

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.

Відповідно важливому документу «Технологічна дорожня карта для ядерних енергетичних систем IV-го покоління» (Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, GIF-002-00,), що був прийнятий у 2002 році, до обраних реакторних технологій була включена розробка з перспективою подальшого впровадження в експлуатацію водо-охолоджувальних реакторів надкритичного тиску (НКТ, західне позначення SCWR). Серед найважливіших переваг цих реакторів перед сучасними легководними реакторами слід назвати наступні: майже на третину вища теплова ефективність (до 44% замість 34%) завдяки одноконтурній схемі АЕС з реакторами, що безпосередньо охолоджуються водою НКТ з параметрами перед турбіною 25 МПа і 540 °С; у 8-10 разів зменшена кількість води, що перекачується через реактор, за рахунок використання теплоти псевдофазового переходу (біля 1400 кДж/кг); не потрібні циркуляційні насоси (потрібні лише живильні насоси і насоси для відбору конденсату); приблизно на порядок менші габарити контейнменту; можливе використання серійного обладнання, що вже надійно працює на теплових енергоблоках НКТ; зменшення ризику неконтрольованого розповсюдження радіаційних матеріалів.

Як відомо, теплогідравлічні процеси, які протікають в енергетичних установках, визначають умови роботи теплогенеруючого, теплообмінного і допоміжного обладнання та їх здатність ефективно і надійно функціонувати протягом всього періоду експлуатації. В той же час теплогідравлічні процеси визначають можливість виникнення аварійних ситуацій, створюють умови недопущення таких ситуацій або, якщо вони відбулися, забезпечують найменші втрати. Рівень організації теплогідравлічних процесів повинен забезпечити ефективність, безпеку функціонування та надійність енергетичного устаткування.

Атомна енергетика, вклад якої в енергетичний баланс багатьох країн світу є значним, потребує зменшення капітальних і експлуатаційних витрат при одночасному підвищенні рівня безпеки. Ці вимоги можуть бути забезпечені при використанні теплоносія з надкритичними параметрами, що потребує більш глибокого вивчення теплофізичних процесів в ядерних реакторах з таким теплоносієм. Зокрема, для концепції ЯР з НКП теплоносія дуже важливим є

прогнозування настання режиму погіршеного тепловіддачі, що може мати місце в цих реакторах, а також впливу цього явища на основні характеристики перспективної активної зони є надзвичайно **актуальними**.

Дисертаційна робота Філонова В.В. виконувалася відповідно Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» за пріоритетним напрямом «Енергетика та енергоефективність»; плану держбюджетної науково-дослідної роботи МОН України «Дослідження теплогідравлічних процесів в елементах систем тепловідведення для перспективних об'єктів атомної енергетики» (№ Держ.реєстр. 0119U001065, період виконання 01.01.2019 р. – 31.12.2021 р.), яка була виконана на кафедрі атомних електричних станцій і інженерної теплофізики КПІ ім. Ігоря Сікорського за пріоритетним тематичним напрямом «Технології атомної енергетики та методи оцінки її безпеки», , 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 обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна одержаних результатів дисертаційної роботи на полягає у розробці та удосконаленні спеціальних процедур та інструментів для оцінки режимів погіршеного теплообміну в активній зоні перспективних реакторів IV покоління на основі існуючих експериментальних даних.

Найбільш важливі результати, отримані в процесі виконання досліджень, полягають у 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, що дозволяє підвищити надійність розрахунків режимів нелінійного теплообміну;

3. Вперше здійснено адаптацію побудованих для одновимірної теплогідравліки надійних методів 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, 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.

Результати даної роботи є дуже важливими для забезпечення умов надійного охолодження реакторів нового покоління, зокрема для забезпечення інженерних розрахунків водо-водяних реакторів з надкритичними параметрами. Практична цінність отриманих результатів полягає у суттєвому спрощенні оцінювання умов і параметрів погіршеного теплообміну; у значному покращанні робастності (нечутливості до різних відхилень) існуючих кореляцій; у значному спрощенні аналізу із застосуванням CFD, оскільки пристінкові функції дозволяють зменшити густину дискретизації розрахункової області. . Результати роботи можуть використовуватися при проектуванні перспективних активних зон реакторів за надкритичними параметрами теплоносія. Наведені алгоритми та підходи можуть стати основною спеціалізованого коду, або ж бути доробком для адаптації існуючих кодів для підвищення їх прогностичної можливості та оптимізації розрахунків.

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

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій та їх достовірність підтверджується тим, що вони базуються на фундаментальних фізичних закономірностях та на результатах теоретичних і унікальних експериментальних досліджень. Роботі притаманні логічна послідовність постановки та вирішення завдань досліджень.

Основні результати дисертації представлені у 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 МАГATE 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 ICON-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).

Отримані наукові результати, висновки і рекомендації є виваженими та коректними, апробовані на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, включаючи конференції з участю провідних зарубіжних вчених, що працюють над проблемою розробки реакторів надкритичного тиску.

Мова та стиль викладення результатів.

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

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.

На основі критичного літературного огляду сформовані мета і завдання роботи.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячений адаптації методу передаточної матриці 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 застосуванні неявних кореляцій так і при перехідному процесі. Розроблений метод може бути інтерпретований як основа сучасних кодів теплогідравліки для вищезазначених умов.

У третьому розділі роботи 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»). Приведено пропонований 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. Пропонований підхід дозволяє прогнозувати особливості структури течії при погіршеному теплообміні при значному скороченні розрахункових ресурсів у порівнянні з CFD відповідно результатам валідації, що наведені. Цей підхід дозволяє зняти практично всі обмеження на функціональні залежності для турбулентних характеристик, та дозволяє оперувати як з локальними параметрами так і з середньомасовими характеристиками, як і для ТММ.

У четвертому розділі роботи приводиться 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 і 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 із способів створення спеціальної користувальницької процедури з покращеною тенденцією стосовно прогнозу аксіального профілю температури при погіршеному теплообміні на прикладі ANSYS CFX.

У даному розділі на основі експериментальних досліджень для вертикальних труб та стержневих збірок імітаторів твел проведено калібрування та валідацію отриманих результатів. Проведено аналіз особливостей пропонованої імплементації, розроблено рекомендації для застосування та подальшого удосконалення інженерних підходів для прогнозування погіршення теплообміну при надкритичних параметрах теплоносія.

У п'ятому розділі роботи наведені результати розробки спеціального інструментарію для прогнозу режимів теплообміну з надкритичними параметрами в умовах ядерного обігріву. Для реалізації цього було виконано спряження теплогідравлічної частини, описаної в розділах 2 та 3, шляхом сполучення поля тиску та введення інтегральних характеристик потоку з нейтронно-фізичною задачею. 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, завдяки застосованим методам була в десятки разів скорочена.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до стандарту ДСТУ 3008:2015 "Звіти у сфері науки і техніки. Структура та оформлювання" та Наказу від 12.01.2017 № 40 Міністерства освіти і науки України «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій (Із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки № 759 від 31.05.2019)»

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

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

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.

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

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1) У розділі 1 в таблиці 1.3 наведені критерії для прогнозування погіршеної тепловіддачі, проте судячи з подальших викладок ці кореляції не застосовувалися, що наприклад могло б доповнити розділ 6.

2) У розділі 1 на сторінці 61 зазначено, що SRS методи в більшості випадків придатні лише для наукових досліджень, проте ґрунтовних пояснень не надано.

3) У другому розділі на рисунку 2.7 наведений набір експериментальних даних для води при надкритичних параметрах, які були підготовлені та систематизовані за результатами літературного огляду. Проте із змісту дисертації не вдається встановити, чи відбувався попередній аналіз відсутності протиріч у результатах експериментальних досліджень (перевірка однозначності набору даних).

4) В додатку В наведена оцінка впливу форми погіршеного теплообміну на напружений стан паливних збірок. За результатами даного аналізу зроблений висновок, про відсутність суттєвого впливу форми аксіального розподілу температури, проте зазначено, що визначальним є також умови закріплення тепловіділяючих елементів. Тож постає питання відносно того, наскільки отримані результати є референтними, та чи будуть справедливими висновки у випадку реальної системи.

5) Зауваження редакційного характеру були опрацьовані дисертантом під час спілкування в індивідуальному порядку. Деякі особливості, такі як «стержень» - «стрижень» дисертант залишив без змін посилаючись на допустимість вживання деякої термінології технічного спрямування в українській мові.

В цілому наведені зауваження напрямлені для кращого розуміння змісту дисертаційної роботи і мають уточнюючий характер.

Висновок про дисертаційну роботу.

Викладене дозволяє вважати, що дисертаційна робота на тему «Прогнозування режимів погіршеного теплообміну в перспективних реакторах IV покоління з надкритичними параметрами теплоносія» відповідає п. 6 «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, а її автор Філонов Владислав Віталійович заслуговує присудження ступеня доктора філософії зі спеціальності 143 – «Атомна енергетика».

Рецензент:

Старший науковий співробітник
науково-дослідної(експериментальної) лабораторії
процесів в енергетичному обладнанні

ІНІАТЕ, КІП ім. Ігоря Сікорського, к.т.н., с.н.с.

Олександр НІЩИК

М.П.

« 28 » квітня 2023 року



Підпис с.н.с. Ніщика О.

Засвідчую, перший

Заступник директора

ІНІАТЕ Євген ШЕВЕЛЬ