ВІДГУК

офіційного опонента, Рязанова В. В.

на дисертаційну роботу **Кухоцького Олександра Васильовича**

«Аналіз безпеки дослідницьких ядерних установок

з використанням CFD технологій»,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

за спеціальністю 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки

Актуальність теми дисертації. Дисертаційна робота Кухоцького О. В. присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі – дослідженню безпеки ядерної підкритичної установки (ЯПУ) "Джерело нейтронів" з застосуванням методів розрахункової гідродинаміки (Computational fluid dynamics – CFD) для детального аналізу локальних теплогідравлічних процесів в ключових елементах установки.

ЯПУ "Джерело нейтронів" створено на базі Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут" згідно домовленостей Вашингтонського саміту, викладених у спільній заяві Президентів України та США в квітні 2010 року і "Меморандуму про взаєморозуміння між Урядом України та Урядом США стосовно співробітництва з питань ядерної безпеки", який підписаний 26 вересня 2011 року. Будівництво здійснювалося за фінансування американської сторони, як компенсація за вивезення з України запасів високозбагаченого урану. Сьогодні на установці виконуються роботи по програмі фізичного пуску ЯПУ, згідно з дозволом Державної інспекції ядерного регулювання України від 01.07.2020.

ЯПУ "Джерело нейтронів" заснована на підкритичній збірці (ПКЗ), що керується лінійним прискорювачем електронів, є дослідницькою установкою, що використовує сучасні технології, та за проектними технічними характеристиками на сьогодні є унікальною установкою у світі. Безпечна експлуатація ЯПУ "Джерело нейтронів" сприятиме вирішенню складних науково-технічних задач на шляху розробки і створення перспективних ядерних установок. ЯПУ "Джерело нейтронів" призначена для проведення наукових і прикладних досліджень в області ядерної фізики та радіаційного матеріалознавства, а також для виробництва медичних радіоізотопів.

Забезпечення безпечної експлуатації ЯПУ “Джерело нейтронів” є актуальною задачею, розв’язання якої вимагає застосування сучасних кодів розрахункової гідродинаміки CFD для коректного дослідження перехідних і аварійних процесів в елементах активної зони установки ЯПУ: нейтрон-утворюючої мішені і тепловиділяючих збірках.

В основі аналізу безпеки ядерних установок, включаючи дослідницькі, є детерміністичні методи з використанням традиційних “системних” розрахункових кодів (таких як RELAP, MELCOR, тощо). Проте, можливості цих кодів обмежені інтегральною оцінкою параметрів в окремому визначеному об’ємі, що для умов сучасних дослідницьких ядерних установок є недостатнім, зважаючи на складність їх конструкції. Ці обставини висувають на перший план необхідність застосування нових, сучасних технологій, позбавлених вищевказаних обмежень, які дозволяють виконати дослідження безпеки з урахуванням локальних теплогідравлічних явищ і процесів. Такими технологіями є методи розрахункової гідродинаміки, проте на сьогодні ці методи ще не набули широкого застосування в ядерній галузі. Це зумовлено відсутністю загально прийнятої науково-обґрунтованої методології щодо їх використання в ядерній галузі, а також проблемою їх валідації.

Запропонована дисертантом методологія аналізу безпеки ДЯУ з застосуванням та проведенням CFD розрахунків сприяє підвищенню якості аналізу безпеки дослідницьких установок в цілому та дослідницької ЯПУ “Джерело нейтронів”. Варто відзначити, що до початку дослідження Кухоцького О. В. теплогідравлічний аналіз безпеки ЯПУ «Джерело нейтронів» в Україні не виконувався, що і зумовило виконання додаткових досліджень з розробки методології використання CFD технологій для аналізу та досліджень безпеки ДЯУ та виконання перевірочних регулюючих аналізів безпеки ЯПУ «Джерело нейтронів» в процесі ліцензування.

Враховуючи вищезазначене, представлена дисертаційна робота Кухоцького О.В. є актуальною та важливою з огляду на процес ліцензування та введення в експлуатацію ЯПУ "Джерело нейтронів", а також сприяє подальшому розвитку застосування сучасних CFD технологій для аналізу безпеки ядерних установок різного призначення.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. Автор чітко сформулював мету та завдання дисертаційного дослідження, що дозволило логічно та аргументовано досягти зазначеної мети (мета – підвищення безпеки ЯПУ "Джерело нейтронів") з урахуванням сучасного рівня науки і техніки.

Ступінь обґрунтованості наукових положень базується на використанні сучасних програмно-технічних засобів проведення аналізу теплогідравлічних процесів в елементах ЯПУ на основі моделей, які були розроблені за участю автора дисертації та пройшли важливі етапи верифікації та валідації. Заслуговує на увагу і досвідчене використання дисертантом програмного забезпечення (пакету ANSYS) для розробки теплогідравлічних моделей ключових елементів ЯПУ "Джерело нейтронів" та для аналізу перехідних процесів.

Опрацьований значний масив спеціальної науково-технічної літератури, а також нормативно-технічної документації, про що свідчить список використаних джерел – 119 найменувань.

Достовірність отриманих результатів. Отримані результати в достатній мірі обґрунтовані та повністю випливають із проведених досліджень, розрахункові обґрунтування підтверджуються результатами проведених валідаційних досліджень шляхом порівняння з результатами, що отримані іншими дослідниками. Також варто відзначити, що завдання дисертаційного дослідження, положення наукової новизни і висновки дисертації є логічно взаємопов'язаними.

Новизна наукових положень, висновків та рекомендацій. Зміст дисертаційної роботи свідчить про системний підхід до проведення дослідження, наявність наукових та практичних результатів, висновків і пропозицій, що в сукупності розв'язують важливу наукову проблему, яка полягає у вдосконаленні методів детерміністичного аналізу безпеки ЯПУ, а саме:

– систематизовано основні етапи виконання аналізу безпеки дослідницьких ядерних установок з використанням CFD технологій, що дозволяє, зокрема, більш детально дослідити локальні теплогідравлічні процеси в елементах ЯПУ при аналізі безпеки;

– запропоновано класифікацію методів дослідження теплогідравлічних процесів, що дозволяє на ранньому етапі аналізу безпеки визначитися з необхідними моделями, розрахунковими засобами тощо;

– з застосуванням розроблених в CFD коді моделей сектора ПКЗ та нейтрон-утворюючої мішені (НУМ) ЯПУ "Джерело нейтронів" підтверджено не перевищення встановлених критеріїв безпеки для фізичних бар'єрів у перехідних процесах з порушенням тепловідведення в ЯПУ;

– створено розрахункові моделі ключових елементів ЯПУ «Джерело нейтронів», виконано їх верифікацію та валідацію;

– був виконаний аналіз перехідних процесів в активній зоні ЯПУ «Джерело нейтронів», за результатами якого визначені додаткові організаційні заходи, що підвищують безпеку ЯПУ «Джерело нейтронів»;

– підготовлено методичні рекомендацій з виконання перевірочних аналізів з застосуванням CFD методів при проведенні державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки.

В сукупності, запропоновані наукові положення сприяють подальшому розвитку застосування CFD технологій в аналізі безпеки ядерних установок. Наведені результати отримані вперше і раніше не захищалися.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що результати дисертаційної роботи впроваджені в практичну діяльність Державної інспекції ядерного регулювання України в процесі ліцензування ЯПУ "Джерело нейтронів" (Акт від 24.04.2020 №15-34/5620 наведений у Додатку Б дисертації) та у ННЦ ХФТІ при обґрунтуванні безпеки ЯПУ "Джерело нейтронів" і підготовці протиаварійної документації (Акт від 12.06.2020 №39-00/07-1159 наведений у Додаток В дисертації).

Повнота викладу в опублікованих працях і авторефераті положень, висновків, рекомендацій. Наукові положення, висновки та практичні рекомендації дисертації достатньо повно викладено у наукових публікаціях дисертанта, зокрема: 5 статей - у провідних фахових виданнях (4 статті- у фахових періодичних виданнях, що входять до бази цитування SCOPUS); 6 публікацій у збірниках доповідей та тез доповідей міжнародних конференцій.

Результати дисертації були багаторазово апробовані на міжнародних і вітчизняних наукових конференціях.

Загальна характеристика структури та змісту роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 159 сторінок, у тому числі 37 рисунків, 11 таблиць, список використаних джерел з 119 найменувань. Оформлення роботи та автореферату відповідає вимогам Наказу МОН України від 12 січня 2017 р. за №40.

У вступі дисертаційної роботи представлено актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження. Обґрунтовано наукову новизну отриманих результатів, їх практичне значення, визначено особистий внесок дисертанта, подано інформацію про апробацію результатів дисертаційної роботи та посилання на публікації за темою дисертаційної роботи.

У першому розділі дисертаційної роботи проведено аналіз стану проблеми щодо аналізу безпеки ДЯУ, міжнародного та національного досвіду застосування CFD технологій для досліджень безпеки ядерних установок, підходів до верифікації та валідації моделей. В результаті цього аналізу визначені наявні за напрямом проблемні аспекти та актуальні завдання. Це дозволило автору визначити мету та завдання дослідження, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети.

У другому розділі представлено запропоновану автором методологію аналізу безпеки дослідницьких ядерних установок з використанням CFD технологій, сформульовані її основні базові принципи та основи системного застосування CFD технологій для аналізу безпеки дослідницьких ядерних установок. У розділі наведена запропонована класифікація методів дослідження теплогідравлічних процесів та представлені переваги і недоліки кожного з класів.

У третьому розділі надано інформацію про розробку теплогідравлічних моделей елементів ЯПУ "Джерело нейтронів" НУМ і сектора ПКЗ відповідно до запропонованої методології. Представлено інформацію про тестові розрахунки розроблених моделей та виконано їх верифікацію та валідацію.

У четвертому розділі виконано дослідження аварійних процесів з порушенням тепловідведення від НУМ і ПКЗ: втрата примусової циркуляції теплоносія в контурі охолодження НУМ та ПКЗ та втрата теплоносія в контурі

охолодження ПКЗ. За результатами аналізу перехідних процесів автором отримані наукові та практичні результати, які впроваджені в практичну діяльність та сприяють підвищенню безпеки ЯПУ "Джерело нейтронів".

У висновках наведено наукові та прикладні проблеми аналізу безпеки дослідницьких ядерних установок, що були вирішені в дисертаційній роботі.

Зауваження та дискусійні положення дисертаційного дослідження.

У цілому позитивно оцінюючи роботу, слід звернути увагу на окремі положення дисертаційної роботи, що мають дискусійний характер чи потребують додаткового обґрунтування або пояснень.

1. У розділі 2 дисертації наводяться посилання на нормативні документи з ядерної та радіаційної безпеки, сфера застосування яких є атомні електростанції і які не поширюються на дослідницькі установки, що є не зовсім коректним, описуючи вимоги для дослідницьких установок.

2. Треба пояснити твердження автора, що консервативний підхід для дослідницьких ядерних установок є не представницьким.

3. При описі підходів до верифікації CFD моделей автор використовує поняття аналіз невизначеності, похибки та аналіз чутливості. Наведені загальні положення щодо їх оцінки та врахування. Проте як саме проводиться аналіз невизначеності та чутливості не вказано. Наприклад, у Табл. 3.3 та 3.5 наведені параметри для аналізу чутливості, проте незрозуміло яким чином цей аналіз виконувався.

4. При верифікації та валідації моделей визначені довірчі інтервали, проте надалі при поданні результатів дослідження ці інтервали згадуються тільки в письмовому вигляді та не відображені на графіках. Не вказано надійність, або ймовірність попадання розрахункових значень у довірчий інтервал.

5. Як відомо, тепловиділяючі збірки (ТВЗ) та твели в ТВЗ мають різну потужність енерговиділення. Яким чином це враховано в розрахунках? Також, необхідно звернути увагу на те, що прийнятий при дослідженні профіль висотного розподілу енерговиділення (Рис.3.5) не підтверджується результатами експериментальних вимірів на ВВР-М, а саме в крайніх по висоті активної зони шарах твелів енерговиділення не збільшується.

6. Загалом, у роботі обмежено аналіз перехідних процесів лише фактично двома процесами: втрата примусової циркуляції та втрата теплоносія, які супроводжуються спрацюванням відповідних уставок та вимкненням прискорювача. Так, наприклад, дослідження безпеки ЯПУ містять і результати теплогідравлічного аналізу аварійних процесів в НУМ з урану. За межами дослідження залишилися і більш консервативні умови протікання аварій, наприклад, втрата теплоносія в ПКЗ, яка призвела до встановлення рівня теплоносія в активній зони в діапазоні ~0÷50 см, що не дозволить певний час встановленню природньої циркуляції в ПКЗ ні теплоносія, ні повітря.

7. Стор.86, «... поверхні тепловиділяючих елементів покриті захисним шаром алюмінію, товщиною 0,5 мм з кожної сторони.», а також дані Табл. Г.2 - не відповідають даним, наведених на Рис. Г.1, щодо товщини оболонки твелів, а також товщина паливного шару в твелах, згідно «паспортних» даних на ядерне паливо ВВР-М2, дорівнює - 0,98 мм, а не 1,00 мм.

8. Необхідно пояснити суттєву відмінність у результатах досліджень аварійного процесу з втратою циркуляції теплоносія в ПКЗ, отриманих автором, і в роботі [115], а саме час досягнення максимальної температури оболонки твела та теплоносія: у автора 15 с, в роботі [115] – 517 с.

9. Наскільки обґрунтованим є порівняння результатів, вищенаведеного аварійного процесу, отриманих дисертантом з застосуванням CFD-коду, і результатів, отриманих з використанням системного коду RELAP5/Mod3.2 для ПКЗ [116], але для іншого типу твелів – TVS-X.

У тексті дисертаційної роботи є присутніми також деякі стилістичні та очевидні друкарські помилки, а також наявні русизми та некоректно побудовані деякі речення. Наприклад, рис.4.6 и рис.4.7 однаково підписані. У переліку умовних скорочень стоїть ЛУЕ - лінійний прискорювач електронів, а треба – ЛПЕ.

Зазначені зауваження не знижують загальної високої оцінки результатів, які отримано в дисертаційній роботі О. В. Кухоцького.

Загальні висновки.

У дисертації вирішено актуальну науково-технічну проблему вдосконалення детерміністичного аналізу безпеки ЯПУ “Джерело нейтронів” з застосуванням CFD

технологій для детального аналізу локальних теплогідравлічних процесів в ЯПУ. Тема дисертації є актуальною, наукові положення, висновки та рекомендації містять наукову новизну та є обґрунтованими і достовірними. Основні результати дисертації є впровадженими в практичну діяльність.

Аналіз публікацій дисертанта показує, що основні результати дисертації було отримано автором особисто. Автореферат дисертації адекватно відображає зміст дисертації.

На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота «Аналіз безпеки дослідницьких ядерних установок з використанням CFD технологій» є завершеною науково-дослідною роботою, яку виконано на достатньо високому науковому рівні і яка відповідає спеціальності 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки.

Вважаю, що за актуальністю, обсягом проведених досліджень, рівнем і кількістю публікацій та новизною отриманих результатів дисертація «Аналіз безпеки дослідницьких ядерних установок з використанням CFD технологій» повністю відповідає вимогам п. п. 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року №567 (зі змінами), які висуваються до кандидатських дисертацій, а її автор, Кухоцький Олександр Васильович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.14 - теплові та ядерні енергоустановки.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник
Інституту ядерних досліджень
НАН України В.В. Рязанов

Підпис В. В. Рязанова засвідчую,

Зав. відділом кадрів
Інституту ядерних досліджень
Національної академії наук України