

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Філонова Владислава Віталійовича

на тему «**Прогнозування режимів погіршеного теплообміну в перспективних реакторах IV покоління з надкритичними параметрами теплоносія**»

представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 14 «Електрична інженерія»
за спеціальністю 143 «Атомна енергетика»

Актуальність теми дисертації.

Актуальність дисертаційної роботи полягає в необхідності створення нових або адаптація існуючих методів розрахункової гідродинаміки та теплообміну для покращеного прогнозування характеристик режиму погіршеного теплообміну в перспективній активній зоні на основі існуючих експериментальних досліджень. Важливою характеристикою таких методів повинна бути однозначність критерію безпечної експлуатації перспективної активної зони, а також консервативний спосіб оцінки, який застосовується контролювано, тобто без «закриття» існуючої невизначеності.

Для України розробка власних моделей, програмних комплексів та підходів є чи не єдиною можливістю бути залученими до створення перспективних реакторів чи наукового прогресу в атомній енергетиці.

Представлена на захист дисертація має стратегічну мету стати однією з таких робіт, що стануть основою для розробки чи розширення можливостей вже існуючих програмних комплексів, які у майбутньому можуть бути корисними у вітчизняній інженерній практиці, та дадуть можливість вирішувати актуальні задачі з урахуванням світових трендів.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- Вперше побудована адаптація методу передаточної матриці для задач неізотермічної теплогідравліки при екстремально-нелінійній поведінці теплофізичних властивостей теплоносія. На основі введених понять «базової» та «коригуючої» змінних побудовані аналітичні функції елемента, які дають можливість отримати точний розв'язок для абстрактних величин.

- Запропоновано спосіб сумісного розв'язання диференціальних та трансцендентних рівнянь, які дозволяють підвищити надійність розрахунків режимів нелінійного теплообміну із застосуванням неявних, неоднозначних кореляцій.

- Адаптовано надійні методи, які побудовані для одновимірної теплогідравліки, для двовимірної постановки у наближенні «вузького каналу»

із застосуванням модифікованого визначення турбулентного переносу, яка базується на нелінійній алгебраїчній моделі турбулентності. На основі диференційних функцій інтенсивності дисипації енергії та теплообміну, а також поля тиску побудоване 1D 2D спряження запропонованих методів, що дозволило отримати підхід, який вміщає в собі переваги системних кодів та CFD, оскільки дозволяє оперувати як з локальними, так і з інтегральними характеристиками потоку.

- Запропонована проста адаптація двозонної температурної пристінкової функції, показано особливості її імплементації в пакети обчислювальної гідродинаміки. Наведені результати її застосування для прогнозування режимів погіршеного теплообміну.

- На основі розробленої спеціальної процедури спряження теплогідравлічної та нейтронофізичної задачі виконана оцінка впливу погіршеного теплообміну на критичність системи, що дозволило судити про особливості переходу через критичну температуру в умовах ядерного обігріву. Побудовані параметричні функції профілів енерговиділення, які є характерними для теплообміну при надкритичних параметрах в умовах ядерного обігріву.

Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки України. Окремі результати пов'язані з науково-дослідницькою роботою, яка проводилася на кафедрі атомної енергетики КПІ ім. І. Сікорського: №2207, «Дослідження теплогідравлічних процесів в елементах систем тепловідведення для перспективних об'єктів атомної енергетики, реєстраційний номер 0221U107187, також в рамках Euratom Research and training programme 2019-2020, ECC-SMART(Grant Agreement No 945234), на базі ТОВ «ІПП-Центр». Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Філонова В.В., повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 143 Атомна енергетика та напрямкам досліджень відповідно до освітньо-наукової програми «Атомна енергетика» третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Філонова Владислава Віталійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською. Матеріал викладено доступною для сприйняття мовою із дотриманням загальноприйнятої термінології та інші характеристики.

Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 242 сторінки.

У вступі обґрунтовано актуальність розробки спеціальних процедур, подано загальну характеристику роботи, сформульована її мета, основні задачі, об'єкт та предмет досліджень, наведена наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, представлено інформацію про особистий внесок здобувача та апробацію роботи, її структуру та обсяг.

У **першому розділі** приведений критичний огляд сучасного стану досліджень теплообміну при надкритичних параметрах теплоносія. Розглянуті основні фізичні аспекти погіршення теплообміну, а також складність структурних досліджень течії.

Другий розділ присвячений адаптації методу передаточної матриці (ТММ) для аналізу нелінійних термо-гідравлічних процесів при надкритичних параметрах теплоносія. Сформовані базові принципи лінеаризації та числового розв'язання вихідної системи рівнянь. Запропонований метод фактично знімає обмеження на вид кореляцій для чисел Ейлера та Нусельта і має покращену стабільність як при застосуванні неявних кореляцій так і при перехідному процесі. Розроблений метод може інтерпретуватися як основа сучасних кодів теплогідравліки.

Третій розділ присвячений розширенню можливостей методів одновимірної теплогідравліки, які детально описані у другому розділі, шляхом введення диференційних функцій для визначення процесів інтенсивності дисипації та теплообміну. Здійснено логічний перехід від управляючих рівнянь одновимірного підходу до двовимірної осесиметричної постановки у вигляді моделі «вузького каналу». Запропонований альтернативний вигляд для функціональної залежності дотичних напружень, що дозволило підвищити стабільність методу. Завдяки застосуванню понять «базової» та «коригуючої» величини, які введені у другому розділі, для отриманої системи вдалося побудувати розв'язок у вигляді суми ряду, коефіцієнти розкладу якого визначаються за допомогою ефективної числової процедури. Наведені результати валідації.

Четвертий розділ присвячений проблемі адаптації існуючого універсального чи спеціалізованого інструментарію теплогідравлічного аналізу для нелінійних задач теплообміну при надкритичних параметрах теплоносія при погіршенні тепловіддачі. Розглянуті складності прогнозу нелінійного теплообміну при надкритичних параметрах інженерними методами розрахункової гідродинаміки. Запропоновано простий спосіб адаптації двозонної температурної пристінкової функції Кадера на основі існуючих зондових досліджень для двоокису вуглецю. Обговорюється проблема імплементації в універсальні пакети обчислювальної гідродинаміки CFD, яка базується на способі вибору опорної координати пристінкової зони для визначення динамічної швидкості та безрозмірної температури. На прикладі ANSYS CFX показаний один із способів створення спеціальної

користувальницької процедури, яка має покращену тенденцію щодо прогнозу аксіального профілю температури при погіршеному теплообміні. У розділі проведено калібрування та валідацію отриманих результатів на основі експериментальних досліджень для вертикальних труб та стержневих збірок імітаторів твел. Також обговорюються особливості запропонованої імплементації, та сформовані рекомендації для застосування та подальшого удосконалення інженерних підходів для прогнозування погіршення теплообміну при надкритичних параметрах теплоносія.

П'ятий розділ присвячений розробці спеціального інструментарію для прогнозу режимів теплообміну з надкритичними параметрами теплоносія в умовах ядерного обігріву. Для цього було виконано спряження теплогідравлічної частини, яка описана у розділі 2 та 3, за рахунок сполучення поля тиску та введення інтегральних характеристик потоку з нейтронофізичною задачею. Розроблений спеціальний інтерфейс спряження із зональною моделлю тепловиділяючого елемента (твел), в якій джерело енерговиділення є результатом розв'язку нейтронофізичної задачі при наперед заданих умовах критичності системи. З метою оптимізації спряжених розрахунків сформовані параметричні профілі енерговиділення, які отримані за допомогою MCNP4C, які сполучаються із чарунковим кодом WIMS5b. У розділі розглянуті особливості прогнозу режимів теплообміну в умовах ядерного обігріву, а також вплив форми погіршеного теплообміну на критичність системи.

У **шостому розділі** наведені результати оцінки стаціонарного стану перспективного реактора ECC-SMART із застосуванням підходів, які описані у розділах 2-5. Побудована еквівалентна теплогідравлічна схема для попередньої оцінки енерговиділення в тепловиділяючих збірках (ТВЗ). Розглянуті питання імплементації коефіцієнтів переносу та енерговиділення в пристінковій зоні на основі спеціальної пристінкової функції (розділ 4) та оцінок спряженого коду (розділ 5). Застосовані методи дозволили в десятки разів скоротити дискретизацію повної CFD моделі перспективного реактора, де проточна частина активної зони виконана досить точно.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 11-ть наукових публікаціях здобувача, серед яких: 1-на стаття у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 2-ві статті у періодичних наукових виданнях, проіндексовані у базі даних Scopus, які у виданнях, віднесених до першого — третього квартилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Також результати дисертації були апробовані на 8-ми наукових фахових конференціях.

Особистим внеском здобувача до всіх наукових публікацій, опублікованих із співавторами та зарахованих за темою дисертації є:

- постановка мети та задачі дослідження, виокремленні проблематики розгляду погіршеного теплообміну в умовах перспективних активних зон;
- підготовка бази даних по експериментальним дослідженням в яких особливу увагу приділено режимам з погіршеним теплообміном;
- розробка та реалізація відповідних математичних підходів, а саме повна формалізація й автоматизація лінеаризації, та узагальнення її на будь яку систему диференціальних рівнянь;
- визначення оптимальних форм та змінних, які суттєво поліпшують конвергентність та стабільність запропонованих підходів;
- розробка бібліотеки кореляцій для гідравлічного опору, коефіцієнту тепловіддачі, а також турбулентного числа Прандтля; реалізація автоматичної побудови карт застосовності експериментальних узагальнень для тепловіддачі;
- розробка та реалізація спеціальних поправок для температурної пристінкової функції;
- реалізація концепції параметричних функцій полів енерговиділення;
- розробка способу наскрізної ітерації для спряжених розрахунків із використанням одновимірної, двовимірної теплогідравліки за нейтронефізичною частиною;
- в підборі верифікаційних та валідаційних тестів;
- застосуванні підходів для оцінки номінальних параметрів стану.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

Робота є завершеною науковою працею, матеріал викладено послідовно з дотриманням загальнонаукової термінології, не містить граматичних помилок і незавершених речень. З тексту дисертації можна виділити практичне значення отриманих результатів які можуть бути використанні при проектуванні перспективних активних зон реакторів з надкритичними параметрами теплоносія. Наведені алгоритми та підходи можуть стати основою спеціалізованого коду, або ж бути доробком для адаптації існуючих кодів поліпшеної оцінки типу RELAP, або CFD методів для підвищення їх прогностичних можливостей та оптимізації розрахунків.

Окрім незначного зауваження до першої глави – стиль написання ніби це дослідження яке наразі досліджується в даній роботі, а не критичний аналіз робіт інших авторів, до дисертаційної роботи більше зауважень не має.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Філонова Владислава Віталійовича на тему «Прогнозування режимів

погіршеного теплообміну в перспективних реакторах IV покоління з надкритичними параметрами теплоносія» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для електричної інженерії. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.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.

Здобувач Філонов Владислав Віталійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань Електрична інженерія за спеціальністю 143 Атомна енергетика.

Рецензент:

Доцент кафедри атомної енергетики
НН ІАТЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського,
к.т.н., доцент



Олександр БАРАНЮК



«27» квітня 2023 року

Підпис Доц. Баранюка О.В.
Засвідчую, перший
Заступник директора
НН ІАТЕ Євген ШЕВЕЛЬ

