільш поширених методів для моніторингу герметичності елементів ядерного реактора. Він полягає в підтримці певного тиску в системі та моніторингу його змін.

Під час проведення герметичних випробувань: система або її частина заповнюється газом або рідиною під певним тиском;

зміни тиску можуть бути сигналом про витік, що дає можливість виявити навіть незначні порушення герметичності; герметичні випробування зазвичай проводяться після ремонту або в процесі планових перевірок.

Цей метод ефективний для виявлення витоків у великих системах, однак його недолік полягає в тому, що він може не виявити малих витоків, які не призводять до значних змін тиску. Крім того, цей метод часто вимагає тимчасового відключення системи або її частин для проведення тестів, що може призвести до зупинки роботи установки.

Методи витоку газу використовуються для виявлення витоків специфічних газів, які використовуються в системах охолодження або як індикатори витоків. Найчастіше для цього використовують гази, такі як гелій, водень, або аргон, які можуть бути віднесені до інертних або радіоактивних газів. Методи виявлення витоків газу включають:

- вимірювання концентрації газів у визначених точках системи, таких як трубопроводи, клапани, з'єднання;
- використання портативних газоаналізаторів, що дозволяють проводити моніторинг витоків на місці в реальному часі;
- методика введення газу в систему і подальший моніторинг його концентрації на виході із системи, що дає змогу виявити навіть мінімальні витoki газу.

Цей метод є дуже ефективним, оскільки він дозволяє виявляти витoki, які не можуть бути помічені іншими методами. Водночас він може бути обмежений у застосуванні через специфіку газів, що використовуються, та необхідність додаткового обладнання для їх виявлення.

Ультразвукові методи використовуються для виявлення мікротріщин, дефектів та інших порушень у матеріалах конструкцій реактора. Ультразвукові хвилі, що випускаються спеціальними датчиками, можуть проходити через матеріал конструкції, і їх відображення від дефектів дає змогу виявити пошкодження або тріщини, які неможливо помітити неозброєним оком.

Ключові переваги ультразвукових методів:

- висока чутливість до маленьких дефектів і порушень герметичності;
- можливість глибокого проникнення в матеріал для виявлення внутрішніх дефектів;
- невеликі витрати на проведення тестів порівняно з іншими методами, такими як рентгенівська дефектоскопія.

Недоліки ультразвукових методів включають необхідність використання спеціальних пристроїв, а також певні обмеження щодо типів матеріалів, які можна перевіряти.

Радіаційні методи використовуються для виявлення витоків радіоактивних матеріалів або аномальних рівнів радіації, які можуть бути спричинені витоками радіоактивних газів або рідини з реактора. Цей метод дуже ефективний для моніторингу потужних джерел радіації.

Основні підходи:

- моніторинг рівнів радіації в різних точках системи, зокрема на виходах трубопроводів та з'єднаннях;
- радіоактивне маркування витоків, де використовується спеціальний індикатор, який дозволяє виявити витік радіоактивних матеріалів у разі порушення герметичності.

Цей метод має велику чутливість, але його використання обмежене високим рівнем радіації, що може заважати вимірюванням у певних частинах реактора.

Лазерні технології є відносно новими методами в області моніторингу герметичності. Лазерні сканери та інфрачервоні датчики дозволяють здійснювати точний контроль за станом герметичності конструкцій та трубопроводів.

Зокрема, лазерне сканування використовується для створення 3D-моделей конструкцій, що дає змогу виявляти деформації або зміни в структурі матеріалів, які можуть бути сигналами про потенційні порушення

герметичності. Лазери також використовуються для моніторингу температури, що дозволяє виявляти аномалії, пов'язані з витокami теплоносія.

Ці методи мають високу точність і дозволяють здійснювати моніторинг в реальному часі. Водночас вони потребують дорогого обладнання та спеціалізованого програмного забезпечення для обробки отриманих даних.

Математичні моделі та симуляції використовуються для прогнозування можливих витоків та порушень герметичності на основі реальних даних з експлуатації систем. Використовуються такі підходи:

Чисельні методи, такі як метод кінцевих елементів, для моделювання поведінки конструкцій при різних навантаженнях і умовах. Моделювання витоків газів або рідин на основі даних про тиск, температуру та інші параметри. Моделювання дозволяє прогнозувати ризики порушення герметичності і своєчасно вжити відповідних заходів для запобігання аварійним ситуаціям.

Таким чином, сучасні методи моніторингу герметичності в атомній енергетиці є ключовими інструментами для забезпечення безпеки ядерних установок. Вибір методу моніторингу залежить від типу обладнання, умов експлуатації та вимог до точності та чутливості виявлення порушень. Для досягнення максимальної ефективності виявлення витоків та дефектів ці методи зазвичай комбінуються, що дозволяє забезпечити високий рівень надійності і безпеки ядерних установок.

1.3 Огляд існуючих алгоритмів моніторингу та контролю герметичності

На сучасному етапі розвитку атомної енергетики використовуються різноманітні алгоритми моніторингу, які обробляють дані з різних сенсорів та виявляють порушення герметичності. Це можуть бути як прості алгоритми на основі зміни параметрів, так і складні методи з використанням машинного навчання.

Основні типи алгоритмів моніторингу включають:

Алгоритми на основі порогових значень. Це прості алгоритми, що використовують порогові значення для параметрів, таких як тиск, температура, концентрація газів або рівень радіації. Якщо значення перевищує встановлений поріг, система сигналізує про можливий витік.

Алгоритми на основі зміни трендів. Ці алгоритми аналізують динаміку змін параметрів за часом і виявляють аномальні зміни, які можуть свідчити про порушення герметичності. Це дозволяє здійснювати більш точну діагностику, ніж при використанні порогових значень.

Алгоритми на основі нейронних мереж і машинного навчання. Застосовуються для більш точного виявлення витоків та прогнозування їх розвитку. Нейронні мережі можуть вивчати патерни в даних, виявляючи складні взаємозв'язки між різними параметрами і їх змінами. Вони здатні забезпечити високу точність виявлення порушень навіть за мінімальних змін параметрів.

Методи математичного моделювання. Використовуються для симуляції поведінки системи при виникненні різних неполадок. Алгоритми можуть поєднувати результати реальних вимірювань із результатами моделювання для точнішого виявлення проблем.

Розглянемо існуючі алгоритми моніторингу та контролю герметичності ядерного реактора. У сучасній атомній енергетиці моніторинг герметичності є важливою складовою частиною забезпечення безпеки ядерних установок. Для своєчасного виявлення порушень герметичності використовуються різноманітні алгоритми, що обробляють дані з різних сенсорів і систем моніторингу. Сучасні алгоритми не обмежуються простими методами перевірки, а включають складні технології, що дозволяють виявляти навіть мінімальні витіки, які можуть бути важко помітні при використанні традиційних підходів. Огляд основних типів алгоритмів допоможе зрозуміти, як саме досягається висока точність виявлення порушень герметичності.

Алгоритми на основі порогових значень є одним з найпростіших та найстаріших підходів до моніторингу герметичності. Ці алгоритми використовують певні задані пороги для ключових параметрів, таких як тиск, температура, концентрація газів або рівень радіації. Якщо значення одного з параметрів перевищує або опускається нижче встановленого порогу, система сигналізує про можливий витік або інше порушення герметичності.

Основні характеристики:

- простота реалізації і використання;
- швидка реакція на порушення заданих параметрів.

Пороги можуть бути встановлені на основі стандартних експлуатаційних норм для конкретного обладнання.

Переваги: простота у реалізації та налаштуванні; легкість у впровадженні в реальних умовах атомних електростанцій.

Оперативність: при перевищенні порогу система може миттєво активувати відповідні заходи безпеки (наприклад, зупинку реактора або активацію аварійних охолоджувальних систем).

Недоліки: можлива велика кількість помилкових спрацьовувань, якщо пороги обрані надто чутливими; неможливість виявлення малих витоків чи порушень герметичності, що не перевищують порогові значення, але можуть розвиватися з часом; відсутність можливості для прогнозування витоків до їх фактичного прояву.

Зазвичай цей метод використовується для початкової перевірки системи, однак для більш складних ситуацій необхідні більш чутливі та інтелектуальні алгоритми.

Алгоритми на основі зміни трендів набагато складніші за алгоритми з пороговими значеннями і забезпечують більш точне виявлення порушень герметичності. Вони аналізують динаміку параметрів (наприклад, зміну тиску, температури або концентрації газів) за часом, і виявляють аномальні зміни в цих трендах, які можуть свідчити про поступове порушення герметичності.

Основні характеристики:

- алгоритм виявляє постійні зміни в параметрах, що є ознакою процесів, які не можна виявити простим аналізом одноразових значень;
- трендовий аналіз дозволяє оцінити зміни в часі та виявити потенційні порушення герметичності ще на ранніх етапах, навіть якщо ці зміни не перевищують порогових значень.

Переваги: може виявляти малозначні витіки, що не викликають різких коливань параметрів; дозволяє діагностувати проблеми на ранніх стадіях (наприклад, мікротріщини або початкові дефекти); підвищує чутливість системи моніторингу до поступових змін у параметрах.

Недоліки: потребує довготривалого моніторингу параметрів для виявлення змін трендів; може виникати проблема з фільтрацією шуму — випадкові або незначні зміни, які не пов'язані з реальними порушеннями герметичності, можуть впливати на результати.

Алгоритм потребує детального налаштування для кожної конкретної установки, що може бути важким на практиці. Цей метод зазвичай використовується в більш складних системах, де потрібен високий рівень чутливості для виявлення мінімальних змін у системі.

Нейронні мережі та інші методи машинного навчання (ML) дозволяють значно покращити точність і чутливість систем моніторингу герметичності. Вони здатні вивчати патерни в даних, виявляючи складні взаємозв'язки між різними параметрами і їх змінами. Нейронні мережі можуть забезпечити високий рівень точності виявлення порушень навіть при мінімальних змінах параметрів.

Основні характеристики:

- використовують великі обсяги даних для навчання і вдосконалення алгоритмів;
- алгоритми можуть включати глибокі нейронні мережі (deep learning) для виявлення складних залежностей і аномалій;
- потрібна велика кількість історичних даних для тренування моделей.

Переваги: можливість виявлення скритих взаємозв'язків між параметрами, які можуть бути неочевидними при традиційному аналізі; нейронні мережі здатні покращувати точність виявлення витоків навіть при незначних змінах в параметрах, що дозволяє зменшити ймовірність пропущених порушень; висока здатність до самонавчання, що дозволяє адаптувати систему до нових умов і змін у параметрах установки.

Недоліки: потрібна велика кількість високоякісних даних для тренування нейронних мереж, що може бути складним завданням в умовах атомних станцій; часова затримка на етапі навчання моделі; нейронні мережі є "чорними ящиками", і пояснити точну причину помилки може бути складно.

Ці алгоритми знаходять застосування в ситуаціях, де традиційні методи не забезпечують достатньої точності або чутливості.

Методи математичного моделювання використовуються для симуляції поведінки системи при виникненні різних неполадок, у тому числі порушень герметичності. Вони дозволяють створювати детальні моделі роботи ядерних реакторів або окремих елементів системи та перевіряти їхню стійкість до різних сценаріїв.

Основні характеристики:

- включають моделювання фізичних процесів в реакторі та навколишніх системах, таких як теплообмін, потік рідин, зміни тиску та температури;
- алгоритми використовують чисельні методи для розв'язання рівнянь, що описують поведінку системи в різних умовах.

Переваги: прогнозування розвитку витоків і можливих аварійних ситуацій; можливість поєднання результатів реальних вимірювань із результатами моделювання для більш точного виявлення проблем; покращення планування технічного обслуговування та прогнозування збоїв.

Недоліки: складність в моделюванні реальних умов роботи ядерних реакторів, де можуть бути непередбачувані фактори; високі вимоги до обчислювальних ресурсів для виконання складних симуляцій.

Таким чином, існуючі алгоритми моніторингу герметичності на атомних електростанціях варіюються від простих порогових методів до складних технік, що включають машинне навчання та математичне моделювання. Кожен з цих підходів має свої переваги та недоліки, і на практиці для досягнення високої надійності та точності виявлення порушень герметичності застосовується комбінований підхід. Вибір алгоритму залежить від конкретних умов експлуатації, технічних характеристик обладнання та вимог до безпеки.

Крім алгоритмів, що використовують стандартні методи, також широко застосовуються методи аналізу великих даних для моніторингу герметичності в ядерних установках. Завдяки постійній генерації величезної кількості даних від сенсорів, обладнання та моніторингових систем, з'явилася можливість застосовувати складніші аналітичні підходи для обробки цієї інформації. Можливість аналізувати дані в реальному часі дає змогу оперативно виявляти аномалії, що можуть свідчити про потенційні витoki чи порушення герметичності.

Основні характеристики:

- збір та обробка масивів даних з численних датчиків і сенсорів в режимі реального часу;
- використання методів класифікації, кластеризації та регресії для аналізу даних та виявлення аномалій;
- використання алгоритмів для виявлення патернів і трендів в даних, що можуть свідчити про порушення герметичності на ранніх етапах.

Переваги: застосування широкого спектра джерел даних дозволяє виявляти навіть непомітні витoki або дефекти, що не відображаються на одному параметрі; можливість виявлення незвичних патернів поведінки системи, які можуть бути сигналом до можливого витoku чи інших проблем з герметичністю; аналіз у реальному часі дозволяє оперативно реагувати на зміни і мінімізувати ризики.

Недоліки: для ефективного застосування необхідно мати потужні обчислювальні ресурси та програмне забезпечення для обробки великих обсягів даних; проблеми з інтерпретацією результатів аналізу: іноді система може виявляти несподівані аномалії, які потребують додаткової перевірки, що може призвести до помилкових тривог. Ці алгоритми є важливим елементом для інтеграції різних сенсорних систем та вдосконалення процесу моніторингу в реальному часі.

З огляду на складність і багатогранність систем ядерних реакторів, для забезпечення високої точності моніторингу герметичності часто використовуються комбіновані підходи, що поєднують кілька алгоритмів і методів в одному рішенні. Це дозволяє отримати більш повну картину стану обладнання, покращити точність виявлення проблем та забезпечити кращу надійність.

Основні характеристики:

- поєднання різних алгоритмів: порогових, трендових, нейронних мереж, математичного моделювання та інших;
- інтеграція даних з різних джерел, таких як сенсори температури, тиску, концентрації газів, радіаційного фону та інших параметрів, що дозволяє створювати більш надійні і стійкі до помилок системи моніторингу;
- використання методів синтезу даних, щоб на основі різних результатів моніторингу та моделювання обчислювати загальний рівень ризику.

Переваги: підвищення чутливості і точності системи моніторингу; можливість більш детального прогнозування ризиків порушень герметичності; зменшення ймовірності помилкових спрацьовувань та помилок, що можуть виникати при використанні одного методу.

Недоліки: збільшення складності системи: поєднання кількох алгоритмів потребує високих обчислювальних ресурсів і може ускладнити підтримку системи; потрібна детальна координація різних методів для уникнення суперечливих або непорозумінь між результатами різних алгоритмів.

Штучний інтелект (ШІ) стає важливим інструментом для підвищення ефективності моніторингу герметичності на атомних станціях. Завдяки здатності до самонавчання та адаптації до змінних умов експлуатації, системи ШІ можуть забезпечити постійно оновлюванні прогнози щодо стану обладнання та ризиків порушень герметичності.

Основні характеристики:

- використання алгоритмів глибокого навчання для створення моделей, що можуть прогнозувати поведінку системи на основі історичних даних і реальних вимірювань;
- інтелектуальна обробка даних, що дозволяє автоматично знаходити залежності між параметрами і на основі цього приймати рішення щодо виявлення витоків або інших неполадок;
- можливість інтеграції з іншими системами (наприклад, системами управління реактором або аварійними протоколами), щоб забезпечити автоматичну реакцію на виявлені проблеми.

Переваги: висока здатність до самонавчання та адаптації до нових умов, що підвищує ефективність моніторингу в умовах змінюваних параметрів; прогнозування можливих витоків, навіть якщо ці витoki поки що не виявляються в реальному часі; зменшення кількості помилкових спрацьовувань за рахунок здатності системи самостійно коригувати пороги і адаптуватися до нових умов.

Недоліки: потрібна велика кількість якісних даних для тренування системи; "Чорний ящик" ШІ: у разі неполадок або помилок може бути складно зрозуміти причину, чому ШІ прийняв певне рішення.

Таким чином, алгоритми моніторингу герметичності ядерних реакторів значно розвинулися за останні десятиліття, завдяки використанню новітніх технологій та методів обробки даних. Від традиційних порогових методів до складних підходів на основі машинного навчання і штучного інтелекту, сучасні системи моніторингу здатні забезпечити високий рівень безпеки і точності виявлення порушень герметичності.

Різноманітність методів дозволяє вибирати оптимальні рішення для конкретних умов експлуатації та специфічних характеристик ядерних установок. Водночас, комбіновані підходи, що інтегрують кілька технологій, обіцяють значне підвищення ефективності моніторингу, знижуючи ризики помилок і покращуючи загальну безпеку. З розвитком технологій штучного інтелекту та аналізу великих даних, можна очікувати, що моніторинг герметичності стане ще більш точним і адаптивним, що дозволить зменшити ймовірність аварійних ситуацій і покращити довгострокову безпеку ядерної енергетики.

1.4 Проблеми та обмеження існуючих систем моніторингу герметичності

Існуючі системи моніторингу герметичності ядерних реакторів мають низку проблем і обмежень: чутливість до зовнішніх факторів.

Багато методів моніторингу можуть бути чутливими до змін температури, тиску та інших зовнішніх умов, що може призвести до помилок в діагностиці.

Багато з сучасних технологій моніторингу, таких як лазерні системи або ультразвукові датчики, є дорогими і потребують постійного обслуговування.

Багато існуючих систем можуть не виявити малі витіки на ранніх етапах, коли їх усунення могло б значно зменшити ризики.

Більшість існуючих систем здатні лише виявляти порушення герметичності, але не можуть прогнозувати ймовірність їх виникнення або оцінити можливі наслідки.

Часто існуючі системи моніторингу не інтегровані з іншими системами управління і безпеки реактора, що може призводити до неефективного використання даних і запізнених реакцій на проблеми.

Розглянемо ключові вимоги до систем моніторингу герметичності для забезпечення безпеки реактора. Системи моніторингу герметичності ядерного

реактора повинні відповідати низці вимог, щоб забезпечити високий рівень безпеки:

Висока чутливість і точність. Система повинна бути здатна виявляти навіть незначні витoki і зміни параметрів на ранніх стадіях.

Надійність і безвідмовність. Для забезпечення безпеки реактора система повинна працювати безперервно протягом довгого часу, з мінімальними перервами на технічне обслуговування.

Інтеграція з іншими системами. Система повинна бути частиною загальної архітектури безпеки, взаємодіяти з іншими системами моніторингу та контролю для забезпечення швидкої реакції на виникаючі загрози.

Можливість прогнозування витоків. Система повинна мати можливість прогнозувати потенційні витoki та вживати превентивних заходів до того, як вони стануть серйозною проблемою.

Економічна ефективність. Враховуючи високу вартість ядерних установок, система моніторингу повинна бути не лише високоефективною, а й економічно обґрунтованою.

Простота обслуговування та калібрування. Система повинна бути легкою у обслуговуванні, мати можливість автоматичного калібрування та бути готовою до роботи в будь-який момент часу.

Це дає комплексний огляд основних теоретичних аспектів і сучасних підходів до моніторингу герметичності елементів ядерного реактора, а також визначає ключові проблеми, з якими стикаються існуючі системи, і вимоги до нових технологій моніторингу.

Висновки до розділу 1

У першому розділі магістерської роботи було проведено вивчення теоретичних основ та аналіз існуючих систем моніторингу герметичності ядерного реактора, що надає фундаментальне розуміння важливості забезпечення герметичності елементів ядерного реактора, як ключового компонента безпеки в атомній енергетиці. Принципи роботи ядерного реактора базуються на контролюваному процесі ядерного розпаду, в результаті якого генерується велика кількість тепла, що використовується для виробництва електричної енергії. Проте, з огляду на високі температури, тиски та радіаційну небезпеку, герметичність елементів реактора є критично важливою для запобігання витокам радіоактивних матеріалів у навколишнє середовище, що може призвести до серйозних аварійних ситуацій.

У результаті аналізу існуючих методів моніторингу герметичності в атомній енергетиці було виявлено, що на сьогодні застосовуються різноманітні технології та методи для виявлення порушень герметичності. Серед найбільш поширених — візуальні методи, методи контролю тиску, витоків газів, ультразвукові та радіаційні методи, а також лазерні та математичні моделі. Всі ці методи дозволяють виявляти навіть незначні порушення герметичності на різних етапах експлуатації.

Огляд існуючих алгоритмів моніторингу та контролю герметичності показав, що на сьогодні використовуються як прості порогові методи, так і складніші системи на основі аналізу трендів, нейронних мереж і машинного навчання. Прості алгоритми можуть бути корисними для оперативного виявлення значних порушень, тоді як більш складні підходи дозволяють виявляти поступові зміни і мінімальні витoki, що дає можливість реагувати на потенційні загрози на ранніх стадіях. Однак важливо зазначити, що в багатьох випадках наявні методи мають свої обмеження, зокрема в точності виявлення дрібних витоків або в здатності враховувати всі змінні, що впливають на систему.

Не менш важливою є оцінка проблем і обмежень існуючих систем моніторингу герметичності. Хоча більшість технологій на сьогодні є досить ефективними, є кілька проблем, таких як висока вартість обслуговування і встановлення сенсорних систем, складність інтеграції різних методів в одну систему, а також обмеження в точності при використанні окремих методів, що можуть призвести до помилкових спрацьовувань або невиявлення малих витоків.

Для забезпечення максимальної безпеки ядерного реактора ключовими вимогами до систем моніторингу герметичності є висока точність, надійність, здатність до інтеграції з іншими системами контролю та управління реактором, а також можливість моніторингу в реальному часі. Крім того, системи повинні бути адаптивними до змін умов експлуатації і здатними до самонавчання для ефективного виявлення нових типів порушень герметичності.

Загалом, у зв'язку з підвищеними вимогами до безпеки в атомній енергетиці, постійний розвиток нових методів і алгоритмів моніторингу герметичності є необхідним для зменшення ризиків і підвищення ефективності експлуатації ядерних установок. Інтеграція сучасних технологій, таких як машинне навчання і великий аналіз даних, а також вдосконалення існуючих систем, стане важливим кроком у забезпеченні безпеки ядерних реакторів в майбутньому.

Розвиток технологій моніторингу герметичності в атомній енергетиці є важливим аспектом для зниження ризиків аварій і покращення безпеки експлуатації ядерних установок. Визначення і впровадження найефективніших методів і алгоритмів моніторингу герметичності дозволяє не лише підвищити точність виявлення порушень, але й значно знизити можливість їх виникнення завдяки більш глибокому аналізу даних і вдосконаленню систем контролю.

Враховуючи результати проведеного аналізу, можна виділити кілька ключових напрямків для подальшого вдосконалення систем моніторингу герметичності:

Інтеграція нових технологій: Технології штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання відкривають нові горизонти для покращення ефективності моніторингу. Використання цих технологій дозволяє системам навчатися на основі зібраних даних і адаптувати свої стратегії виявлення порушень герметичності до змінюваних умов експлуатації. Впровадження таких методів дозволяє не лише підвищити точність виявлення витоків, а й прогнозувати можливі проблеми до того, як вони стануть критичними.

Комплексний підхід до моніторингу: Враховуючи складність і взаємозв'язок різних компонентів ядерного реактора, ефективне моніторингування потребує інтеграції кількох методів. Комбінування ультразвукових, радіаційних, лазерних і математичних методів з технологіями машинного навчання дає можливість створити більш точні та надійні системи моніторингу, здатні виявляти навіть найменші зміни у параметрах, що можуть вказувати на порушення герметичності.

Адаптивні та автономні системи: Системи моніторингу повинні бути здатні до автономної роботи та самостійно коригувати параметри порогових значень залежно від змін умов навколишнього середовища, технічного стану обладнання та етапу експлуатації реактора. Вдосконалення алгоритмів адаптивного управління дозволить знизити ймовірність помилкових спрацьовувань та підвищити ефективність реагування на потенційні загрози.

Розвиток стандартів та регламентів: З урахуванням швидкого розвитку технологій та нових методів моніторингу герметичності необхідно постійно оновлювати та вдосконалювати нормативно-правову базу. Оновлення стандартів дозволить забезпечити їх відповідність сучасним вимогам безпеки та інтеграції новітніх технологій в експлуатацію атомних станцій. Водночас, розвиток міжнародних стандартів у галузі ядерної безпеки стане важливим

фактором для забезпечення узгодженості практик моніторингу герметичності в різних країнах.

Моделювання та прогнозування: Використання математичних моделей для симуляції поведінки системи та прогнозування розвитку можливих аварійних ситуацій є важливим інструментом для оперативного реагування на зміни в стані реактора. Розвиток таких методів дозволяє на ранніх етапах виявляти потенційні проблеми, не чекаючи фактичного прояву порушень герметичності.

Зниження витрат на обслуговування та модернізацію: Враховуючи значні витрати на обслуговування та встановлення сенсорних систем, важливо приділяти увагу оптимізації витрат за допомогою використання більш ефективних технологій і автоматизованих систем обробки даних. Водночас, це дозволить знизити ризики помилок, що виникають через людський фактор при обробці великої кількості інформації.

Таким чином, розв'язання проблем, пов'язаних з моніторингом герметичності елементів ядерного реактора, потребує комплексного підходу, що поєднує новітні технології, алгоритмічні методи, інтелектуальні системи та нормативні ініціативи. Інтеграція та адаптація таких технологій у рамках міжнародних стандартів дозволить підвищити ефективність і безпеку експлуатації ядерних реакторів та забезпечить надійний захист від можливих витоків радіоактивних матеріалів, що є критично важливим для збереження безпеки і довкілля.

РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ МОНІТОРИНГУ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

У цьому розділі детально розглядаються алгоритми, які використовуються для моніторингу герметичності елементів ядерного реактора. Важливість герметичності не можна переоцінити, оскільки її порушення може призвести до витоку радіоактивних матеріалів і серйозних аварій. Тому розробка ефективних алгоритмів для моніторингу герметичності є однією з ключових складових забезпечення безпеки ядерних установок. У розділі аналізуються параметри герметичності, методи збору та обробки даних, оцінка ефективності існуючих алгоритмів, а також математичне моделювання і розробка нових алгоритмів для автоматизованої оцінки герметичності.

2.1 Визначення параметрів герметичності елементів ядерного реактора

Герметичність елементів ядерного реактора визначається через параметри, які можуть безпосередньо вказувати на порушення герметичності. До основних параметрів, що підлягають моніторингу, відносяться:

Тиск в контурі теплоносія: зниження тиску може вказувати на витік або втрату герметичності в системах охолодження або у самому корпусі реактора. Тому в системах моніторингу зазвичай використовуються датчики тиску в різних точках системи охолодження.

Температура: зміна температури в активній зоні або в системах теплообміну може свідчити про порушення герметичності або інші аномалії, пов'язані з теплообмінними процесами.

Концентрація газів: у разі витоків певних газів, таких як гелій, водень або кисень, їх концентрація в системі може змінюватися. Моніторинг

концентрації газів дає можливість виявляти витoki радіоактивних матеріалів або інертних газів, що використовуються для охолодження.

Рівень радіації: будь-яке порушення герметичності в активній зоні або в ізоляційних матеріалах може призвести до підвищення рівня радіації в певних точках реактора, що потребує негайного виявлення та оцінки.

Механічні деформації: деформація металевих конструкцій, тріщини в корпусі реактора або трубопроводах можуть бути сигналом витоків. Для виявлення таких порушень використовуються ультразвукові або рентгенівські методи.

Витoki теплоносія: зміни в температурному режимі теплоносія можуть вказувати на витoki в системах охолодження або на порушення герметичності в інших критичних частинах реактора.

У ядерних реакторах герметичність є ключовим фактором для забезпечення безпеки. Порушення герметичності може призвести до серйозних наслідків, зокрема витoku радіоактивних матеріалів, що загрожує не тільки безпеці персоналу, але й навколишньому середовищу. Для своєчасного виявлення таких порушень необхідно постійно моніторити ряд фізичних та хімічних параметрів, які безпосередньо пов'язані з герметичністю елементів реактора. Розглянемо детальніше ці параметри.

Тиск в системах охолодження ядерного реактора є критичним параметром, що безпосередньо впливає на герметичність. У ядерному реакторі теплоносії (зазвичай вода або рідкий метал) циркулює через активну зону для відведення тепла, яке виділяється при ядерному розпаді. Зниження тиску в теплоносії може вказувати на витік через порушення герметичності в трубопроводах або корпусі реактора.

Моніторинг тиску: У системах моніторингу використовуються датчики тиску (манометри), які встановлюються на критичних ділянках трубопроводів теплоносія та на виході з реактора. Ці датчики дозволяють постійно вимірювати рівень тиску у різних точках системи. Якщо тиск знижується, це може вказувати на витік теплоносія з однієї з частин системи. Зниження тиску

призводить до зменшення температури в системі, що, у свою чергу, може вплинути на стабільність ядерного реактора.

Проблеми при порушенні герметичності: Тиск, що падає, може бути спричинений різними факторами: від витоків теплоносія до несправностей в елементах герметизації. Витік може мати локальний характер (наприклад, тріщина у трубопроводі), або бути масштабним (порушення герметичності в основному корпусі реактора). Технічні заходи: для зменшення ймовірності таких порушень у конструкціях застосовуються міцні матеріали і технології герметизації. У випадку падіння тиску в системі вживаються заходи для аварійного зупинення реактора.

Температура є ще одним важливим параметром для моніторингу герметичності елементів реактора. Зміна температури в активній зоні або в системах теплообміну може вказувати на порушення герметичності або інші технічні аномалії.

Моніторинг температури: У реакторах встановлені термопари та датчики температури, які вимірюють температуру теплоносія, активної зони, теплообмінників і інших критичних компонентів. Температурні зміни вказують на зміну режиму роботи реактора, що може бути викликано зміною герметичності, наприклад, витокі теплоносія або порушенням циркуляції.

Проблеми при порушенні герметичності:

- підвищення температури може свідчити про недостатнє охолодження активної зони, що призводить до перегріву паливних елементів і зниження ефективності охолодження. Це може бути наслідком витоків теплоносія, що знижує теплообмін;

- падіння температури може бути результатом зменшення тиску, що вказує на порушення герметичності в трубопроводах або теплообмінних системах. Для контролю таких відхилень важливим є використання систем автоматичного регулювання температури.

Порушення герметичності у деяких випадках можна виявити через зміни концентрації специфічних газів у системі. Найчастіше мова йде про гелій,

водень або кисень, які використовуються в якості інертних газів в системах охолодження.

Моніторинг концентрації газів: У реакторах для виявлення витоків використовуються газові детектори, які вимірюють концентрацію певних газів. Наприклад, гелій може використовуватися для виявлення витоків в системах охолодження, оскільки він є інертним газом, який не вступає в хімічні реакції і має низьку молекулярну масу. В системах аварійного охолодження можуть використовуватися датчики для виявлення концентрації водню або кисню, щоб визначити витoki або зміни в хімічному складі середовища.

Проблеми при порушенні герметичності:

- збільшення концентрації гелію може свідчити про витік в закритій системі теплоносія, де цей газ використовувався для герметизації. Подібні витoki можуть бути причиною зниження тиску і температури в системі охолодження;

- витoki водню можуть бути ознакою порушення герметичності в реакторі, де водень використовується в якості інертного газу або охолоджувального середовища.

Рівень радіації є одним з найважливіших параметрів для моніторингу в ядерних реакторах. Порушення герметичності в активній зоні або в ізоляційних матеріалах може призвести до підвищення рівня радіації в певних точках реактора, що потребує негайного виявлення та оцінки.

Моніторинг радіації: У реакторах постійно працюють датчики радіації, які контролюють рівень випромінювання в різних частинах реактора, включаючи активну зону, корпус і зовнішнє середовище. Високий рівень радіації може свідчити про порушення герметичності в активній зоні, де знаходяться паливні елементи. Якщо рівень радіації в межах реактора або в навколишньому середовищі значно зростає, це є сигналом для негайного втручання.

Проблеми при порушенні герметичності:

- витоки радіоактивних матеріалів можуть статися через тріщини в корпусі реактора або пошкодження оболонок паливних елементів, що може призвести до серйозних аварійних ситуацій, таких як радіоактивне забруднення навколишнього середовища. Рішення для усунення витоків радіації полягають у ретельному обстеженні конструкцій, перевірці матеріалів герметизації та заміні дефектних елементів.

Механічні деформації, такі як тріщини, вм'ятини або зсуви металевих конструкцій реактора, можуть бути індикатором порушення герметичності. Такі деформації зазвичай відбуваються через високі температури і тиск, що виникають під час експлуатації.

Моніторинг механічних деформацій: Для виявлення таких порушень використовуються ультразвукові методи, рентгенографія або методи магнітної індукції, які дозволяють виявити тріщини або порушення структури металу в важкодоступних місцях. Деформації можуть бути спричинені температурними навантаженнями, внутрішнім тиском або втомою матеріалу в результаті довготривалого використання.

Проблеми при порушенні герметичності:

- механічні тріщини або деформації можуть призвести до витоків теплоносія або радіоактивних матеріалів;
- погіршення механічних властивостей матеріалу з часом веде до зниження ефективності герметизації і підвищення ризику аварій.

Витоки теплоносія — ще одна важлива проблема, що може бути викликана порушеннями герметичності в трубопроводах або інших системах реактора.

Моніторинг витоків теплоносія: За допомогою температурних датчиків, датчиків тиску та газових детекторів можна виявляти аномалії в температурі і тиску в системах охолодження, що свідчать про можливі витоки теплоносія.

Проблеми при порушенні герметичності: витік теплоносія може призвести до перегріву реактора або зниження ефективності охолодження активної зони, що може бути небезпечним для стабільної роботи реактора.

2.2 Методи збору та обробки даних для моніторингу герметичності

Для ефективного моніторингу герметичності необхідно не лише встановити відповідні датчики, але й налаштувати систему збору та обробки даних. Ось основні методи збору та обробки даних:

Сенсори та датчики: Параметри тиску та температури зчитуються за допомогою прецизійних датчиків, встановлених у різних точках реактора.

Датчики газів (наприклад, для гелію або водню) використовуються для виявлення витоків газів, які можуть свідчити про порушення герметичності.

Датчики радіації моніторять рівень радіаційного випромінювання у зонах, де можливі витoki радіоактивних матеріалів.

Системи збору даних: Цифрові платформи збору даних дозволяють централізовано обробляти всі показники, що надходять від різних датчиків. Зібрані дані можуть бути передані до центрального процесора або на сервери для подальшого аналізу. Системи автоматизованого контролю (SCADA) є основним інструментом для реального моніторингу стану ядерного реактора. Вони дозволяють здійснювати постійний збір даних і автоматичне попередження в разі відхилень від встановлених норм.

Обробка та аналіз даних: Алгоритми фільтрації та згладжування використовуються для зменшення впливу шуму та спотворених даних. Це важливо для точності виявлення навіть мінімальних відхилень.

Моделі прогнозування дозволяють передбачити можливі зміни в параметрах герметичності на основі попередніх даних, що дозволяє своєчасно виявляти потенційні проблеми.

Інтеграція з іншими системами: Системи моніторингу стану обладнання дозволяють синхронізувати дані з іншими критичними параметрами реактора, що сприяє більш точному аналізу герметичності.

Розглянемо методи збору та обробки даних для моніторингу герметичності.

Моніторинг герметичності ядерного реактора неможливий без надійних і точних методів збору та обробки даних, які забезпечують оперативне виявлення порушень герметичності і попереджають про можливі аварії. Для цього використовуються спеціалізовані сенсори, системи збору даних та методи обробки, які дозволяють аналізувати величезні обсяги інформації і своєчасно реагувати на будь-які зміни в параметрах, що вказують на порушення герметичності.

Першим етапом моніторингу є збір даних із різних сенсорів та датчиків, що встановлені в критичних точках реактора для вимірювання параметрів, що безпосередньо пов'язані з герметичністю. Ось основні типи датчиків, які використовуються в системах моніторингу:

Прецизійні датчики для вимірювання тиску і температури використовуються для постійного моніторингу в контурі теплоносія, активній зоні реактора та в інших критичних частинах системи. Зниження тиску або зміна температури можуть сигналізувати про порушення герметичності або інші технічні аномалії, такі як витoki теплоносія або зменшення ефективності охолодження.

Для вимірювання цих параметрів використовуються:

1. Датчики тиску: Установлюються на різних етапах системи охолодження (наприклад, в трубопроводах та теплообмінниках). Вони контролюють можливі витoki, оскільки зміни тиску можуть бути одними з перших ознак порушення герметичності.

2. Датчики температури: Встановлюються на виході теплоносія, у системах охолодження та активній зоні, де температура є ключовим показником нормальної роботи реактора.

3. Датчики газів (гелію, водню, кисню). Для виявлення витоків газів використовуються спеціалізовані датчики, які вимірюють концентрацію інертних газів (наприклад, гелію або водню) або кисню. Якщо гази витікають через тріщини або порушення герметичності, зміни їх концентрації можуть бути сигналом для виявлення проблем.

4. Датчики для гелію використовуються в системах, де гелій застосовується для охолодження. Гелій є газом, який не вступає в хімічні реакції і швидко виявляється при витокі.

5. Датчики водню можуть використовуватись для контролю за рівнем водню в реакторі, оскільки зміни концентрації водню можуть свідчити про порушення герметичності систем охолодження або контурів водяного пара.

6. Датчики кисню дозволяють виявити зміни в хімічному складі атмосфери в реакторі, що можуть бути наслідком витоків у системах охолодження.

7. Датчики радіації. Важливими є також датчики радіації, які дозволяють вимірювати рівень радіаційного випромінювання в різних точках реактора, в тому числі в активній зоні та на виході з системи охолодження. Порушення герметичності в зонах, де знаходяться радіоактивні матеріали, може призвести до підвищення рівня радіації. Радіаційні датчики здатні своєчасно сигналізувати про надмірний рівень радіації, що є важливим індикатором витоків радіоактивних матеріалів.

8. Механічні датчики. Для виявлення механічних дефектів, таких як тріщини чи деформації конструкцій, можуть використовуватись ультразвукові датчики та методи рентгенівської дефектоскопії. Ці датчики здатні виявити мікротріщини, зношування матеріалів та інші дефекти, які можуть призвести до порушення герметичності.

Для ефективного збору даних з численних датчиків необхідні спеціалізовані платформи, які забезпечують централізовану обробку та передачу даних в реальному часі.

Для збору та зберігання даних від датчиків використовуються цифрові платформи, які дозволяють організувати централізовану базу даних для зберігання показників температури, тиску, концентрації газів та інших параметрів. Ці платформи надають змогу здійснювати доступ до даних в реальному часі для аналізу та прийняття рішень.

SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition) використовуються для моніторингу та управління ядерними реакторами. Вони дозволяють здійснювати постійний збір даних, на основі яких можна виявляти аномальні відхилення від норми (зниження тиску, підвищення температури тощо). Крім того, SCADA-системи можуть бути налаштовані на автоматичне попередження операторів у разі виявлення порушень герметичності або інших критичних відхилень.

Використання віддалених платформ для збору і аналізу даних дозволяє операторам отримувати інформацію з будь-якої точки світу, що є особливо важливим для моніторингу критичних параметрів, таких як герметичність, в реальному часі.

Зібрані дані повинні бути оброблені та проаналізовані для виявлення потенційних порушень герметичності. Це здійснюється за допомогою різних алгоритмів і моделей прогнозування.

Для забезпечення точності даних використовуються алгоритми фільтрації та згладжування. Вони допомагають зменшити вплив шуму і спотворених даних, які можуть виникати через механічні або електричні помилки в роботі датчиків. Наприклад, в разі короточасних відхилень показників, пов'язаних з коливаннями температури чи тиску, алгоритми фільтрації можуть ігнорувати незначні спотворення і зберігати тільки істотні відхилення.

На основі зібраних даних здійснюється аналіз трендів (динаміки змін) параметрів герметичності, що дозволяє передбачити можливі порушення до того, як вони стануть критичними. Для цього використовуються алгоритми, які вивчають закономірності змін параметрів за певний період, виявляючи відхилення від нормальних значень.

Використання математичних моделей для прогнозування витоків та інших порушень герметичності є важливим елементом для оперативного реагування. Моделі прогнозування базуються на даних з датчиків та попередньому досвіді роботи реактора. Вони дозволяють передбачити

майбутні зміни в параметрах, що дає змогу своєчасно вжити заходів щодо попередження витоків або аварій.

Важливо, щоб системи моніторингу герметичності були інтегровані з іншими системами моніторингу обладнання та управління енергетичними процесами в реакторі. Це дозволяє отримувати комплексний аналіз стану всіх ключових параметрів і точно оцінювати вплив на герметичність з урахуванням роботи інших елементів реактора (охолодження, паливо, радіація тощо).

Таким чином, для забезпечення ефективного моніторингу герметичності елементів ядерного реактора необхідно застосовувати сучасні методи збору та обробки даних, які дозволяють своєчасно виявляти навіть незначні порушення герметичності. Важливу роль у цьому процесі відіграють прецизійні датчики, які дозволяють вимірювати ключові параметри (тиск, температура, концентрація газів, рівень радіації), а також надійні системи збору та аналізу даних, що дозволяють оперативно реагувати на зміни у параметрах. Тільки завдяки ефективній обробці та аналізу даних можна забезпечити безпеку експлуатації ядерного реактора і своєчасно виявляти потенційні загрози для безпеки.

Розглянемо оцінку ефективності існуючих алгоритмів моніторингу герметичності. Оцінка ефективності алгоритмів моніторингу герметичності є ключовим етапом для забезпечення надійності системи моніторингу. Важливими критеріями для оцінки є:

- чутливість та точність: алгоритм повинен виявляти навіть найменші порушення герметичності без помилок і пропусків;
- швидкість реакції: система повинна забезпечити своєчасну реакцію на будь-які зміни, які можуть свідчити про порушення герметичності;
- надійність та стабільність: алгоритм не повинен давати хибних спрацьовувань або пропускати критичні витoki;
- інтеграція з іншими системами: алгоритм має бути частиною загальної системи управління реактором, що дозволяє автоматично коригувати операційні режими в разі виявлення порушень.

Для оцінки ефективності використовуються: тести на основі моделювання, що дозволяють перевірити, як алгоритм реагує на різні типи витоків; порівняння результатів з реальними вимірюваннями та історичними даними.

Висновки до розділу 2

У другому розділі роботи були визначені основні вимоги та завдання, щодо сучасних алгоритмів моніторингу герметичності елементів ядерного реактора, що дозволяє зробити кілька важливих висновків щодо ефективності та перспектив удосконалення існуючих систем. Визначення параметрів герметичності, методи збору і обробки даних, а також оцінка ефективності наявних алгоритмів відіграють ключову роль у забезпеченні безпеки ядерних установок. Ось основні висновки:

Визначення параметрів герметичності: Правильне визначення ключових параметрів герметичності, таких як тиск, температура, концентрація газів, рівень радіації, механічні деформації та витoki теплоносія, є основою для ефективного моніторингу. Кожен з цих параметрів має вирішальне значення для виявлення потенційних витоків та порушень герметичності. Вони дозволяють своєчасно реагувати на можливі аномалії, що можуть загрожувати безпеці реактора.

Методи збору та обробки даних: Для забезпечення стабільного функціонування системи моніторингу важливо використовувати надійні сенсори та датчики для збору даних з різних точок реактора. Передача цих даних на централізовану платформу з подальшою обробкою (фільтрація, згладжування, нормалізація) забезпечує точність і надійність аналізу. Важливою складовою є інтеграція з іншими критичними системами реактора, що дозволяє враховувати взаємозв'язки між різними параметрами для комплексного оцінювання герметичності.

Оцінка ефективності існуючих алгоритмів моніторингу: Існуючі алгоритми моніторингу герметичності, включаючи порогові методи, аналіз трендів та використання машинного навчання, показали високу ефективність у виявленні порушень герметичності на різних етапах експлуатації реактора. Проте кожен з методів має свої обмеження.

Порогові методи часто не здатні враховувати складні взаємозв'язки між параметрами, тоді як методи на основі машинного навчання можуть бути складними у реалізації і потребують великих обсягів даних для навчання моделей.

Перспективи вдосконалення алгоритмів: Для підвищення ефективності моніторингу герметичності важливо продовжувати розвиток алгоритмів, які здатні інтегрувати дані з різних джерел та використовувати сучасні методи прогнозування, зокрема на основі штучного інтелекту та машинного навчання. Це дозволить більш точно передбачати можливі витoki та порушення герметичності, а також зменшити кількість помилкових спрацювань тривоги.

Врахування новітніх технологій моделювання і симуляції для тестування реакторних систем в умовах різних сценаріїв витоків дозволить створювати більш точні математичні моделі, що є важливим кроком для оптимізації місць розташування датчиків і збільшення чутливості систем.

У результаті, вдосконалення алгоритмів моніторингу герметичності елементів ядерного реактора сприятиме значному підвищенню рівня безпеки атомних станцій, зменшенню ймовірності аварій та забезпеченню більш надійної експлуатації ядерних установок. Розвиток технологій збору і обробки даних, а також інтеграція методів прогнозування на основі машинного навчання, стане важливою складовою для забезпечення своєчасного виявлення порушень герметичності та своєчасного реагування на них.

Інтеграція нових технологій: Для покращення ефективності систем моніторингу важливо використовувати новітні технології, такі як сенсори нового покоління, лазерні та оптичні системи, а також бездротові мережі для збору даних в реальному часі. Технології дистанційного моніторингу і автоматизовані безпілотні системи для

огляду реакторів і їх елементів можуть значно підвищити точність збору даних і забезпечити безперервний контроль без ризику для персоналу.

Значення прогнозування в системах моніторингу: Прогнозування на основі попередніх даних і трендів є важливим напрямком для досягнення більш проактивного підходу до безпеки. Завдяки машинному навчанню та обробці великих обсягів даних, система може не тільки виявляти поточні витoki, а й прогнозувати потенційні проблеми, що з'являться у майбутньому. Це дозволяє заздалегідь вжити заходів для попередження аварій і забезпечення стабільної роботи реактора.

Міжнародні стандарти і безпека: Важливо також відзначити, що розробка алгоритмів моніторингу герметичності повинна відповідати міжнародним стандартам безпеки. Впровадження високих вимог до точності і надійності систем моніторингу дозволяє забезпечити відповідність системи найвищим вимогам безпеки. Адаптація національних і міжнародних стандартів до особливостей конкретних ядерних установок та технологій дозволить оптимізувати процеси і знизити ймовірність аварій.

Перспективи вдосконалення алгоритмів в умовах змінюваних умов експлуатації: Ядерні реактори часто працюють в умовах, що змінюються, таких як коливання температури, тиску, а також різноманітні зовнішні впливи (наприклад, землетруси, технічні модифікації або зміни в складі палива). Вдосконалення алгоритмів для адаптації до таких змін стане важливим кроком для підвищення ефективності і надійності системи. Алгоритми повинні бути здатні адаптуватися до нових умов, аналізуючи ймовірні зміни в параметрах, які впливають на герметичність елементів.

Можливості для майбутніх досліджень та розробок: Сучасний рівень розвитку алгоритмів і технологій моніторингу дає великі можливості для майбутніх досліджень у галузі автоматизованого

виявлення витоків і прогнозування їх розвитку. Одним із перспективних напрямків є використання глибокого навчання для обробки складних даних, що надходять від різних сенсорів і для моделювання складних фізичних процесів у реальному часі. Застосування квантових комп'ютерів для складних розрахунків у майбутньому може змінити підхід до виявлення порушень герметичності і суттєво підвищити точність і швидкість реакції.

Таким чином, у цьому розділі було розглянуто основні аспекти алгоритмів моніторингу герметичності елементів ядерного реактора, які включають визначення ключових параметрів, методи збору та обробки даних, а також оцінку ефективності існуючих підходів. Математичне моделювання і вдосконалення алгоритмів прогнозування дають можливість створювати точніші і більш адаптовані до реальних умов системи моніторингу. Розвиток таких алгоритмів, з урахуванням новітніх технологій, дозволить підвищити ефективність виявлення витоків, своєчасно реагувати на них і значно підвищити рівень безпеки ядерних установок.

Аналіз і вдосконалення існуючих систем моніторингу герметичності є ключовим елементом для забезпечення надійності та безпеки експлуатації ядерних реакторів, що вимагає інтеграції різних методів збору даних, їх обробки та ефективного прогнозування можливих порушень герметичності. Впровадження передових алгоритмів і технологій дозволить створити гнучкі системи моніторингу, які зможуть адаптуватися до змінюваних умов і гарантувати безпеку експлуатації ядерних об'єктів у майбутньому.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГЕРМЕТИЧНОСТІ В СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

3.1 Математичне моделювання процесів герметичності в системах моніторингу

Математичне моделювання є важливим і потужним інструментом для аналізу та передбачення поведінки систем герметичності ядерного реактора. Використовуючи математичні моделі, можна симулювати різні сценарії витоків, прогнозувати реакцію системи на порушення герметичності, а також оцінювати стійкість реактора в умовах аномальних ситуацій. Математичне моделювання також дозволяє оптимізувати роботу систем моніторингу герметичності, включаючи розташування датчиків та визначення критичних зон реактора.

Симуляція сценаріїв витоків. Математичне моделювання процесів витоків є ключовим інструментом для оцінки потенційних наслідків порушень герметичності в реакторі. Цей підхід дозволяє моделювати різні сценарії витоків, включаючи витки теплоносія, радіоактивних матеріалів та інших робочих рідин. Для цього використовуються спеціалізовані моделі, які враховують фізичні та хімічні процеси в системах охолодження та теплообміну.

Моделювання витоків теплоносія. Витоки теплоносія можуть статися через малі тріщини або порушення герметичності в трубопроводах, теплообмінниках або інших елементах реактора. Математичні моделі дозволяють змоделювати зміну параметрів, таких як температура, тиск і витрати теплоносія, під час витoku. Це дає змогу передбачити, як витік вплине на охолодження активної зони реактора, а також на загальний тепловий баланс у системі. Моделювання таких витоків допомагає оцінити ймовірні наслідки для безпеки реактора і розробити відповідні заходи для усунення порушень герметичності.

Моделювання витоків радіоактивних матеріалів. Для симуляції витоків радіоактивних матеріалів використовуються моделі, які враховують як поведінку самих матеріалів, так і процеси їх взаємодії з оточуючим середовищем (викид в атмосферу, поширення радіоактивних часток). Це дозволяє передбачити масштаб витоку і розрахувати його потенційний вплив на навколишнє середовище та безпеку персоналу. Моделювання витоків радіоактивних матеріалів є важливим для оцінки ризиків і для планування аварійних заходів.

Прогнозування поведінки системи. Математичні моделі також використовуються для прогнозування того, як система буде реагувати на різні порушення герметичності, що дозволяє розробляти ефективні стратегії для усунення цих порушень і мінімізації їх впливу.

Прогнозування на основі рівнянь теплопередачі та гідродинаміки. Враховуючи фізичні закони теплопередачі та гідродинаміки, математичні моделі дозволяють прогнозувати реакцію системи теплообміну на витoki теплоносія, включаючи зміну температури в різних зонах реактора. Це дозволяє визначити, як швидко знизиться ефективність охолодження та як будуть змінюватися теплові потоки в реакторі після порушення герметичності.

Моделювання поведінки під час аварійних ситуацій. У разі серйозних витоків або пошкоджень, які можуть призвести до аварій, математичне моделювання допомагає прогнозувати розвиток аварійної ситуації і вплив на стабільність реактора. Це включає симуляцію сценаріїв зниження ефективності охолодження, зміни в тепловому балансі та інші критичні ситуації.

Аналіз стійкості системи. Аналіз стійкості системи в умовах порушень герметичності є важливою частиною математичного моделювання, оскільки він дозволяє оцінити, як система буде функціонувати в різних умовах, що змінюються, таких як зміни температури, тиску або концентрації газів.

Аналіз стійкості до змін тиску та температури. Моделювання процесів у системах охолодження та теплообміну дає змогу оцінити, як система буде реагувати на різні варіанти порушень герметичності. Наприклад, у разі

зниження тиску в трубопроводах або витокі теплоносія, математичні моделі можуть прогнозувати, чи здатна система компенсувати ці зміни і зберігати стабільну роботу.

Оцінка впливу змін газових концентрацій на герметичність. Зміни в концентрації газів, таких як гелій або водень, можуть вказувати на проблеми з герметичністю. Математичні моделі дозволяють прогнозувати, як зміни концентрацій газів впливають на загальну стійкість системи і як ці зміни можуть бути використані для виявлення витоків.

Оптимізація розташування датчиків. Математичні моделі можуть допомогти в оптимізації розташування датчиків, що є важливим аспектом для підвищення ефективності моніторингу герметичності. Правильне розташування датчиків дозволяє отримати найбільш точну та своєчасну інформацію про стан системи.

Моделювання зон ризику. Моделі можна використовувати для визначення зон з найбільшим ризиком порушення герметичності (наприклад, місця з найбільшими температурами або тисками), що дозволяє оптимізувати місця установки датчиків. Це дозволяє оперативно виявляти зміни, які можуть вказувати на порушення герметичності.

Інтеграція з іншими системами. Оптимізація датчиків також включає інтеграцію з іншими системами моніторингу, такими як системи контролю температури, тиску та радіації. Математичні моделі дозволяють синхронізувати дані з різних джерел для створення більш точного і надійного моніторингу.

Таким чином, математичне моделювання процесів герметичності в системах моніторингу є незамінним інструментом для покращення ефективності та безпеки ядерних установок. Це дозволяє прогнозувати можливі порушення герметичності, оцінювати вплив таких порушень на систему та розробляти стратегії для їх попередження. Моделювання допомагає не лише в симуляції витоків і аварійних ситуацій, а й у оптимізації розташування датчиків, що сприяє більш швидкому і точному виявленню

порушень. Завдяки цим можливостям, математичне моделювання є важливим інструментом для забезпечення надійної та безпечної експлуатації ядерних реакторів.

Математичне моделювання використовується для оцінки поведінки систем в умовах порушення герметичності, зокрема для моделювання витоків теплоносія, аналізу зміни температури, тиску та концентрації газів. Нижче наведено кілька прикладів таких моделей, а також формули, які можуть бути використані для розрахунків, як показано в табл. 3.1.

1. Моделювання витoku теплоносія через тріщину в трубопроводі. Одним із важливих аспектів моніторингу герметичності є прогнозування витоків теплоносія через тріщини в трубопроводах. Для цього використовуються рівняння, що описують зміну тиску та витрату рідини через отвори чи тріщини. Це рівняння базується на рівняннях Бернуллі та описує витік через тріщину, де різниця тиску є основним фактором, що впливає на витік. Важливо зауважити, що цей розрахунок дозволяє оцінити швидкість витoku, але для більш точного прогнозу слід враховувати також такі фактори, як температура та хімічний склад теплоносія.

2. Моделювання зміни температури при витoku теплоносія. Зміна температури в системі охолодження може бути індикатором порушення герметичності. Для моделювання температурних процесів в реакторі можна використати рівняння теплопередачі, яке описує перехід тепла між різними елементами системи. Це рівняння використовується для розрахунку розподілу температури у різних зонах реактора та виявлення аномальних температурних змін, які можуть бути пов'язані з витокom теплоносія.

3. Моделювання витоків газів через тріщину. Витоки інертних газів, таких як гелій або водень, можуть бути індикаторами порушення герметичності. Для моделювання витoku газу через тріщину можна використати рівняння ідеального газу та рівняння, подібне до моделі витoku теплоносія. Ця модель допомагає оцінити витік газу через тріщини в різних

системах, зокрема в контурі охолодження реактора, де зазвичай використовуються інертні гази.

4. Прогнозування рівня радіації при витокі. У разі витокі радіоактивних матеріалів рівень радіації в конкретній точці можна прогнозувати за допомогою формули для радіаційного потоку (табл. 3.1). Це рівняння описує розсіювання радіації в залежності від відстані від джерела витокі. При порушенні герметичності і витокі радіоактивних матеріалів необхідно розрахувати, як швидко змінюватиметься рівень радіації в залежності від місця розташування датчиків і ступеня витокі.

Таблиця 3.1

Математичні моделі для моніторингу герметичності

Параметр	Формула	Опис
Витік теплоносія	$Q = C \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P / \rho}$	Оцінка витокі теплоносія через тріщину або пошкодження трубопроводу
Зміна температури	$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \nabla^2 T$	Розподіл температури в середовищі, що допомагає виявити аномалії
Витік газу	$Q = C \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P \cdot M}{RT}}$	Оцінка витокі інертного газу через тріщину або отвор у системі
Прогнозування радіації	$I = \frac{I_0}{r^2}$	Розсіювання радіації від джерела витокі по відстані <i>r</i>

- де Q — витік газу (м³/с);
- C — коефіцієнт витокі (залежить від розміру тріщини);
- ΔP — різниця тиску (Па);
- M — молекулярна маса газу (кг/моль);
- R — універсальна газова стала (8.314 Дж/(моль·К);
- T — температура газу (К);
- t — час (с);
- α — коефіцієнт теплопровідності (м²/с);
- ∇² — оператор Лапласа.

Розглянемо пояснення до табл. 3.1:

Витік теплоносія: Розрахунок витоку теплоносія через тріщину в трубопроводі дає змогу оцінити можливу втрату теплоносія і, відповідно, зниження ефективності охолодження реактора. Використання формули Бернуллі дозволяє визначити кількість теплоносія, що витікає, у разі порушення герметичності.

Зміна температури: Рівняння теплопередачі використовується для прогнозування змін температури в різних частинах реактора. Виявлення аномальних температур може сигналізувати про порушення герметичності та погіршення умов охолодження.

Витік газу: Розрахунок витоку газу дозволяє виявити порушення герметичності, коли спостерігаються зміни в концентраціях газів, що використовуються для охолодження або як інертні середовища в реакторі.

Прогнозування рівня радіації: Оцінка рівня радіації в точках реактора є важливою для своєчасного виявлення витоків радіоактивних матеріалів, що є основною небезпекою при порушеннях герметичності в ядерних реакторах.

Ці моделі (табл. 3.1), допомагають не лише оцінювати стан герметичності реактора, а й сприяють своєчасному виявленню потенційних загроз для безпеки та ефективності роботи ядерної установки.

3.2 Розробка алгоритму для автоматизованої оцінки герметичності елементів реактора

Розробка алгоритмів для автоматизованої оцінки герметичності елементів ядерного реактора є важливою частиною системи моніторингу, яка має на меті забезпечення безпеки та ефективної експлуатації реактора. Оскільки ядерні реактори є складними технічними системами, де навіть незначні порушення герметичності можуть призвести до серйозних наслідків, створення таких алгоритмів вимагає комплексного підходу, що включає кілька етапів обробки даних.

Основні етапи автоматизованої оцінки герметичності елементів реактора:

1. Збір і передобробка даних. Збір даних з різних сенсорів і систем моніторингу є першим кроком у процесі автоматизованої оцінки герметичності. Для цього використовуються різноманітні датчики, такі як:

- датчики тиску в системах охолодження і корпусі реактора;
- датчики температури для моніторингу змін в активній зоні та системах теплообміну;
- датчики газів, що дозволяють виявляти зміни в концентрації інертних газів (гелій, водень) або радіоактивних ізотопів;
- датчики радіації для оцінки рівня радіаційного фону в різних точках реактора.

Після отримання даних важливо провести попередню обробку, яка включає:

Фільтрацію шуму: застосування фільтрів для усунення сторонніх сигналів або неточностей, що виникають через сенсорні помилки.

Згладжування даних: використання методів, таких як ковзне середнє або фільтри Калмана, для вирівнювання коливань і флуктуацій, що не є важливими для оцінки герметичності.

Нормалізація та стандартизація: для забезпечення однорідності даних різних датчиків і систем, особливо якщо використовуються різні одиниці вимірювання.

2. Аналіз трендів і виявлення аномалій. На наступному етапі алгоритм аналізує часове використання параметрів для виявлення аномалій. Це є важливим інструментом для виявлення потенційних порушень герметичності. Алгоритм може застосовувати кілька підходів для цього етапу:

Аналіз трендів: вивчення змін параметрів (наприклад, тиску, температури, рівня радіації) у часі дозволяє виявити непередбачувані або поступові зміни, які можуть бути ознаками витоків або порушення

герметичності. Це може включати як короткострокові, так і довгострокові зміни.

Методи виявлення аномалій: використовуються алгоритми для виявлення відхилень від нормального функціонування системи. До таких методів відносяться:

Статистичні методи: порівняння поточних значень з гісторичними даними або встановленими пороговими значеннями.

Методи на основі машинного навчання: такі як алгоритми класифікації, які можуть виявляти нетипові патерни або зміни в даних, не помітні за допомогою традиційних методів.

Ідентифікація причин аномалій: після виявлення аномалії алгоритм може використовувати додаткові індикатори або моделі для ідентифікації можливих причин проблем (наприклад, виток через тріщину в трубопроводі або зміни в температурному режимі).

3. Інтерпретація результатів. Після аналізу даних автоматизована система повинна надати інтерпретацію результатів. Це включає:

- визначення ступеня порушення герметичності: алгоритм оцінює, наскільки серйозним є порушення герметичності, і чи потребує воно негайного втручання;

- генерація звітів: система генерує звіти для операторів, що включають інформацію про виявлені аномалії, місце їх виникнення і можливі наслідки;

- прогнозування розвитку ситуації: на основі наявних даних та трендів система може прогнозувати, як ситуація розвиватиметься в майбутньому (наприклад, наскільки швидко зросте витік або чи може витік поширитися на інші частини реактора).

4. Прогнозування витоків за допомогою машинного навчання. Алгоритми машинного навчання можуть значно покращити точність прогнозування витоків і допомогти вчасно виявити можливі загрози. Вони аналізують великі обсяги історичних даних і виявляють залежності між

різними параметрами (наприклад, тиск, температура, концентрація газів). Два основних підходи до використання машинного навчання:

Нейронні мережі: глибокі нейронні мережі, особливо рекурентні нейронні мережі (RNN), можуть бути використані для аналізу часових рядів даних і виявлення патернів, що вказують на потенційні витoki.

Алгоритми класифікації: алгоритми, такі як метод опорних векторів (SVM) або дерева рішень, можуть використовуватися для класифікації стану реактора на основі наявних даних, наприклад, «нормальний», «попереджувальний» чи «критичний» стан.

5. Оптимізація та адаптація алгоритму. Алгоритм має постійно вдосконалюватися, використовуючи нові дані, що надходять від датчиків. Це може включати:

- адаптивне налаштування порогів: на основі реальних даних і змін умов експлуатації система може коригувати порогові значення для виявлення аномалій;

- перехресна перевірка з іншими системами: алгоритм повинен бути інтегрований з іншими частинами системи моніторингу реактора для забезпечення більш точного аналізу та перевірки виявлених аномалій.

Алгоритм автоматизованої оцінки герметичності. Алгоритм автоматизованої оцінки герметичності складається з кількох етапів, описаних вище, які можна подати у вигляді схем або блок-схем (рис. 3.1):

Швидкість виявлення проблем: автоматичне виявлення і аналіз аномалій дозволяє реагувати на порушення герметичності значно швидше, ніж при ручному контролі.

Зниження людського фактору: автоматизація зменшує вплив людської помилки та допомагає виключити суб'єктивність у прийнятті рішень.

Прогнозування майбутніх витоків: здатність прогнозувати витoki дозволяє вчасно вжити заходів для їх усунення до того, як вони переростуть у серйозні аварії.

Таким чином, розробка алгоритмів для автоматизованої оцінки герметичності елементів ядерного реактора є критично важливою для забезпечення безпеки та ефективності експлуатації реакторів. Така система дозволяє своєчасно виявляти навіть найменші порушення герметичності і прогнозувати потенційні витіки, що є ключовим фактором для попередження аварій та забезпечення надійної роботи ядерних установок.

Розглянемо розробку структурної схеми алгоритму автоматизованої оцінки герметичності елементів реактора

Для кращого розуміння етапів роботи алгоритму, що здійснює автоматизовану оцінку герметичності елементів ядерного реактора, нижче подано структурну схему алгоритму з описом основних етапів:

1. Збір даних з сенсорів.

Вхідні дані: Тиск, температура, концентрація газів, рівень радіації, механічні деформації.

Процес: Збір даних з датчиків, встановлених у різних точках реактора. Дані можуть бути отримані через системи SCADA або інші платформи моніторингу.

2. Попередня обробка даних.

Фільтрація шуму: Застосування фільтрів для видалення непотрібних коливань, що виникають через технологічні перешкоди.

Згладжування даних: Використання методів згладжування (наприклад, ковзне середнє) для зменшення випадкових коливань.

Нормалізація та стандартизація: Переведення даних у єдину систему вимірювання та шкалу для подальшого порівняння та аналізу.

3. Аналіз трендів і виявлення аномалій.

Аналіз трендів: Порівняння параметрів за часовими рядами для виявлення тенденцій і аномальних змін.

Виявлення аномалій: Використання методів статистичного аналізу або алгоритмів машинного навчання для виявлення відхилень від нормального стану.

4. Прогнозування витоків.

Моделювання розвитку ситуації: Прогнозування можливих витоків на основі аналізу історичних даних і виявлених трендів.

Машинне навчання: Використання моделей машинного навчання для точного прогнозування розвитку потенційних витоків або інших порушень герметичності.

5. Інтерпретація результатів.

Оцінка серйозності аномалії: Оцінка виявлених порушень герметичності за допомогою встановлених критеріїв, таких як тип і масштаб витоку.

Рекомендації для операторів: Виведення звітів з рекомендаціями для персоналу щодо подальших дій.

Генерація сигналів тривоги: У разі виявлення критичних порушень генерується сигнал тривоги для операторів.

6. Прийняття рішення.

Автоматичне втручання: У випадку, коли алгоритм оцінює ситуацію як критичну, система може автоматично виключити або активувати відповідні механізми безпеки (наприклад, автоматичне регулювання температури або тиску).

Аналіз сценаріїв для втручання: Оцінка, чи потрібно вручну втручатися для ліквідації проблеми або адаптувати систему до нових умов.

Оновлення стану: Постійне оновлення стану системи після кожного прийнятого рішення.

Розглянемо виконання етапів структурної схеми (рис. 3..1):

Збір даних з сенсорів: На першому етапі алгоритм збирає дані з датчиків, які встановлені по всьому реактору. Це дозволяє створити комплексне уявлення про стан системи в реальному часі.

Попередня обробка даних: Зібрані дані проходять через кілька етапів попередньої обробки. На цьому етапі фільтруються шуми, що можуть спотворювати результати, застосовуються методи згладжування, а також нормалізація для забезпечення єдиної системи вимірювання.

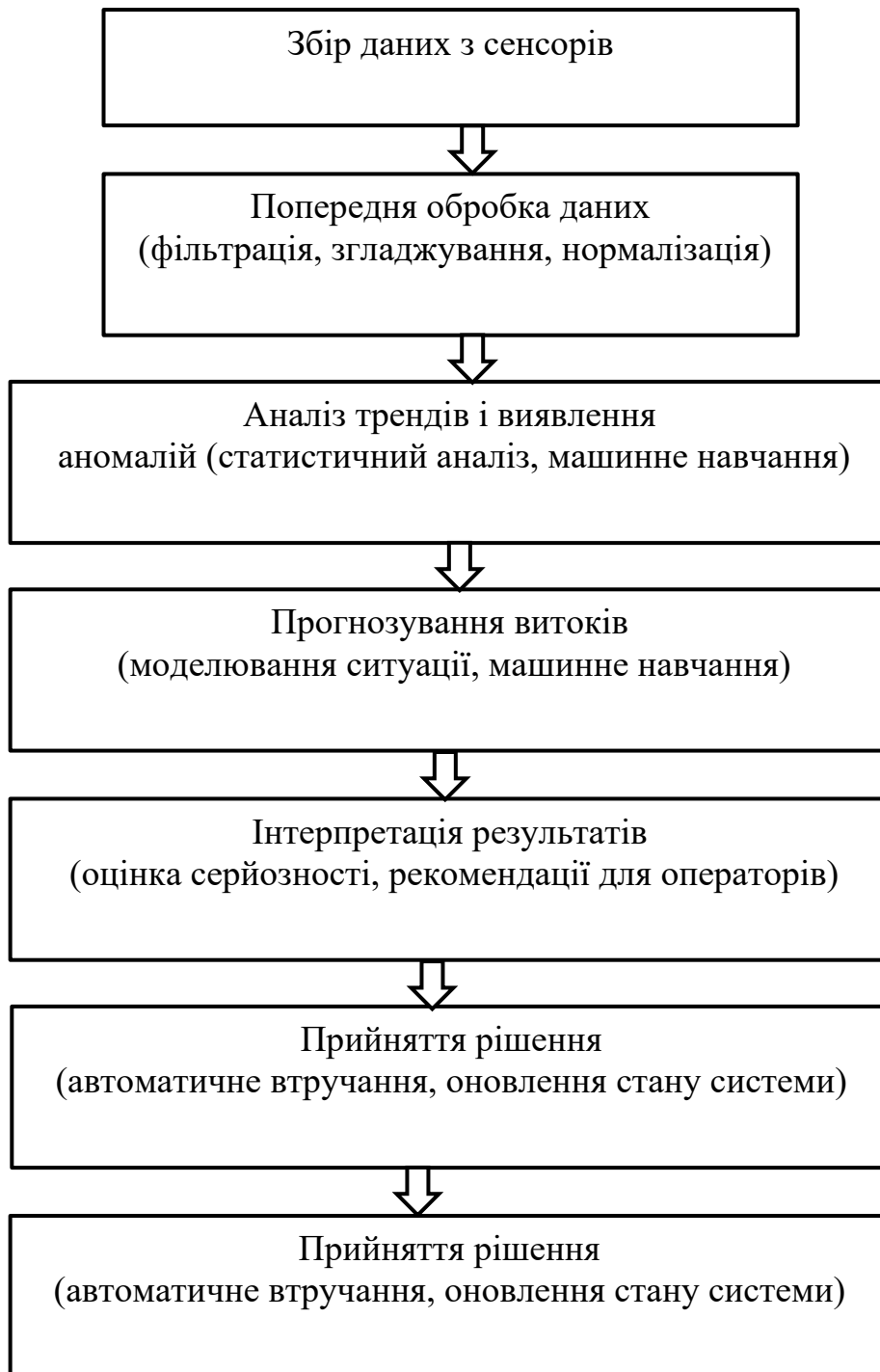


Рис. 3.1 - Структурна схема етапів роботи алгоритму, що здійснює автоматизовану оцінку герметичності елементів ядерного реактора

Аналіз трендів і виявлення аномалій: Алгоритм аналізує зміни в параметрах з часом для виявлення трендів і аномалій. Це дозволяє з'ясувати, чи мають місце зміни, що можуть свідчити про потенційні порушення герметичності.

Прогнозування витоків: На основі виявлених трендів і історичних даних система прогнозує ймовірність витоку або інших проблем із герметичністю. Алгоритми машинного навчання можуть бути використані для більш точного прогнозування.

Інтерпретація результатів: Після виявлення аномалій або проблем, система інтерпретує результат і формує звіт, який дає операторам інформацію про ймовірні причини і масштаб порушень.

Прийняття рішення: Оператор або система приймає рішення про подальші дії. Це може бути автоматичне регулювання або активація систем безпеки, або рекомендація для людського втручання для усунення проблеми.

Приклад використання алгоритму: Уявімо, що в одному з датчиків тиску виявлено поступове зниження значень впродовж кількох годин. Алгоритм автоматично аналізує ці дані і виявляє, що це відхилення виходить за межі встановлених норм. Алгоритм збирає дані та передобробляє їх, фільтруючи шум і вирівнюючи коливання. Аналіз трендів показує, що значення тиску в даній точці стабільно зменшується. Прогнозування витоків показує можливу вірогідність витоку теплоносія на основі змін цього параметра. Система інтерпретує це як потенційний витік і автоматично виводить сигнал тривоги для оператора. Оператор отримує попередження, яке містить деталі та рекомендації щодо перевірки і можливих дій, зокрема перевірки ущільнень або втручання в роботу охолоджувальної системи.

Таким чином, автоматизовані алгоритми моніторингу герметичності є критичними для забезпечення надійності та безпеки ядерних реакторів. Вони дозволяють не тільки виявляти порушення герметичності, але й прогнозувати їх розвиток, що допомагає значно зменшити ймовірність серйозних аварій і енергетичної безпеки атомної енергетики.

Висновки до розділу 3

У розділу показано основні вимоги до удосконалення моделювання процесів герметичності в системах моніторингу.

Показано, що математичне моделювання є важливим інструментом для точного передбачення та оцінки процесів, що відбуваються в системах моніторингу герметичності елементів ядерного реактора. Моделювання витоків і поведінки реактора в разі порушення герметичності дає змогу не лише виявити потенційні проблеми, а й прогнозувати їх розвиток, що є критичним для своєчасного реагування на аварійні ситуації.

Основні переваги математичного моделювання полягають у можливості:

- стимулювати сценарії витоків - прогнозування розвитку витоків, яке дозволяє оцінити їх наслідки для безпеки реактора та навколишнього середовища;
- прогнозувати поведінку системи - аналіз того, як система буде реагувати на різні порушення герметичності, що дозволяє своєчасно вжити необхідних заходів;
- оптимізувати розташування датчиків - математичні моделі дозволяють ефективно визначити критичні зони реактора для розміщення сенсорів, що підвищує точність моніторингу.

Завдяки використанню таких методів, можна отримати глибоке розуміння фізичних процесів, які відбуваються в реакторі, що значно покращує управління безпекою і дозволяє зменшити ймовірність несанкціонованих витоків.

Розробка алгоритмів для автоматизованої оцінки герметичності є важливим кроком на шляху до створення більш ефективних і безпечних систем моніторингу ядерних установок. Такий підхід дозволяє значно підвищити швидкість реакції на порушення герметичності, що є критично важливим для забезпечення безпеки. Автоматизація процесу включає:

Збір і попередня обробка даних: Для ефективного моніторингу необхідно проводити збір даних від різноманітних сенсорів і здійснювати їх попередню обробку для зменшення шуму, що дозволяє підвищити точність виявлення відхилень.

Аналіз трендів та виявлення аномалій: Алгоритм має здатність відстежувати зміни параметрів у часі, щоб виявляти аномальні ситуації, які можуть свідчити про порушення герметичності, навіть на ранніх етапах їх розвитку.

Прогнозування витоків: Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє прогнозувати можливі витoki на основі попередніх даних, що дає змогу вчасно вжити превентивних заходів і запобігти аварійним ситуаціям.

Інтерпретація результатів та надання рекомендацій: Система автоматизованого моніторингу має здатність інтерпретувати отримані дані, формулювати висновки та видавати рекомендації або попередження для оператора.

Завдяки розробці таких алгоритмів можливо значно знизити ризики людської помилки та підвищити надійність системи безпеки. У разі непередбачених ситуацій система може самостійно реагувати та ініціювати необхідні заходи для усунення проблем, що дозволяє оперативно запобігти серйозним аваріям.

Таким чином, математичне моделювання та автоматизовані алгоритми оцінки герметичності є важливими інструментами для забезпечення безпеки ядерних реакторів. Моделювання допомагає глибше зрозуміти фізичні процеси, що відбуваються в реакторі, а також прогнозувати можливі сценарії розвитку витоків. Алгоритми автоматизованої оцінки дозволяють своєчасно виявляти порушення герметичності, зменшуючи час на реагування та підвищуючи ефективність управління безпекою.

Поєднання математичних моделей і автоматизованих алгоритмів виявлення порушень герметичності забезпечує інтегровану систему моніторингу, яка не лише виявляє потенційні витoki, але й прогнозує їх

розвиток, забезпечуючи підвищену безпеку та ефективність експлуатації ядерних реакторів. Впровадження таких підходів є важливим етапом у досягненні нових рівнів безпеки і надійності в атомній енергетиці.

Розробка і впровадження ефективних алгоритмів моніторингу герметичності елементів ядерного реактора має величезне значення для забезпечення не лише безпеки роботи самих установок, але й для зменшення ризику аварій, які можуть мати серйозні наслідки для навколишнього середовища та здоров'я людей. Технології, що базуються на математичних моделях і алгоритмах автоматизованої оцінки, значно підвищують ефективність моніторингу, даючи можливість своєчасно виявляти порушення герметичності та оперативно вживати заходів для їх усунення.

Зокрема, математичні моделі, що симулюють витoki теплоносія, радіоактивних матеріалів чи зміну параметрів температури, тиску і концентрації газів, допомагають прогнозувати ймовірні сценарії та оптимізувати розташування датчиків для більш точного і вчасного виявлення аномалій. Моделювання дає змогу не тільки прогнозувати витoki, але й допомагає визначити їх наслідки для системи, що, в свою чергу, дозволяє оперативно розробляти план дій для ліквідації потенційних проблем.

Автоматизовані алгоритми на основі аналізу трендів, фільтрації даних і машинного навчання забезпечують більш швидку реакцію на навіть незначні зміни в параметрах герметичності, що робить систему моніторингу більш чутливою і надійною. Це особливо важливо для ядерних установок, де навіть незначні порушення герметичності можуть призвести до серйозних наслідків.

Впровадження таких алгоритмів дозволяє не лише підвищити точність моніторингу герметичності, але й забезпечити більш ефективну інтеграцію з іншими системами безпеки реактора. Алгоритми прогнозування, засновані на історичних даних та трендах, дозволяють створювати модель розвитку подій, що дає можливість на ранніх етапах виявляти потенційно небезпечні ситуації, навіть до того, як вони можуть призвести до значних порушень.

Окрім того, алгоритми автоматизованої оцінки герметичності здатні істотно зменшити кількість хибних спрацьовувань, оскільки системи навчання враховують величезну кількість варіантів поведінки системи в різних умовах, що дозволяє правильно інтерпретувати навіть незначні зміни параметрів, знижуючи ймовірність помилок.

Показано перспективи подальших досліджень та розробок. Інтеграція математичних моделей і алгоритмів машинного навчання у сфері моніторингу герметичності елементів ядерного реактора є важливим напрямком розвитку атомної енергетики. Оскільки системи моніторингу стають все більш складними і здатними обробляти величезну кількість параметрів в реальному часі, надалі є необхідність у:

Покращенні точності алгоритмів машинного навчання, які здатні виявляти навіть найменші відхилення від нормальної роботи системи.

Розробці нових математичних моделей, що дозволяють відслідковувати ще більш складні процеси, зокрема під час раптових змін або зовнішніх впливів, що можуть бути важкими для традиційних методів моніторингу.

Інтеграції з новими сенсорними технологіями, що дозволяють моніторити нові фізичні параметри, які раніше не були доступні або мали обмежене застосування в ядерних установках.

У майбутньому вдосконалення алгоритмів і математичних моделей дозволить значно підвищити рівень безпеки ядерних реакторів, знизити ймовірність виникнення аварій і забезпечити більш стабільну та ефективну експлуатацію атомних станцій. Завдяки розвитку цих технологій ми отримаємо можливість не лише усувати поточні порушення герметичності, а й здійснювати прогнозування й оцінку ефективності заходів, які дозволяють знизити ймовірність їх виникнення в майбутньому.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено дослідження, щодо удосконалення алгоритмів моніторингу герметичності елементів ядерного реактора. Проведено дослідження алгоритмів моніторингу герметичності елементів ядерного реактора, охоплюючи основні аспекти визначення параметрів герметичності, методи збору та обробки даних, математичне моделювання, а також розробку автоматизованих алгоритмів оцінки стану герметичності. В результаті проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки:

Ключові параметри для моніторингу герметичності: Визначення основних параметрів, таких як тиск, температура, концентрація газів, рівень радіації та механічні деформації, є важливим етапом для забезпечення надійного моніторингу герметичності елементів ядерного реактора. Ці параметри можуть сигналізувати про порушення герметичності, що, у свою чергу, дозволяє своєчасно виявляти потенційні витoki або аномалії.

Методи збору та обробки даних: Різноманітні сенсори та датчики, включаючи датчики температури, тиску, газів і радіації, дозволяють здійснювати реальний моніторинг герметичності. Зібрані дані передаються на централізовану платформу, де вони обробляються за допомогою різних алгоритмів для виявлення аномалій. Системи SCADA, що використовуються в ядерних установках, відіграють важливу роль у зборі, аналізі та моніторингу даних у реальному часі.

Оцінка ефективності існуючих алгоритмів: Вивчення ефективності існуючих алгоритмів показує, що багато з них базуються на використанні порогових значень для визначених параметрів або трендовому аналізі. Проте ці методи можуть бути обмежені у випадках, коли витoki чи порушення герметичності не призводять до значних змін параметрів, або коли зміни є складними і не піддаються простому пороговому аналізу. Тому для підвищення точності виявлення потрібні новітні технології, зокрема машинне навчання і штучний інтелект.

Математичне моделювання як інструмент для прогнозування: Математичне моделювання процесів герметичності в системах моніторингу є важливим інструментом для прогнозування можливих витоків, а також для оптимізації розташування датчиків і виявлення критичних зон в реакторі. Моделі дозволяють виявити потенційні уразливі місця в системі і розробити більш ефективні стратегії для попередження порушень герметичності.

Автоматизація оцінки герметичності: Розробка алгоритмів для автоматизованої оцінки герметичності елементів реактора дозволяє оперативно реагувати на потенційні порушення. Вони базуються на аналізі трендів, прогнозуванні змін параметрів за допомогою алгоритмів машинного навчання та інтеграції з іншими системами безпеки. Це дає змогу не тільки вчасно виявляти витoki, а й прогнозувати їх розвиток, знижуючи ризики для персоналу і навколишнього середовища.

Перспективи розвитку алгоритмів моніторингу: Подальший розвиток алгоритмів моніторингу герметичності потребує вдосконалення існуючих моделей з урахуванням новітніх технологій. Використання нових сенсорних технологій, таких як інтерферометрія, та впровадження штучного інтелекту для виявлення складних аномалій дозволить зробити систему моніторингу більш точними і чутливими до змін у роботі реактора.

Перспективи для подальших досліджень

Інтеграція новітніх технологій: Удосконалення алгоритмів моніторингу потребує інтеграції нових технологій, таких як великі дані, штучний інтелект та новітні сенсори, які здатні значно підвищити ефективність моніторингу та оцінки герметичності. Використання штучного інтелекту дозволяє створювати більш точні прогнози щодо розвитку подій і швидше реагувати на можливі порушення.

Оптимізація алгоритмів для підвищення швидкодії та надійності: Надійність та швидкодія алгоритмів є важливими чинниками для забезпечення своєчасного виявлення порушень герметичності. Тому в майбутньому

важливо зосередити увагу на оптимізації цих алгоритмів, щоб забезпечити їх високу ефективність при мінімальних витратах часу і ресурсів.

Розробка адаптивних моделей для різних сценаріїв: Враховуючи різноманітність умов експлуатації ядерних реакторів, необхідно розробляти адаптивні математичні моделі, здатні швидко пристосовуватись до зміни параметрів або непередбачуваних ситуацій. Це дозволить знижувати ймовірність помилок і підвищити точність виявлення витоків або інших порушень герметичності.

В цілому, удосконалення алгоритмів моніторингу герметичності є важливим кроком для забезпечення надійної та безпечної експлуатації ядерних реакторів, що потребує комплексного підходу з використанням новітніх технологій, математичних моделей та алгоритмів машинного

Важливість інтеграції з іншими системами: Одним із важливих аспектів є інтеграція алгоритмів моніторингу герметичності з іншими системами управління ядерного реактора, такими як системи управління аварійними ситуаціями або системи автоматичного захисту. Така інтеграція дозволить зібрати та обробити дані з різних джерел для більш точного прогнозування і своєчасного реагування на порушення герметичності. Окрім цього, синхронізація з іншими системами забезпечить єдину картину стану обладнання та дозволить автоматизувати процеси діагностики та аварійного реагування.

Удосконалення моніторингу на основі великих даних: Використання великих даних у поєднанні з машинним навчанням відкриває нові можливості для прогнозування стану герметичності. Збір та аналіз великих обсягів даних із сенсорів дозволяє виявляти закономірності, які не були б очевидними за допомогою традиційних методів моніторингу. Наприклад, алгоритми на основі великих даних можуть допомогти у прогнозуванні потенційних порушень герметичності ще до їх виникнення, знижуючи ймовірність серйозних аварій.

Можливості штучного інтелекту (ШІ): Штучний інтелект та глибинне навчання (deep learning) надають потужні інструменти для виявлення складних аномалій у великих масивах даних. У майбутньому такі технології можуть значно покращити виявлення витоків та прогнозування розвитку подій, що дозволяє системам автоматизованого моніторингу стати більш точними та чутливими. Використання ШІ дозволить виявляти навіть мінімальні зміни, які можуть свідчити про початкові етапи порушення герметичності, що значно підвищить рівень безпеки експлуатації.

Прогнозування і попередження витоків: Алгоритми машинного навчання здатні прогнозувати можливі витoki та інші порушення герметичності на основі історичних даних і трендів. Завдяки прогнозуванню можна здійснювати профілактичні заходи на ранніх етапах, запобігаючи аваріям та знижуючи ризики для персоналу і навколишнього середовища. Це вимагає розробки складних математичних моделей і інтеграції з системами раннього попередження, що дозволить значно підвищити ефективність моніторингу.

Оптимізація розташування датчиків: Математичне моделювання та аналіз великих даних можуть також допомогти в оптимізації розташування датчиків і сенсорів. Це дозволить покращити точність моніторингу, зменшити кількість непотрібних вимірювань і знизити витрати на технічне обслуговування. Враховуючи ймовірність витоків і потреби в точному моніторингу критичних зон, оптимізація розташування датчиків може значно поліпшити ефективність виявлення порушень герметичності.

Напрями для подальших досліджень: Розвиток адаптивних алгоритмів моніторингу: З огляду на те, що параметри герметичності можуть змінюватися залежно від умов експлуатації реактора, важливо розробляти адаптивні алгоритми, які зможуть адаптуватися до нових умов і змін у робочих процесах. Наприклад, врахування специфічних характеристик реактора та середовища експлуатації дозволить значно покращити виявлення порушень і знизити ймовірність помилок.

Удосконалення математичних моделей для прогнозування: Математичні моделі, що описують процеси витоків і герметичності, можуть бути удосконалені за допомогою новітніх методів математичного аналізу та числових методів. Зокрема, інтеграція таких моделей із алгоритмами машинного навчання дозволить створювати більш точні прогнози, які враховуватимуть зміни в параметрах та поведінці системи під час експлуатації.

Використання інтелектуальних сенсорних мереж: Інтелектуальні сенсорні мережі, що працюють на основі технологій Інтернету речей (IoT), можуть значно поліпшити збори даних і моніторинг. Розвиток таких мереж дозволить отримувати дані з великої кількості точок у реальному часі і здійснювати більш точну оцінку стану герметичності, базуючись на великій кількості факторів і параметрів.

Розвиток інтеграції з аварійними системами та системами самодіагностики: Для більш ефективного моніторингу герметичності необхідно продовжувати інтеграцію з системами автоматичного захисту та аварійного реагування. Системи, що мають здатність самостійно виявляти аномалії та приймати рішення на основі моніторингових даних, зможуть не тільки сигналізувати про витoki, але й ініціювати автоматичні заходи щодо локалізації аварії до її поширення.

Таким чином, дослідження демонструє важливість алгоритмів моніторингу герметичності для забезпечення безпеки ядерних реакторів. Удосконалення існуючих методів та інтеграція новітніх технологій, таких як штучний інтелект, великі дані і інтелектуальні сенсорні мережі, має ключове значення для створення більш точних, ефективних і надійних систем моніторингу. Своєчасне виявлення порушень герметичності, прогнозування можливих витоків і автоматизоване реагування на аварійні ситуації дозволить підвищити безпеку та надійність експлуатації ядерних установок, зменшити ризики для персоналу і навколишнього середовища, а також забезпечити ефективне управління процесами в режимі реального часу.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Budanov, P., Kyrysov, I., Brovko, K., Rudenko, D., Vasiuchenko, P., Nosyk, A. (2018). Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Thechnologies*, 3 (8 (111)), 75–89. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235882>
2. Tang, J., Huang, M., Zhao, Y., Ouyang, X., Huang, J. (2017). A new procedure for solving steady-state and transient-state nonlinear radial conduction problems of nuclear fuel rods. *Annals of Nuclear Energy*, 110, 492–500. doi: <http://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.05.061>
3. Pelykh, S. N., Maksimov, M. V., Baskakov, V. E. (2013). Grounds of VVER-1000 fuel cladding life control. *Annals of Nuclear Energy*, 58, 188–197. doi: <http://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.03.020>
4. Yong, S., Linzi, Z. (2022). Robust deep auto-encoding network for real-time anomaly detection at nuclear power plants. *Process Safety and Environmental Protection*, 163, 438–452. doi: <http://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.039>
5. Philip, B., Berrill, M. A., Allu, S., Hamilton, S. P., Sampath, R. S., Clarno, K. T., Dilts, G. A. (2015). A parallel multi-domain solution methodology applied to nonlinear thermal transport problems in nuclear fuel pins. *Journal of Computational Physics*, 286, 143–171. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jcp.2015.01.029>
6. Zheng, Y. (2020). Predicting stochastic characteristics of generalized eigenvalues via a novel sensitivity-based probability density evolution method. *Applied Mathematical Modelling*, 88, 437–460. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apm.2020.06.060>
7. Hyung, M. S., Kune, Y. S. (2011). Evolutionary design of reactor vessel assembly for liquid metal cooled battery. *Progress in Nuclear Energy*, 53 (7), 825–830. doi: <http://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.05.026>
8. Abdul, R. K., Afzal, R. A., Mohammed, A. D., Ramis, M. K. (2019). Effect of cladding on thermal behavior of nuclear fuel element with non-uniform heat

generation. *Progress in Nuclear Energy*, 111, 1–14. doi: <http://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.10.013>

9. Belles, R. J. (2021). Key reactor system components in integral pressurized water reactors (iPWRs). *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors*, 95–115. doi: <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-823916-2.00005-9>

10. Shuang, X., Xuhua, Z., Gaojie, H., Xiaxin, C. (2021). CFD analysis of the flow blockage in a rectangular fuel assembly of the IAEA 10 MW MTR research reactor. *Nuclear Engineering and Technology*, 53 (9), 2847–2858. doi: <http://doi.org/10.1016/j.net.2021.03.028>

11. Pecchia, M., Vasiliev, A., Ferroukhi, H., Pautz, A. (2017). A methodology for evaluating weighting functions using MCNP and its application to PWR ex-core analyses. *Annals of Nuclear Energy*, 105, 121–132. doi: <http://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.03.008>

12. Parga, C. J., Rooyen, I. J., Luther, E. P. (2018). Fuel – clad chemical interaction evaluation of the TREAT reactor conceptual low-enriched-uranium fuel element. *Journal of Nuclear Materials*, 512, 252–267. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.10.028>

13. Puthiyavinayagam, P., Selvaraj, P., Balasubramaniyan, V., Raghupathy, S., Velusamy, K., Devan, K., Nashine, B. et. al. (2017). Development of fast breeder reactor technology in India. *Progress in Nuclear Energy*, 101, 19–42. doi: <http://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.03.015>

14. Williamson, R. L., Hales, J. D., Novascone, S. R., Tonks, M. R., Gaston, D. R., Permann, C. J. et. al. (2012). Multidimensional multiphysics simulation of nuclear fuel behavior. *Journal of Nuclear Materials*, 423 (1-3), 149–163. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.01.012>

15. Dawahra, S., Khattab, K., Alhabit, F. (2020). MNSR transient analysis using the RELAP5/Mod3.2 code. *Nuclear Engineering and Technology*, 52 (9), 1990–1997. doi: <http://doi.org/10.1016/j.net.2020.03.006>

16. Fiorina, C., Clifford, I., Kelm, S., Lorenzi, S. (2022). On the development of multi-physics tools for nuclear reactor analysis based on OpenFOAM: state of the

art, lessons learned and perspectives. *Nuclear Engineering and Design*, 387, 1–15. doi: <http://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111604>

17. Papin, J. (2019). Behavior of Fast Reactor Fuel During Transient and Accident Conditions. *Comprehensive Nuclear Materials*, 2, 339–362. doi: <http://doi.org/10.1016/b978-0-08-102865-0.00039-x>

18. Clifford, I., Pecchia, M., Puragliesi, R., Vasiliev, A., Ferroukhi, H. (2018). On the characteristics of the flow and heat transfer in the core bypass region of a PWR. *Nuclear Engineering and Design*, 330, 117–128. doi: <http://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.01.039>

19. Budanov, P., Brovko, K., Cherniuk, A., Pantielieieva, I., Oliynyk, Y., Shmatko, N., Vasyuchenko, P. (2018). Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (5 (95)), 20–28. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.144925>

20. Budanov, P., Brovko, K., Cherniuk, A., Vasyuchenko, P., Khomenko, V. (2018). Improving the reliability of information-control systems at power generation facilities based on the fractal-cluster theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (92)), 4–12. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126427>

21. Hohorst, J. K. (1990). MATPRO-A, a library of materials properties for light-waterreactor accident analysis. Idaho Falls: Idaho National Engineering Lab, 4, 1098.

22. Feder, E. (2014). *Fraktaly*. Moscow: URSS: Len, 256.

23. Balkhanov, V. K. (2013). *Osnovy fraktalnoi geometrii i fraktalnogo ischisleniia*. Izd-vo Buriatskogo gosuniversiteta, 224.

24. Mandelbrot, B. (2010). *Fraktalnaia geometriia prirody*. IIKI, NITc «Reguliarnaia i khaoticheskaia dinamika», 656.

25. Skobov, V. G., Chernov, A. S. (2013). Nelineinyi skin-effekt v polumetallakh. *Fizika tverdogo tela*, 55 (10), 1903–1907.