ВІДГУК

офіційного опонента 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 обраної теми дисертації. Неодмінною вимогою, що пред'являється до будь-якої ядерної установки, є гарантія збереження її ядерної та радіаційної безпеки на будь-якому етапі життєвого циклу, починаючи з проектування і закінчуючи зняттям установки з експлуатації. Й на сучасному етапі розвитку ядерних технологій в частині забезпечення безпеки висуваються все більш жорсткі вимоги не тільки до енергетичних ядерних установок, а й дослідницьких реакторів, підкритичних установок та стендів.

До теперішнього часу аналіз безпеки ядерних установок виконувався за допомогою різних «системних» розрахункових програмних кодів, заснованих на використанні детерміністичних методів. Проте, обмеження зазначених методів, які полягають у визначенні тільки інтегральних параметрів системи в окремому заданому об'ємі, не дозволяють проводити більш детальний та ґрунтовний аналіз безпеки таких складних систем, якими є ядерні установки.

В якості альтернативи «системним» кодам все частіше для аналізу безпеки ядерних установок використовують коди розрахункової гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics – CFD), в основу яких покладено механіку суцільних середовищ.

У дисертаційній роботі автором було запропоновано методологію, засновану саме на застосуванні CFD технологій в процесі рішення теплогідравлічних задач для критичних елементів дослідницьких ядерних установок з метою обґрунтування їх безпеки, в тому числі, і при проведенні перевірочних розрахунків в ході державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки матеріалів з аналізу безпеки ядерних установок.

Більш того, здобувачем на практиці показано застосування запропонованої методології для ядерної підкритичної установки «Джерело нейтронів, засноване на підкритичній збірці, що керується лінійним прискорювачем електронів» (ЯПУ «Джерело нейтронів»), що в поточний момент знаходиться в процесі фізичного пуску у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут».

Таким чином, дисертаційна робота Кухоцького О.В., яку присвячено аналізу безпеки дослідницьких ядерних установок шляхом використання CFD технологій, безумовно є важливою й актуальною.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи є високою та базується на всебічному аналізі науково-технічної, нормативної документації, літературних джерел за проблемою роботи, гармонійній постановці мети і задач дослідження, використанні надійних методів досліджень, зіставленні і критичному аналізі здобутих результатів. При формулюванні наукових положень, висновків і рекомендацій автором застосовувалась інформація, отримана з актуальних літературних джерел, що відображають сучасне розуміння проблеми, а також отриманий досвід в ході проведення власних досліджень, тому їх можна вважати досить обґрунтованими.

У дисертаційній роботі використані сучасний розрахунковий код, інноваційні розрахунково-аналітичні методи аналізу отриманих результатів. В рамках дослідження виконано порівняльний аналіз розрахунків з застосуванням CFD технологій та відомих «системних» теплогідравлічніх кодів, таких як ATHLET та RELAP5.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи випливає з коректного застосування сформульованої методології, розробки комп'ютерних моделей і результатів проведених досліджень, які підтверджують адекватність використаних моделей.

Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій. Дисертаційна робота дозволила вирішити актуальну науково-технічну проблему, що є важливою для забезпечення безпеки дослідницьких ядерних установок та ЯПУ «Джерело нейтронів», зокрема. Автором підтверджується, що в роботі містяться наукові положення та результати, які раніше не захищалась. Серед наукових результатів дисертації найбільш суттєвими, на мою думку є:

- розвиток застосування CFD технологій для дослідження теплогідравлічних процесів у дослідницьких ядерних установках (п.1 наукової новизни);
- нові теплогідравлічні моделі ключових елементів ЯПУ «Джерело нейтронів» для цілей перевірочних розрахунків аналізу безпеки, які відрізняються від існуючих (п. 3 наукової новизни);
- підтвердження CFD методами можливості здійснення та достатності природної циркуляції теплоносія для відведення залишкового тепловиділення від пластин нейтрон-утворюючої мішені та елементів палива при аварії з втратою примусової циркуляції (п. 4 наукової новизни).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, списку використаних джерел та додатків. Якщо більш

детально зупинитися на основних результатах, здобутих в дисертаційній роботі Кухоцького О.В., то слід відзначити наступне.

У вступі автор роботи чітко обґрунтував актуальність обраної теми дослідження, сформулював мету, завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, вказав на обґрунтованість та достовірність результатів досліджень, зазначив новизну здобутих результатів, їхнє практичне значення, свій особистий внесок й апробацію результатів, показав взаємозв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.

У першому розділі дисертаційної роботи виконано огляд і аналіз міжнародних та українських підходів та регулюючих вимог, стану проблеми застосування CFD технологій для аналізу безпеки дослідницьких ядерних установок. В аналізі охоплено досвід та підходи Франції, Бельгії та МАГАТЕ. Варто відзначити, що в частині дослідницьких ядерних установок саме ці країни мають провідну позицію в світі, зокрема у Бельгії ведуться роботи з розробки та обґрунтуванні безпеки підкритичної системи MYRRHA, а під егідою МАГАТЕ ведеться низка досліджень з розширення сфери застосування CFD методів. Особливу увагу приділено аспектам застосування CFD методів для аналізу безпеки ядерних установок. Виконано аналіз національного досвіду з аналізу безпеки дослідницьких установок, наявних методів та вимог нормативної бази, а також досвіду при ліцензуванні ЯПУ «Джерело нейтронів».

У другому розділі викладені результати розробки методології аналізу безпеки дослідницьких ядерних установок з використанням CFD технологій, сформульовані основні базові принципи та науково-теоретичні основи системного застосування CFD технологій для аналізу безпеки дослідницьких ядерних установок. Також у розділі розроблені методичні рекомендації з виконання перевірочних досліджень щодо аналізу безпеки дослідницьких ядерних установок з застосуванням CFD технологій. Варто відзначити визначені дисертантом області детерміністичного аналізу безпеки дослідницьких ядерних установок, для яких запропоновано доповнення CFD методами, а саме: використання CFD методів для підтвердження цілісності фізичних бар'єрів безпеки та визначення запасів безпеки при нормальній експлуатації, аварійних ситуаціях та аваріях при підготовці протиаварійних процедур. Заслуговує на увагу й запропонована дисертантом класифікація методів дослідження теплогідравлічних процесів, що дозволяє на ранньому етапі визначитися з методом дослідження, необхідними моделями та розрахунковим засобом.

У третьому розділі описано процес розробки, верифікації та валідації розрахункових CFD моделей ключових елементів ЯПУ «Джерело нейтронів» згідно з запропонованою методологією. А саме, автором розроблені теплогідравлічні моделі сектора підкритичної збірки та нейтрон-утворюючої мішені. Варто відзначити використаний підхід до верифікації та валідації розроблених моделей, зокрема валідацію моделі сектора підкритичної збірки

проведено як чисельним так і експериментальним шляхом. За результатами верифікації та валідації визначено довірчі інтервали моделей ±4,3 % та ±4,23 %.

У четвертому розділі на основі розроблених моделей сектора підкритичної збірки та нейтрон-утворюючої мішені дисертантом виконано дослідження перехідних процесів в активній зоні ЯПУ «Джерело нейтронів». Розглянуті аварійні сценарії з порушенням тепловідведення від підкритичної збірки та нейтрон-утворюючої мішені, зокрема: втрата примусової циркуляції теплоносія в контурі охолодження нейтрон-утворюючої мішені та підкритичної збірки (LOFA) та втрата теплоносія в контурі охолодження підкритичної збірки (LOCA). За результатами аналізу LOFA підтверджено, що природньої циркуляції теплоносія достатньо для відведення залишкових тепловиділень. За результатами аналізу LOCA визначені запаси безпеки та виконано їх порівняння з результатами аналогічного процесу у «системному» коді. В результаті визначено організаційні та технічні заходи з попередження подій цього типу.

У висновках підведені підсумки та узагальнені основні результати даної дисертаційної роботи.

Практична цінність роботи і рекомендації для використання результатів полягає в тому, що запроваджена методологія аналізу безпеки дослідницьких ядерних установок з застосуванням сучасних CFD технологій сприяє підвищенню якості аналізу безпеки дослідницьких ядерних установок шляхом врахування локальних теплогідравлічних явищ та процесів в їх елементах, а розроблені теплогідравлічні моделі ключових елементів активної зони ЯПУ «Джерело нейтронів» забезпечують комплексну оцінку матеріалів обґрунтування безпеки під час проведення державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки. Належна оцінка та перевірочні розрахунки аналізу безпеки забезпечують підготовку експлуатаційної документації належної якості. Про практичне значення результатів роботи свідчать і акти впровадження результатів роботи у 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 наукових положень, висновків, рекомендацій. Здобуті результати дисертації достатньо повно викладені в 5 наукових статтях у виданнях, які включено до переліку фахових періодичних наукових видань, в тому числі 4 – у виданнях, які входять до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS. Також, результати роботи були неодноразово представлені на міжнародних конференціях з проблематики

дослідницьких ядерних реакторів, на одній з яких у 2019 році автором здобуто перемогу у конкурсі молодих вчених.

Автореферат дисертаційної роботи вірно відображає її зміст і повністю розкриває сутність і основні результати та висновки проведених досліджень. Оформлення автореферату і його обсяг відповідають вимогам атестаційної комісії МОН України.

Зауваження до дисертаційної роботи. Дисертаційна робота досить добре оформлена та проілюстрована, хоча є деякі недоліки:

1) Відповідно до проекту ЯПУ «Джерело нейтронів» в якості джерела первинних нейтронів передбачається використання двох типів нейтрон-утворюючої мішені – вольфрамової та уранової. Проте, у дисертаційній роботі розглянуто та проведено розрахункові аналізи тільки для вольфрамової мішені, а про застосування уранової мішені нічого не згадується. Необхідно було б також розглянути й уранову мішень.
2) У розділі 3 дисертаційного дослідження для подальшого аналізу обрано розрахунковий засіб ANSYS CFX, проте нічого не сказано про версію розрахункового засобу та його валідацію для таких застосувань.
3) На стор. 84 вказано, що активна зона ЯПУ «Джерело нейтронів» складається з 38 ТВЗ та нейтрон-утворюючої мішені, оточених радіальним відбивачем нейтронів з берилієвих блоків і кільцевим графітовим відбивачем нейтронів, але така конфігурація відповідає лише вихідному проектному завантаженню активної зони, та взагалі склад активної зони ЯПУ «Джерело нейтронів» залежить від типу мішені, яка буде використовуватись під час експлуатації установки, та часу в ході паливних кампаній.
4) На стор. 86, 3 абзац зверху, вказано «Для відведення тепла, що виділяється в активній зоні ПКЗ і НУМ ЯПУ «Джерело нейтронів» використовуються дві окремі системи охолодження – система ПКО ПКЗ та система ПКО НУМ». Але згідно проекту ЯПУ «Джерело нейтронів» крім систем перших контурів охолодження ПКЗ та НУМ, для відведення тепла від ПКЗ та НУМ також використовується система другого контуру охолодження ПКЗ та НУМ.
5) У Додатку А та на стор. 9 і 20, вказано різну кількість тез конференцій, де було апробовано результати дисертації.
6) У роботі є наявні орфографічні помилки, некоретні розділові знаки та деякі невідповідності по тексту (наприклад, стор. 10, зміст, назва п. 3.2, помилково використана абревіатура «АКЗ» замість «ПКЗ»; стор. 12, перелік умовних скорочень, описки в розшифруванні абревіатури «ВП», та абревіатури «ГУ»; стор. 84, 7 рядок зверху, в тексті замість висловлення «…та ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів» слід було використати ««…та ефективним коефіцієнтом розмноження

нейтронів»; стор. 85, 7 рядок зверху, в тексті написано, що об'єктами дослідження є НУМ та ТВЗ, хоча у вступній частині дисертації вказано, що об'єкт дослідження – теплогідравлічні процеси в ЯПУ «Джерело нейтронів»; та ін.)

Однак вказані помилки та висловлені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок

Дисертаційна робота Кухоцького Олександра Васильовича «Аналіз безпеки дослідницьких ядерних установок з використанням CFD технологій» є завершеним, оригінальним і самостійним науковим дослідженням, що виконано на належному науковому та прикладному рівні. Наукові положення сформульовані автором самостійно й відображають особистий внесок дисертанта у розвиток технічної науки та її галузі – атомної енергетики. Наведені у роботі наукові та практичні результати впроваджені у практичну діяльність та у сукупності вирішують важливу для аналізу безпеки дослідницьких ядерних установок науково-технічну задачу підвищення безпеки дослідницьких установок.

Вважаю, що за актуальністю обраної теми, обсягом і змістом та ступенем обґрунтованості здобутих результатів та сформульованих наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірністю і новизною та повнотою викладення у публікаціях, дисертаційна робота «Аналіз безпеки дослідницьких ядерних установок з використанням CFD технологій» повністю відповідає вимогам пп .9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року №567, зі змінами, 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,

кандидат фізико-математичних наук, ст. досл.,
заступник директора з наукової роботи
Науково-дослідного комплексу
«Прискорювально-ядерні системи»,
Національного наукового центру
«Харківський фізико-технічний інститут» І.В. Ушаков

Підпис Ушакова І.В. засвідчую
заступник генерального директора
Національного наукового центру
«Харківський фізико-технічний інститут» І.М. Карнаухов