

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора
Тітлова Олександра Сергійовича
на дисертаційну роботу **Сови Катерини Олександрівни**
на тему

«Моделювання ресурсоспроможності та надійності систем сухого зберігання
відпрацьованого ядерного палива на АЕС»,
подану до захисту на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 14 «Електрична інженерія»
за спеціальністю 143 «Атомна енергетика»

1. Актуальність теми дослідження

Кваліфікаційна робота **К. О. Сови** присвячена дослідженню і вирішенню важливих проблем експлуатації ядерних енергетичних установок атомних електростанцій, а саме поводженню з ядерним паливом, що відпрацьовало нормативний термін знаходження в активній зоні реактора.

Експлуатація АЕС супроводжується накопиченням відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), яке класифікується як ядерні відходи високої активності. У світі щорічно вивантажується з атомних електростанцій (АЕС) більше 10 тис. т важкого металу (ВМ), який утримується у ВЯП.

В Україні щороку вивантажується з реакторів АЕС близько 170 відпрацьованих тепловиділяючих збірок (ВТВЗ) з реакторів ВВЕР-440 і близько 560 ВТВЗ з реакторів типу ВВЕР-1000, що становить взагалі приблизно 265 т важкого металу.

Вилучене з реакторів паливо впродовж 2...5 років зберігається у приреакторних басейнах витримки в борних розчинах, поступово охолоджуючись і втрачаючи активність. Після витримки в басейнах паливо належить похованню глибинних геологічних фармацій, або переробці для вилучення складових, придатних для вироблення вторинного ядерного палива.

Окремі держави переробляють відпрацьоване паливо. Сумарні світові потужності для переробки ВМ на рік не перевищують 4800 т. Таким чином більше половини цінної сировини може втрачатися.

Запропонована і реалізована наприкінці минулого століття технологія довготривалого зберігання в інертному газовому середовищі дала можливість відкласти процедуру захоронення на 50...100 років, щоб дочекатись появи більш ефективних технологій переробки.

На Запорізькій АЕС застосована з 2001 року технологія сухого вентильованого контейнерного зберігання VSC-24 американської компанії

Duke Engineering and Services. Вона розрахована на експлуатацію впродовж 50 років. У відкритих джерелах відсутні оцінки надійності використовуваних контейнерів протягом розрахункового терміну експлуатації. На майданчику сховища зовнішній стан контейнерів демонструє поступову деградацію бетонної оболонки у вигляді тріщин та інших ознак руйнування.

Методика оцінювання ресурсоспроможності та надійності систем зберігання ВЯП в системах сухого сховища ВЯП є важливим завданням в контексті безпеки ядерної енергетики. Від якості та точності таких оцінок залежить спроможність гарантування екологічної, технічної та радіаційної безпеки, що особливо актуально з огляду на збільшення обсягів ядерних відходів і суспільний інтерес до проблем поводження з ними.

Беручи до уваги введення в експлуатацію централізованого сховища для палива трьох останніх українських станцій, дослідження ресурсоздатності системи сухого зберігання видається вкрай актуальним і своєчасним.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота має тісний зв'язок з науковими роботами кафедри Атомних електростанцій в напрямку дослідження проблем надійного і безпечного використання систем перетворення ядерної енергії в електрику і тепло.

3. Обґрунтованість наукових результатів, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність

Надійність основних наукових висновків та результатів дисертаційної роботи підтверджується застосуванням методів аналізу та моделювання, а також співвідношенням теоретичних концепцій з реальними даними робіт з обстеження технічного стану контейнерів зберігання. Достовірність пропозицій, розроблених автором для оцінюванню ресурсоздатності конструкції вентильованого бетонного контейнера, забезпечує можливість визначення науково обґрунтованих термінів їх використання.

4. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру.

Наукові положення та методики, представлені в дисертації, характеризуються значною новизною та оригінальністю. Основні результати дослідження включають:

- дослідження, спрямовані на поглиблений розгляд явищ, що супроводжують процес сухого зберігання. Дослідження надійності і безвідмовності елементів і конструкції контейнеру загалом запропоновано та

обґрунтовано з застосування ймовірнісних методів.

- методика проведення та обробки результатів чисельного моделювання процесу зберігання з врахуванням теплового, механічного і радіаційного впливу на конструкцію. В залежності від часу зберігання змодельоване процес зміни стану конструкції

- створена модель дозволяє використати її для подальшого дослідження ресурсоспроможності сухого сховища відпрацьованого ядерного палива в цілому, з урахуванням інтенсивності його наповнення.

Ці досягнення мають значний вплив на розвиток теорії та практики робіт з визначення та моніторингу технічного стану контейнерних сховищ, забезпечуючи підвищення їх ефективності і впровадження нових стандартів у галузі.

В результатах міститься наукова новизна праці.

Розроблено положення, які сформульовані у вигляді наукової новизни, являють нове наукове знання, важливе для галузі, з якої представлена і захищається дисертаційна праця, а саме: галузь знань – 14, спеціальності 143 – Атомна енергетика.

Основні положення наукової новизни праці достатньо опубліковані у фахових періодичних публікаціях (у т.ч. SCOPUS) автора.

5. Практичне значення одержаних результатів дослідження

Розроблений цифровий інструмент з моніторингу технічного стану та забезпеченню безпечної експлуатації контейнерів зберігання, дозволяє прогнозувати їх стан в достатньо віддаленому часі, своєчасно планувати технічне обслуговування і ремонтні роботи для підтримки необхідної ресурсоспроможності.

6. Оцінка змісту та завершеності дисертаційної роботи

Дисертаційна робота написана українською мовою з дотриманням актуальної наукової термінології, технічної точності та логічної структури, що відповідає стандартам для наукових праць.

У **вступі** обґрунтовано актуальність і важливість роботи, визначено мету, завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відображено її зв'язок з галузевими дослідженнями, а також з науково–дослідними роботами, що виконувались в Національному університеті «Одеська політехніка» за напрямком підвищення ефективності та безпеки, відмічене особистий внесок здобувача та апробацію результатів досліджень.

У першому розділі виконано аналіз існуючого досвіду зберігання ВЯП в Україні. Розглянуто процес поводження з відпрацьованим паливом після його вивантаження та конструкцію за допомогою якої відбувається процес зберігання ВЯП.

За результатами проведеного аналізу визначено можливі шляхи подальших досліджень у вибраному напрямку. Визначено мету роботи та необхідні завдання, які потрібно виконати для досягнення мети.

У другому розділі проведено аналіз сучасних технологій сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), що використовуються на атомних електростанціях. Наведено порівняльну характеристику наявних рішень за критеріями ядерної та радіаційної безпеки, а також екологічного впливу.

Розглянуто конструктивні особливості та матеріали, що використовуються у виготовленні контейнерів для сухого зберігання, зокрема металевих та вентильованих бетонних контейнерів. Проаналізовано принципи функціонування систем пасивного охолодження та забезпечення радіаційного захисту. Окрему увагу приділено досвіду впровадження технологій сухого зберігання у світовій практиці, а також сучасному стану та перспективам розвитку таких технологій в Україні. Як приклад національного досвіду розглянуто організацію сухого зберігання ВЯП на майданчику Запорізької АЕС.

Третій розділ присвячений математичному моделюванню ресурсоспроможності систем зберігання відпрацьованого ядерного палива. Було проведено огляд методів математичного моделювання надійності систем зберігання. Також розглянуто математичні моделі деградації матеріалів контейнерів. Проведено аналіз термічних, механічних навантажень на контейнери для зберігання відпрацьованого ядерного палива та аналіз довговічності матеріалів контейнерів.

Четвертий розділ присвячено оцінці впливу дефектів конструкцій на залишковий ресурс, зокрема зварних з'єднань та основного металу конструкцій систем сухого зберігання. Проведено оцінку ймовірності руйнування зварного з'єднання із дефектами та без них за допомогою методу розрахунку ймовірності руйнування. Запропоновано підхід до оцінки ресурсу за критерієм швидкості росту тріщини з урахуванням корозійного середовища, режимів навантаження та характеристик зварних з'єднань. Результати розрахунків свідчать, що надійність зварних конструкцій значною мірою

залежить від типу та розмірів дефектів, а також від зовнішніх умов експлуатації. Отримано числові оцінки ймовірності руйнування та часу до втрати цілісності конструкції залежно від сценаріїв дефектоутворення

У загальних висновках автор приводить підсумки роботи.

Побудова роботи логічна, усі розділи дисертації пов'язані між собою.

Автор продемонстрував здатність ставити задачі дослідження, вибирати методи їх розв'язання, доводити дослідження до конкретної практичної розробки.

Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (із змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. Вона узгоджується з напрямками наукових досліджень освітньо-наукової програми навчально-наукового інституту енергетики Національного університету «Одеська політехніка» за спеціальністю 143 «Атомна енергетика».

7. Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації в опублікованих працях

На основі матеріалів дисертації було опубліковано 8 наукових праць, серед яких 4 статті у виданнях, реферованих в базі SCOPUS та 4 публікації апробаційного характеру.

Основні результати дослідження були презентовані на 3 науково-практичних конференціях та інших наукових заходах.

Опубліковані наукові роботи повністю відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 року.

8. Дотримання вимог академічної доброчесності

Після перевірки дисертаційної роботи на предмет академічного плагіату було підтверджено, що всі посилання на оригінальні джерела для текстових і графічних матеріалів були використані коректно. Ненавмисних або навмисних порушень академічної доброчесності не виявлено.

Таким чином, у дисертаційній роботі Сиви К. О. не виявлено ознак академічного плагіату та інших порушень, які могли б поставити під сумнів самостійний характер виконаного дослідження та дотримання норм академічної доброчесності.

9. Дискусійні положення та зауваження до дисертації

Позитивно оцінюючи наукову роботу Сиви Катерини Олександрівни, вважаю за необхідне зазначити наступні зауваження до поданої дисертаційної роботи:

- підвищення надійності та безпеки експлуатації систем сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива шляхом створення математичних моделей оцінювання, не роз'яснено, яким чином досягається підвищення надійності шляхом створення моделі оцінювання;

- В якості базового об'єкта обрана Запорізька АЕС (ЗАЕС), на якій протягом 22 років експлуатується сховище ВЯП; скоріш за все, об'єктом дослідження є контейнери, що застосовуються на ЗАЕС;

- Процеси деградації матеріалів та методи математичного моделювання, що використовуються для оцінювання ресурсоспроможності та надійності конструкційних елементів сховищ; предметом дослідження є тільки Процеси деградації матеріалів і конструкцій;

- застосовано методи математичного та фізико-хімічного моделювання; в тексті відсутні результати фізико-хімічного моделювання;

- недостатньо уваги приділено експлуатації металевих контейнерів систем сухого зберігання ВЯП (розділ 2);

- не вказані джерела показників інтенсивності відмов $\lambda(t)$ (розділ 3);

- не сформульовано алгоритм прогнозування ресурсоспроможності сховища сухого зберігання ВЯП в контейнерах по результатам досліджень (розділ 4).

Зазначені коментарі не зменшують наукову і практичну цінність дисертаційної роботи, а навпаки, підкреслюють її актуальність та інноваційний характер.

10. Загальний висновок

Тематичне спрямування матеріалів дисертаційної роботи **Сиви Катерини Олександрівни**, її науково-прикладні результати та висновки відповідають галузі знань 14 – Електрична інженерія за спеціальністю 143 – Атомна енергетика.

Вони є достатньо науково обґрунтованими, є завершеним науковим дослідженням з вагомою теоретичною та практичною цінністю. Автор успішно реалізував завдання, демонструючи глибоке розуміння теми та використання сучасних методів для вирішення складних проблем.

Наукові результати роботи відзначаються новаторським підходом, який

має значення, як для теорії, так і для практики. Дисертант дотримався академічної доброчесності, що підтверджується відсутністю плагіату та коректним використанням джерел.

Опубліковані наукові праці відповідають вимогам і підкріплюють високий рівень досліджень. Основні положення дисертації успішно апробовані на конференціях, що підтверджує їх інноваційний і практичний характер.

Дисертація **Сови Катерини Олександрівни** «Моделювання ресурсоспроможності та надійності систем сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива на АЕС» є завершеним дослідженням, в якому досконально досліджено процес сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива на АЕС. За змістом та оформленням дисертаційна робота відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року, а її автор, **Сова Катерина Олександрівна**, заслуговує присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 143 «Атомна енергетика».

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри нафтогазових технологій,
інженерії та теплоенергетики
Одеського національного технологічного
університету

Олександр ТІТЛОВ