

ВІДГУК

**офіційного опонента Авраменка Андрія Олександровича
на дисертаційну роботу Філонова Владислава Віталійовича
на тему «Прогнозування режимів погіршеного теплообміну в
перспективних реакторах IV покоління з надкритичними
параметрами теплоносія»,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 143 – «Атомна енергетика».**

Актуальність теми дисертації

З точки зору розвитку перспективних атомних енергогенеруючих технологій реакторів IV покоління найбільш повно відповідає прагматизму та консервативності галузі концепт з надкритичними параметрами теплоносія. З наукової точки зору дослідження які виконуються для майбутньої атомної енергетики повинні базуватися на апробованих методах, які мають мінімальну кількість невизначеності кінцевого результату, що підтверджується досвідом впровадження та експлуатації реакторних установок минулих поколінь. З технічної точки зору обладнання перспективного енергоблоку повинно базуватися на існуючій уніфікації номенклатури виробництва. Зважаючи на світову тенденцію росту питомої ціни спорудження енергоблоків поколінь 3/3+, вище зазначені аспекти в сукупності із підвищенням ефективності (ККД) дозволяють перспективному концепту конкурувати із апробованими технологіями. На відміну від інших концептів реакторів IV покоління, технологія з надкритичними параметрами в перспективі дозволить суттєво знизити металоємкість енергоблоку принаймні із-за зменшення в 5-8 разів масової витрати теплоносія (із-за псевдофазового переходу) при тій самій енергонавантаженості активної зони. Це також призведе до суттєвого зменшення майданчику перспективної електростанції. Багаторічний досвід експлуатації парових котлів з надкритичними параметрами дозволить значно поліпшити наукові дослідження в області матеріалознавства для виготовлення високотемпературного обладнання зі строком служби 60+ років. Актуальність напрямку не викликає сумнівів.

Проблема погіршеного теплообміну, як і феномену теплопередачі при надкритичних параметрах суттєво відрізняється з точки зору умов обігріву. На відміну від електричного (експерименти) енерговиділення чи обігріву каналів із-за згоряння палива (випромінення), ядерне тепловиділення має суттєвий зворотній зв'язок як по температурі теплоносія, що визначає густину, так і по температурі тепловиділяючих елементів. Зважаючи на екстремальну поведінку теплофізичних властивостей в області псевдофазової температури, умови

початку погіршеного теплообміну можуть в значній мірі відрізнятися в проточній частині референтної конструкції активної зони.

З точки зору прогнозу погіршення тепловіддачі існують суттєві проблеми як при узагальненні експериментальних досліджень, так і при безпосередньому розрахунку режимів із використанням напівемпіричної теорії теплообміну, яка базується на методах розрахункової теплогідравліки. Фактично це означає, що існуючі підходи та програмні засоби, які досить добре зарекомендували себе при системному аналізі теплогідравлічного стану існуючих енергоблоків, а також методи розрахункової гідродинаміки в переважній більшості не є придатними та потребують адаптації або ж розробки специфічних кодів.

Представлені в дисертаційній роботі Філонова В.В. результати присвячені проблематиці прогнозу режимів погіршеного теплообміну саме в умовах енерговиділення в перспективних активних зонах. Запропоновані спеціальні методи одновимірної теплогідравліки підвищеної стабільності, а також підходи, що дозволяють застосовувати переваги за фізичною наповненістю методів розрахункової теплогідравліки, як альтернативу застосування неявних кореляцій. Розроблені та реалізовані моделі застосовані безпосередньо для одного із потенційних концептів малого-модульного реактора проекту ЕСС-SMART з надкритичними параметрами теплоносія. Таким чином, представлені в роботі дослідження, ідеї та їх реалізація є актуальними та спрямованими на вирішення спеціальних питань теплогідравлічної надійності перспективних водо-водяних реакторів IV покоління.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірність та новизна

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше метод передаточних матриць адаптовано для задач неізотермічної теплогідравліки при екстремально-нелінійній поведінці теплофізичних властивостей теплоносія.

2. Вперше розроблено спосіб сумісного розв'язання диференціальних та трансцендентних рівнянь одновимірної теплогідравліки з використанням уніфікованого формалізму, що дозволяє підвищити надійність розрахунків режимів нелінійного теплообміну.

3. Вперше здійснено адаптацію побудованих надійних (підвищеної стабільності) методів одновимірної теплогідравліки для двовимірної постановки у наближенні «вузького каналу». Побудоване спряження 1D-2D запропонованих методів на основі диференціальних функцій інтенсивності дисипації енергії та теплообміну, а також поля тиску, на основі чого отримано підхід, що об'єднує переваги системних кодів та CFD.

4. Запропоновано та представлено особливості імплементації в пакети обчислювальної гідродинаміки простої адаптації двозонної температурної пристінкової функції базуючись на зондових дослідженнях, які представлені в літературі, а також результати її застосування при прогнозі режимів погіршеного теплообміну.

5. Виконана оцінка впливу погіршеного теплообміну на критичність системи для отримання обґрунтованих суджень про особливості переходу через критичну температуру в умовах ядерного обігріву на основі розробленої процедури спряження теплогідравлічної та нейтронно-фізичної задачі. Побудовано характерні для теплообміну при надкритичних параметрах в таких умовах обігріву параметричні функції профілів енерговиділення.

Представлені до захисту положення наукової новизни та практичної цінності є обґрунтованими та логічно витікають із висвітлених експериментальних та розрахункових проблем, а також досвіду світових наукових шкіл.

Достовірність результатів забезпечується коректною постановкою завдань і виконаних досліджень; застосуванням оригінальних підходів і сучасних математичних методів, які реалізовані власноруч чи із застосуванням відомих пакетів спеціалізованого програмного забезпечення.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене науково-практичне завдання виконано повністю, а здобувач повною мірою оволодів методологією наукової та спеціалізованої інженерної 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 освітньої програми Атомна енергетика.

Основні результати дисертації представлені в 11 публікаціях наукових робіт, серед яких: 2 статті у міжнародних журналах, які індексуються у наукометричній базі даних Scopus, 1 стаття у фаховому виданні України, а також 8 тез доповідей на міжнародних конференціях та симпозіумах.

Основні результати роботи доповідалися на XV-й міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрантів, студентів "Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики" (Україна, м. Київ, квітень 2017), на конференції «Комп'ютерна гідромеханіка» (Україна, м. Київ, вересень 2020), на III та IV координаційній нараді МАГАТЕ по дослідженню «Understanding and Prediction of Thermal-Hydraulics Phenomena Relevant to Supercritical Water-Cooled Reactors (SCWRs)» (США, Вісконсін, м. Медісон, липень 2017 та Австрія, м. Відень, січень 2019), частина результатів доповідалася на 26

міжнародній конференції ICONE-26 (Великобританія, м. Лондон, липень 2018), на міжнародному симпозіумі по надкритичним реакторам ISSCWR-10 (Чехія, м. Прага), на міжнародній конференції механіки рідини ICTAM 2020+1 (Італія, м. Мілан).

Розглянувши звіт подібності на співпадіння, можна стверджувати, що дисертаційна робота Філонова В.В. є оригінальною науковою працею. Наведені результати не містять елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації та плагіату. Використані ідеї, тексти та результати інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова і стиль викладення результатів

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

Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Повний обсяг дисертації 242 сторінки, 101 ілюстрація, 15 таблиць, та 5 додатків на 34-ох сторінках. Список літератури включає 142 найменування.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано об'єкт і предмет дослідження, мету та завдання дисертаційної роботи, визначено наукову новизну, практичну значення одержаних результатів, відображено повноту їх викладення у публікаціях та ступінь їх апробації на вітчизняних і міжнародних конференціях. Обсяг та форма вступу відповідають загальноприйнятим вимогам до дисертації на науковий ступінь доктора філософії та достатні для ознайомлення з вихідними передумовами і змістом положень, що виносяться автором на захист.

У першому розділі виконано аналіз літературних джерел і приведено критичний огляд стану досліджень теплообміну при надкритичних параметрах теплоносія на теперішній час. Розглянуті основні фізичні аспекти погіршення теплообміну та складність досліджень структури течії теплоносія. Розглянуто сучасні напрацювання з використання DNS методів. Наведено сучасний стан застосування CFD-моделювання (аналітичні та диференціальні процедури тривимірної обчислювальної гідродинаміки) для прогнозування нелінійних задач теплообміну при надкритичних параметрах.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений адаптації методу передаточної матриці (ТММ) для аналізу нелінійних термогідравлічних процесів при надкритичних параметрах теплоносія. Сформовані основні принципи лінеаризації та числового розв'язання вихідної системи рівнянь. Запропонований метод знімає обмеження на вид кореляцій для чисел Ейлера та Нусельта і характеризується покращеною стабільністю як при застосування

неявних кореляцій так і при перехідному процесі. Цей розроблений метод може бути інтерпретований як основа сучасних кодів теплогідравліки для вищезазначених умов.

У третьому розділі наведені результати роботи по розширенню можливостей методів одновимірної теплогідравліки, що описані у другому розділі, шляхом введення диференційних функцій для визначення процесів інтенсивності дисипації та теплообміну. Описано логічний перехід від керуючих рівнянь одновимірного підходу до двовимірної осесиметричної постановки (модель «вузького каналу»). Запропонований альтернативний вигляд для функціональної залежності дотичних напружень для підвищення стабільності методу. Шляхом попередньо введених понять «базової» та «коригуючої» величини для отриманої системи побудовано розв'язання у вигляді суми ряду, коефіцієнти розкладу якого визначаються за допомогою ефективної числової процедури. Запропонований підхід дозволяє прогнозувати особливості структури течії при погіршеному теплообміні при значному скороченні розрахункових ресурсів у порівнянні з CFD відповідно наведеним результатам валідації. Цей підхід дозволяє зняти практично всі обмеження на функціональні залежності для турбулентних характеристик, а також дозволяє оперувати як з локальними параметрами так і з середньомасовими характеристиками.

У четвертому розділі виконана робота з вирішення проблеми адаптації існуючого універсального чи спеціалізованого інструментарію теплогідравлічного аналізу для нелінійних задач теплообміну при надкритичних параметрах теплоносія при погіршенні тепловіддачі. Проведено розгляд складності прогнозу нелінійного теплообміну при надкритичних параметрах за допомогою інженерних методів розрахункової гідродинаміки.

Розроблено та запропоновано простий спосіб адаптації двозонної температурної пристінкової функції Кадера для двоокису вуглецю, відштовхуючись від існуючих зондових досліджень. Проведено аналіз проблеми імплементації в універсальні пакети обчислювальної гідродинаміки CFD, яка базується на способі вибору опорної координати пристінкової зони з метою визначення динамічної швидкості та безрозмірної температури. Представлено один зі способів створення спеціальної користувацької процедури з покращеною тенденцією стосовно прогнозу аксіального профілю температури при погіршеному теплообміні на прикладі ANSYS CFX.

У п'ятому розділі наведені результати розробки спеціального інструментарію для прогнозу режимів теплообміну з надкритичними параметрами в умовах ядерного обігріву. Для реалізації даної задачі було виконано спряження теплогідравлічної частини, описаної в розділах 2 та 3, з нейтронно-фізичною задачею, шляхом сполучення поля тиску та введення інтегральних характеристик потоку. Розроблено спеціальний інтерфейс

спряження із зональною моделлю твел, в якій джерело енерговиділення є результатом розв'язку нейтронно-фізичної задачі при наперед заданих умовах критичності системи. Для оптимізації спряжених розрахунків сформовані параметричні профілі енерговиділення, які отримані за допомогою MCNP4C, які поєднуються із комірковим кодом WIMS5b. Розглянуто особливості прогнозування режимів теплообміну в умовах ядерного обігріву, а також вплив форми погіршеного теплообміну на критичність системи.

Шостий розділ присвячено опису результатів оцінки стаціонарного стану перспективного реактора ECC-SMART із застосуванням підходів, описаних у 2-му та 5-му розділах. Попередня оцінка турбулентного числа Прандтля, а також енерговиділення в ТВЗ виконано шляхом побудови еквівалентної теплогідравлічної схеми. На основі спеціальної пристінкової функції (розділ 4) та оцінок спряженого коду (розділ 5) розглянуті питання імплементації коефіцієнтів переносу та енерговиділення в пристінковій зоні. Дискретизація повної CFD моделі перспективного реактора, де проточна частина активної зони виконана досить точно, була в десятки разів скорочена завдяки застосуванню методів.

Матеріал дисертації подано в логічній послідовності відповідно до поставлених завдань дослідження, їх розв'язки повністю розкрито, матеріал викладено загальноприйнятою технічною мовою.

Обсяг і структура роботи відповідають вимогам, що висуваються до дисертацій доктора філософії.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

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

Також результати дисертації були апробовані в рамках 8-ми наукових фахових конференцій.

Зміст та науковий рівень публікацій та доповідей на конференціях висвітлюють значний вклад до наукового дослідження за темою дисертації та відповідають принципам академічної доброчесності, а наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. Для перспективної реакторної установки з надкритичними параметрами теплоносія чи не єдиним прийнятним теплоносієм є вода, проте найповніші дослідження гідродинаміки та теплообміну, які дають уявлення про структуру турбулентного потоку отримані на двоокисі вуглецю. Чи будуть якісно змінюватись характеристики турбулентності в залежності від типу теплоносія в особливості в околі точки псевдофазового переходу?
2. У другому розділі наведені співвідношення для визначення похідних параметрів стану (густини, внутрішньої енергії) по тиску та температурі, проте виходячи із контексту розділу не зрозуміло яким чином вони розраховуються. Також це зауваження відноситься і до залежності (2.14), в якій присутня похідна коефіцієнту тепловіддачі по температурі. Також слід зазначити, що можливо в (2.14) допущена помилка редакційного характеру, оскільки «коригуюча» величина є і в лівій і в правій частинах співвідношення, в той час, як права частина відноситься до «базової» величини.
3. У розділі 3 наведена залежність (3.12) для розрахунку турбулентної в'язкості, яка враховує профіль дотичних напружень. Яким чином розраховується значення безрозмірної координати пристінкової функції, а також розподіл дотичних напружень?
4. Не зовсім зрозуміла мета порівняння результатів розрахунків універсальним CFD пакетом у вискорейнольдсовій (high-Re) постановці з зондовими дослідженнями, оскільки як було зазначено у розділі 1 лише низькорейнольдсові (low-Re) постановки можуть прогнозувати нелінійний теплообмін. Наприклад, використання RNG моделі турбулентності в низькорейнольдсовій постановці дозволяє прогнозувати зниження тепловіддачі з урахуванням зміни турбулентного числа Прандтля.
5. У розділі 4 в залежності (4.5) наведені два варіанти визначення динамічної швидкості, а також безрозмірної координати стінки. З теоретичної точки зору ці варіанти між собою еквівалентні, тож не зрозумілим є в чому різниця.
6. Наведені параметричні функції профілю енерговиділення (розділ 5) використовують в якості змінних параметри теплогенеруючого каналу на вході (температура/густина теплоносія та відбивача). Наскільки така апроксимація за фактично нелокальними параметрами відображає дійсну картину профілю енерговиділення?
7. У шостому розділі наведені результати застосування запропонованих підходів для визначення характеристик стаціонарного стану перспективного реактора. Зважаючи на викладки у розділі 4 відносно застосування спеціальних пристінкових функцій (СПФ, імплементація в пост-

оборобку) стає не зрозумілим, яким чином СПФ застосовувалася, оскільки в розрахунковій моделі наявні контактні інтерфейси між теплоносієм та твердим тілом, через які відбувається перетік теплової енергії. Це означає, що пристінкова функція повинна бути імплементована безпосередньо в розрахунковий CFD код.

В цілому наведені зауваження направлені на краще розуміння змісту дисертаційної роботи і мають уточнюючий характер.

Висновок про відповідність дисертації вимогам МОН України щодо присвоєння ступеня доктора філософії

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 галузі знань Електрична інженерія. 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.

Офіційний опонент

заступник директора

Інституту технічної теплофізики НАН України

чл.-кор. НАН України, д.т.н, професор

 Андрій АВРАМЕНКО



М.П.

« 1 » листопада 2023 року