

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Онищука Юрія Анатолійовича  
на тему «Вдосконалення методики розрахунків реакторної установки  
ВВЕР-1000 шляхом спряження розрахункових засобів»,  
представлену на здобуття ступеня доктора філософії  
в галузі знань 14 «Електрична інженерія»  
за спеціальністю 143 «Атомна енергетика»

### **Актуальність теми дисертації.**

Сучасні вимоги до безпеки вимагають усе більш глибокого та детального вивчення й моделювання теплогідравлічних процесів та явищ, характерних для аварійних сценаріїв на атомних електростанціях. Розрахункові методи моделювання є важливими інструментами для прогнозування теплогідравлічних режимів роботи систем і обладнання АЕС, що є ключовим для забезпечення їхньої надійності та безпеки.

В останні десятиліття було розроблено велику кількість інтегральних розрахункових кодів, які дозволяють створювати повноцінні теплогідравлічні моделі реакторних установок (РУ) та моделювати різноманітні гіпотетичні сценарії, отримуючи інтегральний відгук від РУ. Системні теплогідравлічні коди (СТГ-коди) досягли високого рівня точності та реалістичності у прогнозуванні поведінки АЕС при помірних обчислювальних витратах. Однак вони мають обмеження у дослідженні складних тривимірних теплогідравлічних та масообмінних процесів зі складною геометрією та багатофазними потоками. Для вирішення подібних завдань найкращим засобом є коди обчислювальної гідродинаміки (CFD-коди), які, проте, вимагають значно більших обчислювальних ресурсів у порівнянні зі СТГ-кодами.

Тому розробка та оптимізація програмних кодів для моделювання та аналізу теплогідравлічних процесів є одним з основних напрямків досліджень у галузі безпеки АЕС. Важливим аспектом є вдосконалення методики та технології спряження системних теплогідравлічних кодів із CFD-кодами, що дозволяє поєднати їхні переваги та забезпечити більш точне моделювання складних процесів.

Запропоновані в дисертаційній роботі підходи зі спряження розрахункових засобів можуть бути використані для проведення розрахункових аналізів під час розробки та науково-технічної підтримки стратегій із аваріями на АЕС, для обґрунтування безпеки АЕС, а також для розробки нових програмних засобів або оптимізації та покращення розрахункових можливостей наявних.

Використання цих підходів сприяє підвищенню точності моделювання, що є надзвичайно важливим для прогнозування поведінки АЕС у різних режимах роботи, включаючи аварійні.

Враховуючи вищезазначене, тема дисертації є досить актуальною, оскільки вона спрямована на вирішення важливих науково-технічних завдань, пов'язаних із підвищенням безпеки атомних електростанцій, що є пріоритетним напрямком сучасної енергетики.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1) Запропоновано класифікацію наявних підходів та розвинуто теорію щодо спряженого розрахункового моделювання теплогідравлічних процесів шляхом застосування системних теплогідравлічних кодів та кодів обчислювальної гідродинаміки;

2) Запропоновано новий спряжений підхід з оцінки можливості виникнення гідравлічного удару у проточній частині ГЦН-195М під час перехідного процесу, викликаного заклинюванням валу.

3) Встановлено відсутність гідравлічного удару у проточній частині ГЦН-195М при перехідному аварійному процесі пов'язаному з заклинюванням валу;

4) Запропоновано підхід для вирішення геометрично та теплофізично складних нестационарних задач з оцінки граничних умов на зовнішній поверхні корпусу реактору та верхнього блоку з використанням спряження між системним теплогідравлічним кодом, методами обчислювальної гідродинаміки і аналітичними методами;

5) Шляхом визначення та обґрунтування комбінацій замикаючих моделей випромінювання і турбулентності встановлено можливість коректного моделювання складного теплообміну розрахунковим кодом ANSYS CFX;

6) Виконано оцінку граничних умов на зовнішній поверхні верхнього блоку та корпусу реактору в стаціонарних та перехідних режимах, що надає кількісні та якісні характеристики для подальшого аналізу крихкої міцності в рамках завдань з оцінки продовження терміну експлуатації даних елементів.

Результати дисертації є обґрунтованими та логічно витікають із висвітлених експериментальних та розрахункових проблем. Достовірність результатів забезпечується коректною постановкою завдань і виконаних досліджень, застосуванням оригінальних підходів і сучасних математичних методів, які реалізовані власноруч та із застосуванням відомих пакетів спеціалізованого програмного забезпечення.



Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетному напрямку «Енергетика та енергоефективність» відповідно Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки».

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 Онищука Ю.А 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.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Енергетика та енергоефективність».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Онищука Юрія Анатолійовича 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 мовою. Матеріал викладено доступною для сприйняття мовою із дотриманням загальноприйнятої термінології та інших характеристик.

Дисертація складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 198 сторінок.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, наведено загальну характеристику роботи, сформульовано її мету та основні завдання, визначено об'єкт та предмет дослідження. Представлено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, а також інформацію про особистий внесок здобувача та апробацію роботи, її структуру та обсяг.

У першому розділі наведено критичний огляд сучасного стану досліджень та спряженого моделювання теплогідравлічних процесів у РУ типу ВВЕР. Розділ містить огляд традиційних підходів до моделювання за допомогою системних теплогідравлічних кодів, таких як RELAP5, ATHLET, TRACE, CATHARE. Проаналізовано наукову літературу щодо CFD-методів та основних етапів отримання чисельного рішення з їх допомогою. Також розглянуто застосування CFD-кодів для аналізу безпеки АЕС. Виконано огляд стану розробки та застосування спряжених системних теплогідравлічних (СТГ) та



CFD розрахункових засобів на теплогідравлічних моделях різної конфігурації та складності. Здійснено класифікацію підходів до теплогідравлічного спряження за трьома основними стратегіями: архітектура спряження, просторова декомпозиція розрахункової області, числова схема спряження. Розглянуто кілька підкатегорій кожної стратегії для охоплення більшості можливих підходів до спряження.

У другому розділі розглянуто підхід до вдосконалення моделювання стаціонарних та перехідних режимів у теплогідравлічному обладнанні шляхом спряження системного теплогідравлічного коду RELAP5/MOD 3.2 та CFD-коду ANSYS CFX. Наводиться аналіз обраних кодів щодо можливості створення інтерфейсів для обміну даними та обрано найбільш оптимальні варіанти. Описується структура розробленого модулю для спряження RELAP5/CFX, наведено основні функції модулю, схему виконання спряженого розрахунку і обміну даними між RELAP5 та CFX. Проведено тестування модуля на послідовно з'єднаних моделях RELAP5 та CFD горизонтальних труб, а також на замкненому контурі. Результати виконаних тестових розрахунків підтверджують коректність реалізації технології спряження.

Третій розділ присвячений оцінці можливості виникнення гідравлічного удару у проточній частині ГЦН-195М при перехідному процесі пов'язаному з заклинюванням валу. Показано, що заклинювання ГЦН є небезпечним не лише з точки зору погіршення тепловідведення, але й через можливість виникнення гідравлічного удару в аварійному контурі. Представлено розроблену CFD-модель проточної частини ГЦН-195М для коду ANSYS CFX, а також модифіковану модель енергоблоку №1 ВВЕР 1000/В 320 ЗАЕС для коду RELAP5/MOD 3.2. Проведено моделювання перехідного процесу із заклинюванням валу ГЦН-195М з використанням спряженого підходу та зроблено висновки за результатами оцінки можливості виникнення гідравлічного удару в проточній частині ГЦН-195М.

В четвертому розділі виконується розробка спряженої розрахункової процедури для моделювання процесів теплообміну між елементами верхнього блоку та корпусу реактору з охолоджуючим середовищем системам вентиляції TL03/05. Завдання вирішується зі застосуванням спряження між системним теплогідравлічним кодом, методами обчислювальної гідродиніміки та аналітичними методами. Виконується валідація розробленої спряженої розрахункової процедури на основі експлуатаційних даних АЕС та проводяться розрахунки робочих і перехідних режимів РУ. Окрім того, на основі експериментальних даних аналізується можливість коректного моделювання складного теплообміну розрахунковим кодом ANSYS CFX, проведено визначення та обґрунтування комбінації замикаючих моделей випромінювання і турбулентності.



У висновках узагальнено основні наукові та практичні результати, отримані в дисертаційній роботі.

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 5 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 3 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України.

Також результати дисертації були апробовані на 2 наукових фахових конференціях.

Наукові публікації здобувача характеризуються високим науковим рівнем та академічною цінністю. Публікації містять оригінальні висновки, які мають значну наукову новизну. Всі використані джерела коректно цитуються, що відповідає принципам академічної доброчесності та забезпечує прозорість і чесність досліджень.

Основні наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. В роботі виконане тестування розробленого модулю спряження на простих теплогідравлічних моделях. Достовірність отриманих результатів оцінювалася в порівнянні з результатами автономних розрахунків еквівалентних RELAP5-моделей. Доцільним було б окрім графічного порівняння також визначити та вказати кількісні значення отриманих відхилень.

2. В роботі реалізовано програмний модуль для керування спряженим розрахунком RELAP5/CFX. Виникає питання, чи може цей модуль бути застосований у поєднанні з іншими розрахунковими засобами? З огляду на різноманітність сучасних інструментів для теплогідравлічного моделювання, доцільно було б розглянути можливості адаптації модуля для роботи з іншими кодами, такими як ATHLET, TRACE, CATHARE та CFD-коду Ansys Fluent. Зокрема, варто було б показати чи потрібні додаткові модифікації модуля для забезпечення сумісності, та які технічні вимоги необхідно врахувати при інтеграції з різними програмними засобами. Це розширило б сферу застосування, підвищило б універсальність і науково-практичну значущість розробки.

3. В роботі виконана валідація спряженої розрахункової процедури на основі даних випробування енергоблоку АЕС. Результати отримані зі застосуванням розрахункової процедури демонструють хорошу збіжність із



натурними даними, проте доцільним було б вказати межі похибки вимірювань задля кращого розуміння наявної невизначеності.

4. Наукову новизну одержаних результатів варто було б більш розширено доповнити результатами обґрунтування вибору замикаючих комбінацій моделей випромінювання і турбулентності, що наведені в додатку В.

5. В деяких формулах надані не всі пояснення щодо складових змінних цих формул. Однак, у більшості випадків їх тлумачення стає зрозумілим з подальшого контексту роботи.

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 Онищука Юрія Анатолійовича на тему «Вдосконалення методики розрахунків реакторної установки ВВЕР-1000 шляхом спряження розрахункових засобів» 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 14 «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 Онищук Юрій Анатолійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 143 «Атомна енергетика».

### **Офіційний опонент:**

завідувач відділу тепломасообміну і гідродинаміки  
в елементах теплоенергетичного устаткування  
Інституту технічної теплофізики НАН України  
доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент НАН України



Андрій АВРАМЕНКО

М.П.

«13» серпня 2024 року