

ВІДГУК

офіційного опонента **ЯЦИШИНА Андрія Васильовича**, доктора технічних наук, старшого наукового співробітника, заступника директора з наукової роботи Центру інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України
на дисертаційну роботу **ГАШИМОВА Артура Маратовича**
на тему **«Метод визначення критеріїв початку пошкодження активної зони реакторної установки ВВЕР-1000 за результатами моделювання теплогідравлічних процесів»**,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

1. Актуальність теми дисертації

Безпечна робота атомних електростанцій значною мірою залежить від того, наскільки швидко і правильно персонал може оцінити стан реакторної установки під час аварії. Особливо важливо своєчасно визначити момент, коли запроєктна аварія переходить у важку фазу і починається пошкодження активної зони реактора. Це складне завдання, оскільки не всі критичні параметри можна виміряти безпосередньо, а самі аварійні процеси розвиваються швидко і супроводжуються одночасною зміною великої кількості показників.

У таких умовах важливу роль відіграють інформаційні системи підтримки оператора та комп'ютерне моделювання. Вони дають змогу аналізувати розвиток аварійних процесів, визначати найбільш інформативні параметри та встановлювати їх граничні значення для прийняття рішень. Разом із тим залишається актуальною проблема надійного визначення моменту переходу аварії у важку фазу, оскільки наявні критерії для реакторів ВВЕР-1000 потребують уточнення та додаткового наукового обґрунтування.

Дисертаційна робота Гашимова Артура Маратовича «Метод визначення критеріїв початку пошкодження активної зони реакторної установки ВВЕР-1000 за результатами моделювання теплогідравлічних процесів» присвячена саме вирішенню цієї проблеми та спрямована на вдосконалення підходів до визначення критеріїв початку пошкодження активної зони реактора на основі комп'ютерного моделювання аварійних процесів.

Таким чином, дисертаційна робота є актуальною як з наукової, так і з прикладної точки зору, оскільки спрямована на вдосконалення методів визначення початку пошкодження активної зони реакторної установки ВВЕР-1000, підвищення надійності інформаційної підтримки оператора в аварійних умовах та обґрунтування критеріїв своєчасного переходу до управління важкими аваріями.

2. Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в такому:

1. вперше для автоматизованої інформаційної системи реакторної установки (РУ) на основі комп'ютерного імітаційного моделювання сценаріїв запроєктних аварій реакторів типу ВВЕР-1000 розроблено метод визначення

критерію переходу запроектої аварії у важку фазу на основі багатопараметричного критерію, який включає температурні та радіаційні параметри, що на відміну від консервативного критерію, який використовується у теперішній час й не підтверджений розрахунково, дозволяє отримати науково обґрунтовані граничні значення параметрів для прийняття рішень в алгоритмах управління аварійними станами РУ з меншою долею консерватизму за рахунок зменшення невизначеності, яка впливає з базових характеристик реакторної установки ВВЕР-1000 та різноманітності експлуатаційних станів й вихідних подій аварій. Розроблений метод можна адаптувати для реакторних установок іншого типу;

2. вперше розроблено на основі RELAP5 для реакторів типу ВВЕР-1000 деталізовану комп'ютерну імітаційну модель вимірювальних термопар на виході активної зони та оточуючих їх конструктивних елементів, що дозволило врахувати інерційну затримку інформації для автоматизованої інформаційної системи РУ в умовах швидкоплинних процесів зміни температури у перехідних аварійних процесах, що зменшує невизначеності стану ядерного палива у реальному часі;

3. набула подальшого розвитку комп'ютерна модель моніторингу радіаційних полів у приміщеннях гермооболонки реакторного відділення для реакторів типу ВВЕР-1000 у процесах розвитку аварії за рахунок синтезу й аналізу інформації усіх засобів штатної системи вимірювання радіаційних параметрів, що дозволило врахування радіаційного критерію у методі визначення початку пошкодження активної зони реакторної установки, чим підвищується надійність діагностики стану активної зони в аварійних умовах;

4. удосконалено у цілому імітаційну комп'ютерну модель реакторної установки ВВЕР-1000 на основі RELAP5 шляхом коректного врахування процесів за умов високих температур теплоносія при низькій густині пари притаманних пізнім стадіям запроектої аварії при переході у важку фазу за рахунок більш детального моделювання систем вимірювання температури теплоносія та врахування ефектів теплової інерції.

Отримані результати дисертаційної роботи є достовірними, оскільки ґрунтуються на застосуванні комплексу науково обґрунтованих методів, зокрема комп'ютерного імітаційного моделювання теплогідравлічних процесів із використанням коду RELAP5, моделювання радіаційних процесів із використанням MICROSHIELD, обчислювального експерименту та аналізу результатів моделювання. Достовірність і обґрунтованість отриманих результатів також забезпечується валідацією розроблених імітаційних моделей, порівнянням розрахункових даних з експериментальними результатами та результатами більш деталізованого моделювання.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується узгодженістю результатів моделювання з фізичними закономірностями перебігу аварійних процесів у реакторній установці ВВЕР-1000 та результатами проведених обчислювальних досліджень. Зокрема, у роботі удосконалено імітаційну модель реакторної установки, деталізовано моделювання термопар на виході з активної зони та розвинено підхід до оцінювання радіаційних полів у гермооболонці реакторного відділення.

Отже, поставлене в дисертації наукове завдання щодо розроблення методу визначення критеріїв початку пошкодження активної зони реакторної установки ВВЕР-1000 за результатами моделювання теплогідравлічних і радіаційних процесів виконано в повному обсязі. Отримані результати є науково обґрунтованими, мають практичне значення та можуть бути використані для підвищення надійності інформаційної підтримки оператора і своєчасного прийняття рішень під час розвитку аварійних процесів на АЕС.

3. Теоретична цінність і практична значущість наукових результатів

Результати дисертаційної роботи мають теоретичне та практичне значення для розвитку інформаційних технологій і комп'ютерного моделювання у сфері безпеки атомних електростанцій. Теоретична цінність дослідження полягає у розвитку підходів до визначення моменту переходу запроєктної аварії у важку фазу на основі аналізу комплексу параметрів різної фізичної природи. Важливим науковим результатом є обґрунтування багатопараметричного критерію, що поєднує температурні та радіаційні показники, а також удосконалення імітаційної комп'ютерної моделі реакторної установки ВВЕР-1000. Окреме значення має деталізація моделювання термопар на виході активної зони та розвиток комп'ютерної моделі моніторингу радіаційних полів у гермооболонці реакторного відділення.

Практична значущість отриманих результатів визначається можливістю їх використання для вдосконалення автоматизованої інформаційної системи підтримки оператора реакторної установки ВВЕР-1000. Запропонований метод дає змогу більш надійно визначати момент початку пошкодження активної зони та своєчасно приймати рішення щодо переходу від інструкцій з ліквідації аварій до керівництва з управління важкими аваріями. Це сприяє підвищенню ситуаційної обізнаності оператора, ефективності протиаварійних дій та зменшенню ризику розвитку небезпечних аварійних процесів.

Практичну цінність роботи також підтверджує використання її результатів у науково-технічній діяльності ТОВ «Енергоризик» у межах робіт для АТ «НАЕК «Енергоатом», пов'язаних з оптимізацією та обґрунтуванням критеріїв переходу до керівництв з управління важкими аваріями для енергоблоків Запорізької, Південноукраїнської та Рівненської АЕС.

4. Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

За своїм змістом і спрямованістю дисертаційна робота Гашимова Артура Маратовича відповідає предметній області спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» та спрямована на розв'язання актуального наукового і прикладного завдання, пов'язаного з удосконаленням інформаційної підтримки оператора реакторної установки ВВЕР-1000, комп'ютерним моделюванням аварійних процесів та визначенням критеріїв переходу запроєктної аварії у важку фазу.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у розвиток методів комп'ютерного імітаційного моделювання аварійних процесів на АЕС, удосконалення

інформаційних систем підтримки оператора та обґрунтування критеріїв початку пошкодження активної зони реакторної установки ВВЕР-1000.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові збіги, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Гашимова Артура Маратовича є результатом самостійних досліджень здобувача. Ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації не виявлено. Використані в роботі ідеї, результати та тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

5. Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою. Структуру дисертації побудовано відповідно до поставленої мети та завдань дослідження. Виклад основного матеріалу, наукових положень, результатів і висновків є послідовним, логічним та аргументованим, здійснюється з використанням загальноприйнятої наукової і технічної термінології. Дисертація написана в науковому стилі, характерному для досліджень технічного спрямування.

Дисертація складається з анотації, списку публікацій здобувача, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та п'яти додатків. Загальний обсяг роботи становить 246 сторінок, з них 182 сторінки основного тексту. Дисертація містить 38 рисунків, 19 таблиць, а список використаних джерел налічує 124 найменування.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, визначено його мету, завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження. Сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дослідження, публікації за темою дисертації та структуру роботи.

У першому розділі *«Аналіз існуючих інформаційних технологій управління аварійними процесами реакторної установки АЕС»* проаналізовано сучасні підходи до комп'ютерного моделювання аварійних процесів у реакторних установках ВВЕР-1000, розглянуто міжнародний досвід визначення критеріїв переходу від інструкцій з ліквідації аварій до керівництв з управління важкими аваріями. Охарактеризовано феноменологію розвитку запроєктних аварій, основні параметри стану реакторної установки, які можуть бути використані для діагностики початку пошкодження активної зони, а також обмеження чинних підходів. Окремо розглянуто міжнародний досвід, зокрема підходи Westinghouse, EDF, Фінляндії та Болгарії. За результатами аналізу обґрунтовано необхідність розроблення більш надійного критерію переходу до управління важкими аваріями на основі параметрів, доступних для вимірювання в аварійних умовах.

У другому розділі *«Розробка імітаційної комп'ютерної моделі РУ»* наведено опис імітаційної моделі реакторної установки ВВЕР-1000, створеної та вдосконаленої на основі програмного коду RELAP5. Розглянуто структуру моделі, основні елементи РУ, що підлягають моделюванню, а також підходи до відтворення теплогідравлічних процесів. Значну увагу приділено детальному моделюванню термопар на виході з активної зони, оскільки саме їх показання є важливими для оцінювання поточного стану реактора в аварійних режимах.

Також описано використання коду MICROSHIELD для моделювання радіаційних процесів у гермооболонці реакторного відділення.

У третьому розділі *«Обчислювальний експеримент із метою валідації імітаційної комп'ютерної моделі та аналізу динаміки розвитку аварійних процесів»* представлено результати перевірки створеної моделі та аналізу поведінки основних параметрів реакторної установки в аварійних умовах. Досліджено динаміку теплогідравлічних процесів, вплив протиаварійних дій персоналу та взаємозв'язок між параметрами, що можуть бути безпосередньо виміряні, і тими показниками, які визначаються розрахунково. Проведена валідація моделі RELAP5 дала змогу підтвердити її придатність для розрахунку теплофізичних параметрів РУ в умовах запроектних і важких аварій.

У четвертому розділі *«Розробка методу визначення критеріїв початку пошкодження активної зони РУ»* розроблено основний результат дисертаційного дослідження – метод визначення критерію переходу запроектної аварії у важку фазу. На основі серії теплогідравлічних розрахунків визначено параметри, які можуть бути використані для надійної ідентифікації початку пошкодження активної зони. Досліджено зв'язок між температурою на виході з активної зони, часом досягнення критичних температур, параметрами окислення оболонок ТВЕЛ та радіаційними показниками у гермооболонці. Запропоновано багатопараметричний критерій, що поєднує температурні та радіаційні характеристики та дає змогу більш обґрунтовано визначати момент переходу до керівництва з управління важкими аваріями.

У загальних висновках узагальнено основні результати дослідження та показано досягнення поставленої мети. Зокрема, розроблено метод визначення критерію переходу від інструкцій з ліквідації аварій до керівництва з управління важкими аваріями на основі комп'ютерного імітаційного моделювання, визначено основні параметри початку важкого пошкодження активної зони, удосконалено модель реакторної установки ВВЕР-1000 та деталізовано моделювання термодинаміки. Також розвинуто підхід до оцінювання радіаційних полів у гермооболонці та обґрунтовано використання комбінованого критерію, що враховує параметри різної фізичної природи.

Список використаних джерел охоплює вітчизняні та зарубіжні наукові праці, нормативні документи, матеріали з питань ядерної та радіаційної безпеки, комп'ютерного моделювання аварійних процесів, використання кодів RELAP5 і MICROSHIELD, а також міжнародний досвід управління важкими аваріями на АЕС. Загалом у роботі використано 124 джерела.

Дисертаційна робота за структурою, змістом та оформленням відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації». Матеріал викладено послідовно, логічно та аргументовано; окремі розділи роботи змістовно пов'язані між собою та спрямовані на розв'язання поставлених у дослідженні завдань. Сукупність представлених теоретичних положень, результатів комп'ютерного моделювання теплогідравлічних і радіаційних процесів, обчислювальних експериментів та сформульованих висновків засвідчує цілісність дисертаційного дослідження.

Таким чином, дисертаційна робота Гашимова А.М. є завершеним науковим дослідженням, викладеним належною науковою мовою з використанням відповідної фахової термінології. Зміст роботи, логіка і послідовність викладення матеріалу, повнота розв'язання поставлених завдань та сформульовані висновки відповідають темі дисертаційного дослідження.

6. Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Основні наукові результати дисертаційного дослідження Гашимова А.М. висвітлено у 19 наукових працях. Серед них – 2 статті у наукових виданнях, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus і належать до Q1, 1 стаття у виданні, що індексується у міжнародній наукометричній базі Web of Science, 7 тез міжнародних конференцій, 1 препринт, 5 звітів за міжнародними проектами Horizon, 1 звіт за міжнародним проектом Euratom та 2 авторські набори лекційних матеріалів, підготовлені у межах міжнародного проекту «Support to the Nuclear Regulator in South Africa».

Результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на 7 міжнародних конференціях, серед яких конференції INUDECO 2024 та INUDECO 2025, ICAPP 2023, Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання», 28th International Conference on Nuclear Engineering, а також конференції «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». Крім того, результати роботи були представлені під час навчальних семінарів для працівників органу ядерного регулювання Південно-Африканської Республіки у 2024 та 2025 роках.

Опубліковані праці відображають основні результати дослідження, пов'язані з комп'ютерним моделюванням теплогідравлічних і радіаційних процесів у реакторних установках ВВЕР-1000, аналізом аварійних режимів, удосконаленням розрахункових моделей, визначенням параметрів початку пошкодження активної зони та обґрунтуванням критеріїв переходу до управління важкими аваріями.

Особистий внесок Гашимова А.М. у наукові праці, виконані у співавторстві, конкретизовано в дисертації. Він полягає, зокрема, у створенні та вдосконаленні імітаційних комп'ютерних моделей реакторних установок, проведенні обчислювальних експериментів, дослідженні аварійних і перехідних процесів, моделюванні радіаційних полів та аналізі результатів розрахунків.

Таким чином, основні наукові положення та результати, представлені в дисертаційній роботі Гашимова А.М., достатньо повно висвітлені у наукових публікаціях здобувача та пройшли належну апробацію на міжнародних наукових конференціях і професійних заходах.

7. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

До представленої дисертаційної роботи є такі зауваження:

1. У розділі 1 проаналізовано міжнародний досвід визначення критеріїв переходу від ІЛА до КУВА, а у розділі 4 запропонований температурний критерій 700 °С порівнюється, зокрема, з критерієм Westinghouse 650 °С. Доцільно було б детальніше обґрунтувати відмінність запропонованого значення

від зазначеного міжнародного підходу з урахуванням особливостей реакторної установки ВВЕР-1000.

2. У підрозділі 4.4 при обґрунтуванні порогового значення потужності дози у гермооб'ємі на рівні 300 Р/год автор враховує стан палива після планового перевантаження, тривалість зупинки реактора та зміну активності радіонуклідів. Водночас цей фрагмент роботи можна було б посилити більш системним аналізом чутливості обраного порогового значення до зміни ізотопного складу палива, частки свіжого палива та різної тривалості витримки після зупинки реактора. Це дало б змогу повніше оцінити стійкість запропонованого радіаційного критерію для різних станів активної зони.

3. У підрозділі 4.4.2 наведено опис розрахункової моделі центральної зали гермооб'єму та зазначено, що валідацію коду MICROSHIELD подано у додатку Г. Водночас наведена в додатку валідація переважно підтверджує розрахункову точність самого програмного коду на еталонних конфігураціях. Доцільно було б окремо детальніше обґрунтувати адекватність саме прийнятої геометричної моделі центральної зали гермооб'єму, зокрема вплив її спрощень і прийнятих припущень на розраховані значення потужності дози.

4. У математичних розрахунках дисертації наявні окремі технічні та арифметичні неточності. Зокрема, у формулі (2.36) неправильно обчислено об'єм гідравлічного елемента, у формулі (2.45) – відношення товщини конічної обичайки до гідравлічного діаметра, а у рівнянні (2.7) наведено подвійний знак «мінус». Зазначені записи доцільно перевірити та уточнити.

5. У формулі (2.46) значення площі $F_{кон}$, використане при розрахунку гідравлічного опору, не узгоджується зі значенням, отриманим у формулі (2.43), тому числову підстановку та кінцевий результат доцільно перевірити.

6. У дисертації наявна неузгодженість у використанні позначень множин вихідних подій $\Omega 1$ – $\Omega 4$. Зокрема, на с. 27 та с. 145 $\Omega 3$ відповідає течії першого контуру за межі ГО, а $\Omega 4$ – течії першого контуру у другий контур, тоді як на с. 157–158 ці позначення використано навпаки. Крім того, в окремих фрагментах течію першого контуру у другий віднесено до $\Omega 2$. Доцільно уніфікувати зазначені позначення по всьому тексту дисертації.

7. У дисертації потребує уточнення хронологія та документальне підтвердження впровадження отриманих результатів. Так, у вступі зазначено, що дисертаційна робота пов'язана з виконанням Договору № 22/2019 між ТОВ «Енергориск» та НАЕК «Енергоатом», тоді як в акті впровадження від 10.07.2026 р. зазначено використання результатів дисертаційної роботи під час виконання робіт за Договором № 27/2018 від 21.06.2018 р. Доцільно пояснити співвідношення зазначених договорів та конкретизувати, які саме результати дисертаційного дослідження були отримані й використані в межах кожного з них.

Вважаю, що висловлені зауваження мають переважно уточнювальний та редакційний характер, не знижують наукової новизни і практичної значущості отриманих результатів та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

8. Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Гашимова Артура Маратовича на тему «Метод визначення критеріїв початку пошкодження активної зони реакторної установки ВВЕР-1000 за результатами моделювання теплогідравлічних процесів» виконана на високому науковому рівні, з дотриманням принципів академічної доброчесності, та є завершеним науковим дослідженням, сукупність теоретичних і практичних результатів якого розв'язує актуальне науково-прикладне завдання розроблення методу визначення критеріїв переходу запроєктної аварії у важку фазу для реакторної установки ВВЕР-1000, що має істотне значення для галузі знань 12 «Інформаційні технології». Дисертаційна робота за актуальністю, науковою новизною, теоретичним і практичним значенням отриманих результатів повністю відповідає вимогам, встановленим пунктами 6–9 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 від 12 січня 2022 р. № 44.

Гашимов Артур Маратович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Офіційний опонент:

заступник директора з наукової роботи

Центру інформаційно-аналітичного та

технічного забезпечення моніторингу

об'єктів атомної енергетики НАН України,

доктор технічних наук,

старший науковий співробітник



Андрій ЯЦИШИН