

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту проблем
математичних машин і систем
Національної академії наук України



Олег КОПІЙКА

2026 р.

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації на
тему «Метод визначення критеріїв початку пошкодження активної зони
реакторної установки ВВЕР-1000 за результатами моделювання
теплогідравлічних процесів»

здобувача ступеня доктора філософії

Гашимова Артура Маратовича

з галузі знань 12 — Інформаційні технології

за спеціальністю 122 — Комп'ютерні науки

Семінар проведений у відділі № 215 «Інформатики навколишнього
середовища та моделювання атмосферних процесів» Інституту проблем
математичних машин і систем НАН України
«07» вересня 2026 року, протокол № 3.

1. Актуальність теми дослідження

Модернізація інформаційних систем українських АЕС здійснюється у рамках Комплексної (зведеної) програми підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних електростанцій (2012–2030). У рамках даної державної програми передбачено розробку та впровадження досліджуваної у цій роботі автоматизованої інформаційної системи підтримки оператора на основі симптомно-орієнтованих аварійних інструкцій (AIC COAI) як частини інформаційної системи енергоблоку АЕС. AIC COAI призначена для вирішення задач управління аваріями та забезпечення аварійної готовності енергоблоку АЕС. На нинішній стадії розробки AIC COAI не забезпечує надійної ідентифікації моменту переходу аварії у важку фазу, а її порогові параметри для прийняття рішень щодо зміни стратегії управління аварією не є оптимальними з точки зору мінімізації негативних наслідків для конструктивних елементів РУ, персоналу АЕС, населення, що проживає навколо АЕС, та навколишнього середовища. Тому на сьогодні існує потреба у розширенні набору параметрів моніторингу AIC COAI та оптимізації їх порогових значень. Саме на вирішення цієї проблеми направлене дослідження у даній дисертаційній роботі.

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

Дисертаційна робота є частиною досліджень, що проводяться у ТОВ «Енергориск» у рамках виконання Договору № 22/2019 між ТОВ «Енергориск» та НАЕК «Енергоатом» на науково-дослідну роботу з визначення критерію переходу від ІЛА до КУВА.

3. Наукова новизна отриманих результатів

У дисертації одержані такі наукові результати:

- Вперше для автоматизованої інформаційної системи РУ на основі комп'ютерного імітаційного моделювання сценаріїв запроєктних аварій реакторів типу ВВЕР-1000 розроблено метод визначення критерію переходу запроєктної 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.

- 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.

- 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.

- Удосконалено 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 запроєктної аварії при переході у важку фазу за рахунок більш детального моделювання систем вимірювання температури теплоносія та врахування ефектів теплової інерції.

4. Теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Результати роботи автора впроваджено так:

1. Проаналізовано сучасні підходи до моделювання аварій на реакторній

установці ВВЕР-1000 на основі кращих сучасних розрахункових програмних кодів, що дозволяють провести імітаційне комп'ютерне моделювання значень параметрів РУ, включаючи фізичні параметри реакторної установки, що вимірюються датчиками систем контролю та управління, а також параметрів, які не вимірюються, але важливі для ідентифікації перехідних процесів в активній зоні РУ.

2. Визначено представницький перелік вихідних подій для моделювання проектних і запроектних аварій на реакторній установці ВВЕР-1000, які охоплюють весь діапазон зміни обраних контрольованих критеріїв.

3. Визначено параметри моніторингу стану активної зони реакторної установки ВВЕР-1000 під час нормальної і аварійної експлуатації, які можуть бути використані для діагностики стану активної зони (АкЗ) та постійно вимірюються.

4. Удосконалено імітаційну комп'ютерну модель РУ типу ВВЕР-1000 для оцінки динамічних параметрів РУ недоступних для вимірювання, дослідження з використанням удосконаленої моделі перехідних процесів під час запроектних та важких аварій.

5. Розроблено деталізовану імітаційну комп'ютерну модель термопар на виході активної зони РУ, для коректного врахування процесів притаманних пізнім стадіям запроектної аварії при переході у важку фазу.

6. Удосконалено імітаційної комп'ютерної моделі оцінки радіаційних полів у ГО РУ типу ВВЕР-1000 для проведення оцінки радіаційних полів під час перехідних процесів упродовж запроектних та важких аварій.

7. Науково обґрунтовано багатопараметричний критерій з використанням інформаційних параметрів різної фізичної природи (радіаційного та теплофізичного) для визначення початку пошкодження активної зони та надійної ідентифікації моменту переходу запроектної аварії у важку стадію.

Інтегровано визначений критерій в аварійно-апаратний комплекс керування запроектними аваріями у вигляді друкованої версії інструкцій для оператора та інтеграції у АІС СОАІ РУ типу ВВЕР-1000 для підвищення ситуаційної обізнаності оператора та підвищення ефективності застосування протиаварійних процедур, зокрема при виборі оптимального часу переходу від комплексу процедур аварійних дій персоналу ІЛА до комплексу процедур КУВА. Все це у цілому дозволить запобігти чи суттєво зменшити екстремальні теплові навантаження на конструкційні елементи РУ типу ВВЕР-1000 у передаварійних та аварійних умовах.

5. Використання результатів роботи

Результати дисертаційного дослідження були впроваджені у промисловості: використані при розробці звітних документів з науково-дослідної роботи за Договором №27/2018 (№935/41) між ТОВ «Енергоризик» та НАЕК «Енергоатом» «Оптимізація та обґрунтування критеріїв переходу до роботи за керівництвами з управління важкими аваріями пілотних енергоблоків № 1 ЗАЕС, № 1 ЮУАЕС, № 1 РАЕС» від 21.06.2018 р.).

6. Особиста участь автора в одержанні наукових та практичних результатів, що викладені в дисертаційній роботі.

Усі наукові результати, викладені в дисертації, отримані здобувачем особисто.

Дисертаційна робота виконана у ПІММС НАН України, науковий керівник д.т.н., доцент, завідувач науково-дослідного відділу №120 ПІММС НАН України Бегун В.В.

Розглянувши звіт щодо перевірки наукової роботи на академічний плагіат, рецензенти дійшли висновку, що дисертаційна робота Гашимова Артура Маратовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

7. Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача.

За темою дисертаційного дослідження було опубліковано 19 наукових праць, у тому числі 2 статті у наукових виданнях (обидва видання проіндексовані у Scopus і мають рейтинг Q1 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank у рік публікації), 1 стаття — у науковому виданні, проіндексованому у базі даних Web of Science, 7 тез міжнародних конференцій, 1 препринт, 5 звітів за міжнародними проєктами Horizon, 1 звіт за міжнародним проєктом Euratom, 2 авторські набори лекційних матеріалів у рамках міжнародного проєкту «Support to the Nuclear Regulator in South Africa»:

1. Vaglio-Gaudard C., Airola M., Ambrosini W., Crevon S., De Angelis A., Fütterer M. A., Goicea A., Hashymov A., Hollands T., Ikonen J. P., et al. Integrating Nuclear Small Modular Reactors into low-carbon energy systems: an illustration using a recent European R&D initiative. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2025. Vol. 78, Art. No. 104787. DOI: 10.1016/j.seta.2025.104787. Базис: CrossRef, Scopus (Q1), Science Citation Index Expanded (SCIE), Google Scholar.

Здобувачем створено та удосконалено імітаційні комп'ютерні моделі реакторних установок та дослідженні процесів при роботі реакторних установок у перехідних режимах шляхом проведення обчислювальних експериментів.

2. Böttcher M., Bernard O., Mas A., Sanchez V., Nop R., Belaunde F., Bourcier C., Ruban D., Hashymov A., Halim O., Pucciarelli A., Forgione N. CFD analysis of coolant mixing in VVER-1000/V320 reactor pressure vessel. Annals of Nuclear Energy. 2024. Vol. 197. Art. No. 110274. DOI: 10.1016/j.anucene.2023.110274. Базис: CrossRef, Scopus (Q1), Web of Science, Google Scholar.

Здобувачем виконано дослідження з метою удосконалення імітаційної комп'ютерної моделі реакторної установки ВВЕР-1000 на основі RELAP5 шляхом порівняння розрахунків за допомогою даної моделі з більш складними та більш докладними моделями й експериментальними даними.

3. von Oertzen G., Nitzsche O., Hashymov A. UC1 sampling plan, liquid waste storage tanks, JRC Ispra. EPJ Nuclear Sciences & Technologies. 2020. Vol. 6. Art. N

15. DOI: 10.1051/epjn/2019043. Бази: CrossRef, Web of Science, DOAJ, Google Scholar.

Здобувачем розроблено імітаційну комп'ютерну модель для розрахунку полів іонізуючого випромінювання з метою оптимізації радіаційного моніторингу.

4. Verrier D., Vezzoni B., Calgaro. B., Bernard O., Previti A., Lafaurie C., Hashymov A., Groudev P., Stefanova A. et al. Codes and Methods Improvements for VVER Comprehensive Safety Assessment: The CAMIVVER H2020 Project. *Proc. of the 2021 28th Intern. Conf. on Nuclear Engineering. Vol. 2: Nuclear Fuels, Research, and Fuel Cycle; Nuclear Codes and Standards; Thermal-Hydraulics*. (ASME, Virtual, Online. August 4–6, 2021). Paper N: ICONE28-64169, V002T07A010. ASME, 2021. 6 P. ISBN: 978-0-7918-8525-3. DOI: <https://doi.org/10.1115/ICONE28-64169>. (CrossRef, Scopus, ASME Digital Collection).

Здобувачем висвітлено новітні методи застосування імітаційного моделювання для аналізу безпеки АЕС.

5. Stefanova A., Groudev P., Vryashkova P., Hashymov A. et al. Benchmark results of Main Coolant Pump start-up transient of the VVER-1000 Kozloduy-6 Nuclear Power Plant. *Proc. of ICAPP 2023*. (23–27 April 2023, Gyeongju, Korea). 2023. Paper N 2023117. 8 P. URL: https://www.researchgate.net/publication/377689533_Benchmark_results_of_Main_Coolant_Pump_start-up_transient_of_the_VVER1000_Kozloduy-6_Nuclear_Power_Plant. (дата звернення: 19.12.2025).

В рамках даної роботи автором було проведено моделювання перехідного процесу з запуском ГЦН на основі модернізованої моделі реакторної установки ВВЕР-1000 та проведено порівняльний аналіз результатів моделювання на других кодах.

6. Hashymov A. Safety Analysis, Thermal hydraulic. RELAP5. Refresh. Support to the Nuclear Regulator in South Africa (Identification Nr: EU-INTPA/20221EA-RP/0067). Training Workshop, 10–14 February 2025. 79 p.

В рамках даної роботи проведено розробку навчальних матеріалів та навчання теоретичним основам та практичним аспектам моделювання в коді RELAP5.

7. Hashymov A. Safety Analysis, Thermal hydraulic. RELAP5. Support to the Nuclear Regulator in South Africa (Identification Nr: EU-INTPA/20221EA-RP/0067). Training Workshop, 21 October – 1 November 2024. 94 p.

В рамках даної роботи проведено розробку навчальних матеріалів та поглиблене навчання теоретичним основам та практичним аспектам моделювання в коді RELAP5.

8. Бегун В.В., Гашимов А.М. Впровадження технології ММР в Україні. Адаптація існуючої системи поводження з ВЯП. Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища (INUDECO 2025): Матеріали X Міжнар. конф. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2024. С. 9.

В рамках даної роботи автором продемонстровано аналіз можливості адаптації та застосування існуючої системи поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП) в Україні для ВЯП малих модульних реакторів.

Проаналізовані основні чинники, що впливають на безпеку у контексті вимог чинного законодавства з використанням міжнародного досвіду.

9. Бегун В.В., Гашимов А.М. Оцінка безпеки ММР по радіаційному фактору на майданчику АЕС. Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища (INUDECО 2024): Матеріали ІХ Міжнар. конф. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2024. С. 5.

В даній роботі представлено аналіз впливу радіаційного чинника на майданчику АЕС ММР на забезпечення безпеки.

10. Кньовець Д.В., Гашимов А.М. Визначення найбільш ефективної процедури відновлення при аварії з протічкою першого контуру. Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: матеріали XVII Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів (Київ, 23–26 квітня 2019 р.). Київ, 2019. Т. 1. С. 17. URL: https://iate.kpi.ua/uploads/p_21_46257126.pdf. (дата звернення: 19.12.2025).

В роботі представлено аналіз ефективності аварійних стратегій при виникненні аварій з течією першого контуру на АЕС з ВВЕР.

11. Бегун В.В., Гашимов А.М. Модифікація комп'ютерної розрахункової моделі реакторної установки ВВЕР-1000. Детальне моделювання термопар. Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Івано-Франківськ, 6–8 липня 2023 р.). Івано-Франківськ, 2023. С. 165–166. ISBN: 978-617-8128-23-4.

В даній роботі автором представлено обґрунтування та підходи до моделювання термопар при розробці імітаційної комп'ютерної моделі.

12. Філонюк Д.А., Гашимов А.М. Визначення набору реєстрованих параметрів, які достовірно характеризують перехід від запроектої аварії до тяжкої аварії. Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: матеріали XVI Міжнар. наук.-практ. конф. аспірантів, магістрантів і студентів (Київ, 24–27 квітня 2018 р.). Київ, 2018. Т. 1. С. 31.

В роботі представлено аналіз параметрів, що обґрунтовано можуть бути використані для визначення переходу запроектої аварії в важку фазу.

13. Vaglio-Gaudard C., Airola M., Ambrosini W., Crevon S., De Angelis A., Fütterer M. A., Goicea A., Hashymov A., Hollands T., Ikonen J. P. et al. The EURATOM TANDEM Project to Pave the Way of Nuclear SMR Integration into Hybrid Energy Systems Contributing to Net-Zero Emission. SSRN. 2025. (Preprint). DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.5405285>.

В роботі проведено розробку та розрахунки тепло гідравлічних процесів в ММР, що демонструють можливість безпечної експлуатації гібридних енергетичних установок.

14. Von Oertzen G., Nitzsche O., Gashimov A. Sampling plans for use case 1. UC1 sampling plan, liquid waste storage tanks, JRC Ispra. INSIDER Project (Horizon 2020). Deliverable D3.4. 2019. 20 p. URL: <https://insider-h2020.eu/wp-content/uploads/2019/04/INSIDER-D3.4-UC1-sampling-plan-V2-PU.pdf>. (дата звернення: 19.12.2025).

В рамках роботи описані новітні методи радіаційного дослідження ядерних

об'єктів неінвазивними методами та підвищення точності таких досліджень.

15. Bernard O., Etcheto J., Garcia M., Hashymov A. et al. Description of thermal-hydraulics models. Results of steady-state benchmark. CAMIVVER Project (Horizon 2020). Deliverable D7.1. 2021. 30 p. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/945081/results>. (дата звернення: 19.12.2025).

В даній роботі проведено розробку моделі РУ ВВЕР-1000 підвищеної точності та виконано розрахунок стаціонарного (безаварійного) стану. Проведено порівняльний аналіз результатів розрахунку виконаного з використанням різних комп'ютерних кодів.

16. Hashymov A., Sevbo O. A comprehensive review of the available VVER data for verification and validation of neutronics and thermal-hydraulics codes. CAMIVVER Project (Horizon 2020). Deliverable D3.1. 2021. 25 p. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/945081/results>. (дата звернення: 19.12.2025).

Представлено аналіз даних необхідних для розробки, верифікації та валідації комп'ютерної моделі ВВЕР-1000.

17. Stefanova A., Groudev P., Vryashkova P., Hashymov A. et al. Results of Kozloduy-6 MCP start-up transient benchmark. CAMIVVER Project (Horizon 2020). Deliverable D7.2. 2022. 30 p. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/945081/results>. (дата звернення: 19.12.2025).

Представлено порівняльний аналіз моделювання перехідного процесу з запуском ГЦН з використанням комп'ютерних кодів RELAP5, CATHARE та ATHLET. Автором виконано моделювання з використанням коду RELAP5, аналіз та порівняння результатів розрахунків.

18. Bernard O., Böttcher M., Hashymov A. et al. Description of CFD models from partners. Result of outlet flow distribution benchmark. CAMIVVER Project (Horizon 2020). Deliverable D6.1. 2022. 35 p. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/945081/results>. (дата звернення: 19.12.2025).

В цій роботі автором проведено детальне моделювання розподілу потоків теплоносія в активній зоні ВВЕР-1000 за допомогою коду FLUENT.

19. Weyermann F., Buchholz S., Hashymov A. Small modular reactor for a European safe and decarbonized energy mix (TANDEM). ATHLET SMR model description. TANDEM Project (EURATOM). Deliverable D2.7. 21 p. URL: <http://tandemproject.eu/docs/deliverables/WP2/D2.7.pdf>. (дата звернення: 19.12.2025).

В роботі проведено розробку моделі ММР в коді ATHLET, що використовувалась в цілях підтвердження безпеки експлуатації ММР в складі гібридної енергетичної установки.

Відповідно до вимог п. 8 Постанови КМУ № 44 від 12 січня 2022 року, наукові праці здобувача враховано у кількості 3 публікацій, за якими висвітлені результати дисертаційної роботи. Дві з наведених публікацій прирівнюються до двох кожна згідно цієї ж постанови.

ВВАЖАТИ, що дисертаційна робота Гашимова А.М. «Метод визначення критеріїв початку пошкодження активної зони реакторної установки ВВЕР-1000 за результатами моделювання теплогідравлічних процесів», подана на здобуття ступеня доктора філософії, за своїм науковим рівнем та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам щодо оформлення дисертацій, затверджених наказом МОН України від 12.01.2017 № 40 зі змінам і доповненнями та вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, який затверджено постановою КМУ від 12.01.2022 № 44, зі змінами.

Дисертація відповідає напряму наукових досліджень освітньо-наукової програми 122 – Комп'ютерні науки третього освітньо-наукового рівня вищої освіти Інституту проблем математичних машин і систем НАН України зі спеціальності 122 — Комп'ютерні науки.

РЕКОМЕНДУВАТИ:

Дисертаційну роботу «Метод визначення критеріїв початку пошкодження активної зони реакторної установки ВВЕР-1000 за результатами моделювання теплогідравлічних процесів» подану Гашимовим Артуром Маратовичем на здобуття ступеня доктора філософії, до захисту.

Головуючий на засіданні

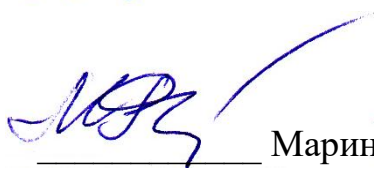
Завідувач відділу №210 «Математичного моделювання морських та річкових систем»,

д.ф.-м.н.,

член-кореспондент НАН України  Ігор БРОВЧЕНКО

Секретар

н.с.

 Марина РЕДКОВСЬКА