ВІДГУК

офіційного опонента

Купріна Олександра Сергійовича

на дисертаційну роботу Куштима Антона Володимировича

«Тепловидільні збірки з твелами стрижневого типу на основі діоксиду урану для дослідницької ядерної установки джерело нейтронів»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали»

Актуальність роботи

Ядерна дослідницька установка «Джерело нейтронів» являється унікальною за проєктом і не має аналогів у світі. Розробка українських твелів і ТВЗ для даної установки є важливою і актуальною задачею, адже для цього в країні існує сировинна база та науково-технічний потенціал. Таким чином, наукова робота з розробки та виготовлення вітчизняних ТВЗ є **актуальною і не викликає сумнівів**.

В роботі розглянуті джерела інформації з напрямків застосування та складу твелів і ТВЗ для дослідницьких ядерних установок. Особливу увагу приділено літературному огляду по твелам дисперсійного типу і способам отримання часток урану різної форми, які дисперговані в алюмінієву матрицю. Приведений опис дослідницької ядерної установки «Джерело нейтронів» і штатної тепловидільної збірки типу ВВР-М2, що використана при першому завантаженні активної зони. Показано, що найбільш прийнятний варіант ядерного палива для даної установки – це розробка власної конструкції тепловидільної збірки з твелами стрижневого типу. Такий підхід значно спрощує і здешевлює експлуатацію ЯПУ «Джерело нейтронів». Це дало підставу обґрунтувати мету дисертаційної роботи та її основні завдання. Актуальність роботи підтверджується значною кількістю публікацій, доповідями на фахових конференціях, науково-дослідницькими проєктами НАН України, поточними темами та проєктами УНТЦ.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Поставлена мета досягається за допомогою апробованих експериментальних методів дослідження. Обґрунтованість результатів, що наведені в дисертації, підтверджується застосуванням методів комп'ютерного моделювання і програмування, електронної та оптичної мікроскопії, рентгенівської дифрактометрії, порошкової металургії, корозійних випробувань та механічних випробувань на розривній машині.

Дисертація представляє собою **завершену наукову працю**, яка базується на чітко сформульованій меті і завданнях досліджень.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 15 наукових працях: з них 6 робіт у наукових фахових виданнях України (4 – категорії «А», 2 – категорії «Б»), з яких 5 входять до баз Scopus і Web of Science, 3 патенти України, 5 тез доповідей.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів теоретичних досліджень підтверджується результатами відповідних експериментальних досліджень та апробованими методиками дослідження.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

1. Вперше, розроблені конструкції тепловидільних збірок, які пропонується застосувати в ДЯУ «Джерело нейтронів» на основі матеріалів з українських комплектуючих, з характеристиками, подібними до штатних ТВЗ.

2. Теплофізичні розрахунки розроблених конструкцій твелів показали, що їх температурні режими в ЯПУ є прийнятними з точки зору працездатності запропонованих паливних композицій. Температура в центрі твела ТВЗ-Х в ДЯУ «ДН» не перевищує 150 °С, а мінімальна величина

діаметрального зазору між оболонкою та сердечником в гарячому стані складає 130 мкм і їх контактна взаємодія відсутня. При вигорянні палива 10,5 МВт×діб/кг U накопичення газоподібних продуктів поділу складає 66,7 $см^3$, гелію 0,04 $см^3$, а концентрація газоподібних продуктів поділу під оболонкою становить 0,06-0,15%, що становить допустиму величину.

3. Обрані та обгрунтовані паливні, матричні і конструкційні матеріали твелів, де в якості палива використовується діоксид урану, в якості матриці – порошки алюмінієвого сплаву або марки ПА промислового виробництва, а в якості оболонки – цирконієвий сплав Е110.

4. Вдосконалена технологія виготовлення таблеток з діоксиду урану і дисперсійних композицій UO_2-Al з заданою густиною і геометричними характеристиками. Досліджений процес змішування порошків різного збагачення із UO_2 та досягнута необхідна концентрація суміші по ізотопу U235, а саме 4,4 %, з високою однорідністю змішування (ступінь змішування становить 97,86%), що контролювалася методами математичної статистики. Досліджені умови виготовлення композиції UO_2-Al з частками у вигляді крупки і сфер за розробленою технологічною схемою.

5. Проведені механічні випробування на розривній машині макетів твелів і елементів каркасу ТВЗ, показали, що твел, каркас і збірка в цілому мають необхідну механічну стійкість при стисненні та розтягненні. Максимальні значення міцності, отримані на з'єднаннях Al-(Al+12%Si)-Zr і Al-Cu-Zr, відповідно, дорівнювали 57,0 МПа і 55,3 МПа.

7. Корозійні випробування макетів твелів в умовах, наближених до умов роботи ДЯУ показали їх високу корозійну стійкість. Максимальний приріст ваги таблеток у водному середовищі при часі витримки 1000 год. склав 498 $мг/дм^2$.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Заміна штатних тепловидільних збірок типу ВВР-М2 на збірки типу ТВЗ-Х знизить залежність від закордонних постачальників та сприятиме підвищенню науково-технічного рівня розвитку атомно-промислового комплексу України за рахунок використання власних матеріалів і розробок.

Методи виготовлення ядерного палива на основі діоксиду урану, що наведені в дисертації, можуть бути застосовані для створення сердечника стрижневого твела для реакторів ВВР-М і, в перспективі, багатоцільового дослідницького ядерного реактора (БДЯР), що планується.

Технологія виготовлення таблеток із діоксиду урану подібна до технології виготовлення таблеток енергетичних реакторів ВВЕР-1000, що дає певний досвід в розвитку виробництва власного ядерного палива для АЕС України.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 15 наукових працях: з них 6 робіт у наукових фахових виданнях України (4 – категорії «А», 2 – категорії «Б»), з яких 5 входять до баз Scopus і Web of Science, 3 патенти України, 5 тез доповідей.

Участь здобувача у роботах, що опубліковані у співавторстві зазначена у дисертаційній роботі. Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам пункту 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

У вступі показана актуальність та важливість теми дослідження, визначена мета, предмет і основні завдання дисертаційної роботи. Висвітлена наукова новизна і практична значимість одержаних результатів.

У першому розділі проведений аналіз джерел інформації із застосування та властивостей твелів і ТВЗ дослідницьких ядерних установок.

У другому розділі наведений перелік програмних засобів, що використані в розрахунках, експериментальних установок і дослідницького обладнання, застосованих при проведенні досліджень. У розділі викладено опис основних методик дослідження.

У третьому розділі приведено результати розробок конструкцій стрижневих твелів і тепловидільних збірок для активної зони дослідницької ядерної установки «Джерело нейтронів», що є взаємозамінними зі штатними. Вперше, опрацьовано три модифікації тепловидільних збірок. Проведено обґрунтування вибору їх матеріалів, теплофізичні розрахунки обраних варіантів твелів та аналіз статичної міцності розроблених моделей збірок.

В четвертому розділі наведено результати експериментальних робіт з розробки технологічних схем виготовлення таблеткового палива UO_2 і UO_2-Al заданої густини методами порошкової металургії для розроблених конструкцій твелів. Опрацьовано технологію виготовлення таблеток паливних композицій з густиною 95-98% від теоретичної, а технічним результатом запропонованих схем є більш висока густина і суцільність паливних композицій. Оптимізовано технологічні режими виготовлення таблеткових матеріалів UO_2-Al, що складають: P_1=300-500 МПа, P_2=800-900 МПа, режими спікання у вакуумі: t_1=400-600 °С, t_2=600-630 °С, витримка 1-2 години. Встановлено, що зварювання елементів каркасу ТВЗ необхідно вести при значеннях погонної енергії, що складають 87…94 Дж/мм.

В п'ятому розділі приведені експериментальні результати з дослідження і випробування зразків палива, макетів твелів і елементів ТВЗ: механічні, корозійні, температурні, матеріалознавчі і структурні. Механічні випробування макетів твелів на розривній машині типу Р-10 при температурі 100 °С показали, що значення межі міцності (σ_B), межі плинності ($\sigma_{0,2}$) та відносного подовження (δ) для матеріалу зі сплаву Е110 у вихідному стані, становлять (346±30) МПа, (237±20) МПа і (31±2)% , відповідно.

Отримані дані при корозійних випробуваннях алюмінієвих таблеток у воді свідчать, що в початковий момент (тривалістю до 100 годин) спостерігається значний приріст ваги зразків, а потім корозія йде по лінійному закону. Оцінка швидкості корозії при температурі 100 °С показала, що зразки, виготовлені з прутка алюмінію, мають більш високу корозійну стійкість в порівнянні із зразками з порошків алюмінію ПА: 10×10^{-2} мг/дм^2·год і 42×10^{-2} мг/дм^2·год, відповідно.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані чітко та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Список використаних джерел із 110 найменувань повний і включає вітчизняні та зарубіжні публікації.

Анотація відображає основний зміст дисертації та повно розкриває наукові результати та практичну цінність роботи.

Академічна доброчесність

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено. Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

При опрацюванні тексту дисертації були виявлені деякі недоліки:

1. Доцільно було б вказати залежність діаметру оболонки твелу від відстані між твелами 18-твельної конструкції ТВЗ для визначення оптимального діаметру твелу і необхідних зазорів між ними.
2. Не зазначено, в яких випадках в конструкції ТВЗ застосовується хвостовик з алюмінієвого сплаву.

3. Не в повній мірі показано, яка кількість ТВЗ-Х потрібна на рік для нормальних умов експлуатації ДЯУ «Джерело нейтронів».

Однак, вказані недоліки не знижують наукової цінності дисертаційної роботи і не впливають на її позитивну оцінку та практичну значимість.

Висновок

Дисертаційна робота Куштима Антона Володимировича «Тепловидільні збірки з твелами стрижневого типу на основі діоксиду урану для дослідницької ядерної установки «Джерело нейтронів» за своїм змістом відповідає спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали». Дисертаційна робота є закінченою роботою, що містить нові результати досліджень і направлена на вирішенню практичної задачі зі створення тепловидільних збірок для ДЯУ «Джерело нейтронів».

Подана дисертаційна робота «Тепловидільні збірки з твелами стрижневого типу на основі діоксиду урану для дослідницької ядерної установки «Джерело нейтронів» Куштима Антона Володимировича відповідає спеціальності 105 – «Прикладна фізика та наноматеріали» і вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам пунктів 6, 7, 8 і 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 КМУ від 12.01.2022 р. №44, а здобувач Куштим Антон Володимирович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали»

Офіційний опонент кандидат технічних наук, старший науковий співробітник ННЦ ХФТІ НАН України Олександр КУПРІН

Підпис кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Купріна О.С. засвідчую.
Начальник Відділу кадрів В. Коршенко