

АНОТАЦІЯ

Маловиця М. С. Керування потужністю перспективного швидкого реактора, що працює в самопідтримному режимі хвилі ядерного горіння. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали (галузь знань 10 – Природничі науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертація присвячена теоретичному дослідженню можливості керування потужністю перспективного швидкого реактора, що працює в самопідтримному режимі хвилі ядерного горіння (ХЯГ), за допомогою зміни ефективності радіального відбивача нейтронів. Дослідження проводилося шляхом моделювання розповсюдження хвилі ядерного горіння вздовж аксіального напрямку циліндричного реактора з металевим паливом U-Pu циклу та Pb-Bi евтектичним стопом у якості теплоносія та радіального відбивача нейтронів. Для моделювання нейтрон-ядерних процесів у такому реакторі використовувався детерміністський підхід, заснований на числовому розв'язанні задачі транспорту нейтронів у мультиплікуючому середовищі, ізотопний склад якого безперервно змінюється самоузгодженим способом за рахунок ядерних перетворень згідно з відповідними рівняннями вигорання паливних нуклідів. Математична модель містила у собі систему нестационарних нелінійних рівнянь дифузії нейтронів у реакторному середовищі, рівнянь вигорання компонентів палива та рівнянь ядерної кінетики для попередників запізнених нейтронів з використанням багатогрупових ядерних констант (наближення 26 енергетичних груп) для урахування залежності відповідних перерізів від енергії нейтронів.

Числові розрахунки проводилися за допомогою суттєво оновленого комплексу комп'ютерних програм FANTENS-2D, який був розроблений в ННЦ ХФТІ для моделювання нестационарних процесів у ядерних системах. Виконане в ході дисертаційної роботи удосконалення програмного комплексу

FANTENS-2D стосувалось оптимізації розрахункової моделі та використання багатозонності в моделі гомогенного реактора для адекватного моделювання наявності радіального відбивача нейтронів змінної ефективності. Були також створені програми для аналізу та візуалізації здобутих даних.

У першому розділі проведено огляд наукових публікацій, присвячених дослідженню явища ХЯГ. Здобуті в цих роботах результати при використанні різних теоретичних підходів та розрахункових методів підтверджують можливість існування хвилі ядерного горіння, причому для різних типів та конфігурацій реакторів. У цих роботах вивчаються умови існування та основні характеристики ХЯГ.

Проведено порівняльний аналіз різних теоретичних підходів та розрахункових методів, які використовуються в цих роботах для опису явища ХЯГ. У цілому, ці підходи можна поділити на три основні групи. Перша і друга групи ґрунтуються на детерміністському підході, який полягає у написанні відповідних рівнянь, однак відрізняються між собою методами їхнього розв'язання: аналітичні або числові. Перевага аналітичних розв'язань полягає в тому, що вони дають змогу безпосередньо знаходити функціональні залежності характеристик ХЯГ від основних параметрів системи, однак, для аналітичного розв'язання системи нелінійних нестационарних диференціальних рівнянь у частинних похідних, які описують поведінку ХЯГ, доводиться робити суттєві спрощення розглядуваної реакторної системи й самих рівнянь, що може поставити під сумнів відповідність здобутих результатів до реальної ситуації. Використання числових методів для розв'язання задачі з використанням комп'ютерів дає змогу суттєво наблизитись до опису реальних реакторних систем, однак аналіз впливу різних факторів на поведінку такої системи при цьому стає більш складним.

Третій підхід, який також активно використовується для дослідження явища ХЯГ, полягає у комп'ютерному моделюванні процесів у такому реакторі на основі методу Монте Карло. Це дає змогу максимально наблизити досліджувану модель реактора до реальності, але при цьому потребує великих

розрахункових ресурсів, що пов'язано з потребою набору великої статистики для знаходження бажаної точності розрахунків, особливо коли йдеться про моделювання нестационарних процесів у реакторі з ХЯГ.

На основі проведеного аналізу зроблено вибір теоретичного підходу, який є найбільш придатним для розв'язання поставлених у дисертації задач, а саме детерміністський підхід, оснований на числовому розв'язанні рівнянь транспорту нейтронів одночасно з системою рівнянь вигорання палива та ядерної кінетики запізнених нейтронів.

У *другому розділі* дисертаційної роботи детально описані математичні моделі, які використовувалися при розрахунках розповсюдження ХЯГ.

По-перше, це розрахункова модель, яка використовувалася для оптимізації складу зони запалу для плавного запуску реактора та започаткування ХЯГ. Ці розрахунки проводилися з використанням концепції радіального баклінгу (геометричного фактора), яке дає змогу понизити просторову розмірність рівнянь з двовимірної до одновимірної за допомогою наближення розділу змінних. Це дало змогу суттєво скоротити час комп'ютерних розрахунків при аналізі великої кількості розглядуваних варіантів композиції та структури зони запалу реактора з ХЯГ і знайти оптимальний варіант, при якому започаткування режиму ХЯГ проходить без надмірного зростання потужності реактора та значних її варіацій.

Далі описана двовимірна математична модель ядерного реактора, яка використовувалася для отримання основних результатів дисертаційної роботи, а саме з'ясування можливості керування потужністю реактора в режимі ХЯГ за допомогою радіального відбивача нейтронів змінної ефективності. В основі моделі лежить система з нестационарних дифузійних рівнянь переносу нейтронів у багатогруповому наближенні (26 енергетичних груп), а також відповідних рівнянь вигорання компонентів палива та рівнянь ядерної кінетики для попередників запізнених нейтронів.

Детально описані числові методи, що використовувалися для розв'язання цієї системи рівнянь. Ці числові розрахунки ґрунтуються на

використанні консервативного методу скінченних різниць з використанням неявної різницевої процедури Кранка–Ніколсона, яка є симетричною за часом, характеризується безумовною стійкістю при будь-якому співвідношенні між просторовими і часовими кроками, і є єдиною неявною схемою, що має апроксимацію другого порядку точності. Нейтронний потік розраховувався шляхом послідовних наближень, у яких його значення на новому часовому шарі визначалося за допомогою ітераційної процедури.

У *третьому розділі* описуються структура та принципи роботи комп'ютерних програм, які використовувалися для проведення числових розрахунків, та програм, які застосовувалися для аналізу і візуалізації здобутих даних. Числові розрахунки та комп'ютерне моделювання становили важливу частину дисертаційної роботи при дослідженні особливостей режиму ХЯГ.

При роботі з числовими розрахунками важливими та суттєво пов'язаними між собою параметрами є точність та час виконання розрахунків. У цьому розділі описується процедура вибору змінного часового кроку у схемі розрахунків для оптимізації часових затрат при комп'ютерному моделюванні процесів у реакторі з ХЯГ з бажаною точністю.

Для зручного аналізу результатів розрахунків була розроблена система обробки та візуалізації здобутих даних. Ця система дає змогу з мінімальною кількістю вхідних параметрів автоматично створювати графічне «он-лайн» уявлення просторової та часової еволюції параметрів хвилі ядерного горіння у зручному для аналізу вигляді.

У *четвертому розділі* наведені результати дослідження можливості оптимізації складу зони запалу для плавного запуску реактора та запобігання надмірного зростання потужності при започаткуванні ХЯГ у порівнянні з її рівнем у сталому режимі розповсюдження, що пов'язане з відсутністю значної кількості продуктів поділу на стадії започаткування режиму ХЯГ. Крім того, розглядалась оптимізація зони запалу з погляду зменшення початкової кількості у цій зоні нуклідів, що поділяються (плутонію), за рахунок

одночасної ініціалізації двох ХЯГ, які розповсюджуються у протилежних аксіальних напрямках циліндричного реактора від спільної зони запалу, розташованої у його середині.

Результати цих розрахунків, що проводилися з використанням концепції радіального баклінгу, дали змогу визначити оптимальний склад та структуру зони запалу реактора, яка забезпечує плавний вихід реактора на стаціонарний самопідтримний режим ХЯГ, уникаючи значного зростання енерговиділення, що спостерігається при використанні спрощеної зони запалу. Проведено порівняння кількості речовини, що поділяється, необхідної для запуску реактора, при двох варіантах розташування зони запалу: торцевої та центральної.

У п'ятому розділі наведені результати розрахунків, що складають головну частину результатів, здобутих протягом виконання дисертаційної роботи. Ці результати були здобуті за допомогою удосконалених розрахункових алгоритмів та комп'ютерних програм, що надали можливість адекватного включення радіального відбивача нейтронів до двовимірної моделі багатозонного гомогенного циліндричного реактора, і які детально описані у розділах 2 і 3 дисертації.

На основі знайдених в цьому розділі результатів числових розрахунків проводився аналіз впливу ефективності радіального відбивача нейтронів на розповсюдження ХЯГ. Ефективність радіального відбивача нейтронів у цих розрахунках змінювалась шляхом зміни його товщини, або за рахунок додавання до його складу поглинача нейтронів.

Результати проведених розрахунків для різних значень товщини радіального відбивача нейтронів свідчать про принципову можливість керування потужністю реактора з ХЯГ шляхом зміни ефективності відбивача без втручання в рухому активну зону такого реактора.

На основі проведеного дослідження знайдено критичне мінімальне значення товщини відбивача нейтронів, нижче якого розповсюдження хвилі ядерного горіння стає неможливим у реакторі з фіксованим радіусом активної

зони. При заданому радіусі активної зони – 112 см, здобуте значення критичної товщини відбивача нейтронів, який складався на 90 % з Pb-Bi евтектичного стопу та на 10 % з конструкційного матеріалу (Fe), становило приблизно 51.5 см. При цьому спостерігався ефект «насичення» потужності реактора при збільшенні товщини відбивача нейтронів. Знайдено двовимірний розподіл оптимізованої зони запалу, яка забезпечує плавний запуск реактора, при запуску з середини.

Спеціальне дослідження стосувалось з'ясування можливості керування потужністю реактора, що працює в режимі ХЯГ, безпосередньо під час його роботи шляхом зміни ефективності радіального відбивача нейтронів, за рахунок введення до його складу танталового поглинача нейтронів.

Були розглянуті різні варіанти зміни потужності: як її зменшення (тобто перехід на понижений рівень), так і збільшення (перехід на підвищений рівень потужності). Проведене дослідження показало, що при підвищенні потужності швидкість її зміни виявляється значно меншою ніж при зменшенні, що пов'язано з принциповою особливістю реактора з ХЯГ, а саме відсутністю запасу реактивності в кожний момент часу при сталому режимі розповсюдження ХЯГ. Це накладає певні обмеження на темп змінення потужності реактора, особливо при її підвищенні.

За використання пропорційно-диференціального алгоритму керування було розроблено спеціальний алгоритм введення та виведення до зони відбивача танталового поглинача нейтронів, що забезпечувало ефективну та плавну зміну потужності реактора.

Наукова новизна виконаної роботи полягає в тому, що вперше показана можливість керування потужністю швидкого реактора, який працює у самопідтримному режимі хвилі ядерного горіння, шляхом зміни ефективності радіального відбивача нейтронів без втручання в активну зону реактора. На основі числового розв'язання нестационарної задачі з використанням удосконаленої математичної моделі досліджено перехідні процеси у такому реакторі при пониженні та підвищенні його потужності, а також стійкість

режиму ХЯГ при цих процесах. Розроблено пропорційно-диференціальний алгоритм керування потужністю швидкого реактора у режимі ХЯГ, що забезпечує плавність змін потужності, уникаючи можливих її осциляцій. Запропоновано оптимальний склад та структуру зони запалу, а також сценарій плавного запуску швидкого реактора з паливом U-Pu циклу, що дає змогу запобігти надмірному зростанню та варіаціям потужності цього реактора при започаткуванні режиму хвилі ядерного горіння.

Ключові слова: хвиля ядерного горіння, швидкий реактор, керування потужністю реактора, відбивач нейтронів, детерміністський підхід, багатогрупове наближення, числові розрахунки.