УДК 621.039.526 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.22

М. М. НЕНЯ
аспірант
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0009-0009-9193-9403

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНФІГУРАЦІЙ ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧИХ ЗБІРОК У ВВЕР-1000 З УРАХУВАННЯМ ПОШКОДЖЕНЬ ОБОЛОНОК ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Актуальність дослідження зумовлено необхідністю удосконалення підходів до формування конфігурацій тепловиділяючих збірок у реакторах типу ВВЕР-1000 в умовах підвищених експлуатаційних навантажень, потреби забезпечення паливної ефективності та зниження ризиків пошкодження оболонок паливних елементів.

Метою статті є запропонування дискретної моделі та концепції методу оптимізації перестановок тепловиділяючих збірок у активній зоні реактора типу ВВЕР-1000, яка враховує одночасно кілька критично важливих параметрів – теплове навантаження, рівномірність нейтронного поля, напружено-деформований стан оболонок та очікуване вигоряння палива.

Методи дослідження базуються на логіко-аналітичному підході, що включає огляд наукових публікацій з теми оптимізації активної зони, узагальнення критеріїв ефективності розміщення ТВЗ, а також побудову структурної схеми майбутньої дискретної моделі з використанням елементів евристичного моделювання. Проведено систематизацію вимог до алгоритмів, які могли б бути реалізовані у формі генетичних або інших еволюційних методів. У межах роботи запропоновано складники моделі, визначено вхідні параметри та окреслено потенційні обмеження для подальшої математичної формалізації.

Результати дослідження дали змогу обґрунтувати доцільність багатокритеріального підходу до оптимізації розміщення ТВЗ, в якому враховуються взаємозалежні показники безпеки, ресурсу та енергетичної рівномірності. Виявлено основні структурні елементи моделі, які можуть бути використані для подальшого формального проєктування обчислювального алгоритму.

Наукова новизна полягає у формулюванні дискретної моделі конфігурації ТВЗ, яка враховує динамічний характер паливного циклу, потенційну змінність меж допустимих навантажень і необхідність поєднання суперечливих критеріїв у межах одного оптимізаційного підходу.

Висновки підтверджують доцільність розроблення нової багатокритеріальної моделі оптимізації конфігурацій ТВЗ, яка дозволяє знизити ризик перевантаження оболонок, вирівняти теплове поле та забезпечити стабільність функціонування активної зони протягом усього паливного циклу.

Перспективи подальших досліджень полягають у математичному формалізуванні запропонованої моделі, розробленні прототипу алгоритму з використанням генетичних методів, а також верифікації отриманих рішень на основі даних реальних паливних кампаній.

Ключові слова: *адаптивне керування, енергоефективність, модульна архітектура, сенсорні технології, стабільність гальмування, зносостійкість.*

M. M. NENIA
Postgraduate Student
Odesa Polytechnic National University
ORCID: 0009-0009-9193-9403

OPTIMIZATION OF FUEL ASSEMBLY CONFIGURATIONS IN VVER-1000 REACTORS CONSIDERING FUEL ROD CLADDING DAMAGE

Relevance of the study is due to the growing need to improve the approaches to configuring fuel assembly layouts in VVER-1000 reactors under increased operational loads, with an emphasis on fuel efficiency and the mitigation of fuel rod cladding damage risks.

The aim of the article is to propose a discrete model and conceptual optimization method for rearranging fuel assemblies in the VVER-1000 reactor core, taking into account several critical parameters simultaneously – such as thermal load distribution, neutron flux uniformity, mechanical stress on cladding, and predicted fuel burnup.

Research methods are based on a logic-analytical approach that includes a review of relevant scientific literature, synthesis of core performance criteria, and the development of a structural framework for a future discrete model using heuristic modeling principles. The study outlines the necessary input parameters and constraints, and presents a conceptual structure for implementing an optimization method– potentially using evolutionary algorithms such as genetic approaches– without focusing on direct algorithmic realization.

Research results allow for the justification of a multicriteria approach to optimizing core configurations, addressing key interdependent indicators related to reactor safety, cladding durability, and energy generation uniformity. The main components of the model are identified, offering a foundation for further formal development and testing.

Scientific novelty lies in the formulation of a discrete optimization model that integrates variable operational conditions, evolving fuel characteristics, and conflicting performance objectives into a unified decision-making framework for core design.

Conclusions confirm the feasibility of developing a multicriteria model for optimizing fuel assembly arrangements, enabling reductions in localized overheating, improved burnup distribution, and enhanced cladding performance over the fuel cycle.

Prospects for further research include mathematical formalization of the proposed model, creation of an algorithmic prototype using genetic methods, and validation of solutions using real-world fuel cycle data.

Key words: *adaptive control, energy efficiency, modular architecture, sensor technologies, braking stability, wear resistance.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР-1000 зростає необхідність удосконалення підходів до проєктування та оптимізації конфігурацій тепловиділяючих збірок (ТВЗ), зокрема в контексті підвищених вимог до безпеки та паливної ефективності. Одним із критично важливих аспектів, що обмежує надійність і довговічність паливних елементів, є пошкодження оболонок паливних стрижнів, які можуть виникати внаслідок термомеханічного навантаження, корозійних процесів або нерівномірного розподілу потужності в активній зоні. Такі пошкодження не лише ускладнюють технічну експлуатацію, а й створюють додаткові ризики втрати герметичності та порушення нормального функціонування реакторної установки.

Наукове завдання полягає у виявленні закономірностей взаємозв'язку між просторовою конфігурацією паливних збірок та виникненням критичних навантажень на оболонки паливних елементів, що дозволяє розробити математичні моделі для прогнозування і мінімізації ризиків пошкоджень. Практична значущість полягає в можливості впровадження нових стратегій оптимізації завантаження паливних збірок, які враховують граничні параметри експлуатації та сприяють зменшенню кількості відмов, підвищенню коефіцієнта використання палива та продовженню міжремонтного циклу. Таким чином, формулювання проблеми оптимізації конфігурацій ТВЗ із урахуванням пошкоджень оболонок є актуальним як для підвищення безпеки ядерних енергоблоків, так і для забезпечення економічної ефективності паливного циклу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема оптимізації конфігурацій тепловиділяючих збірок у реакторах ВВЕР-1000 з урахуванням пошкоджень оболонок паливних елементів охоплює чотири основні наукові напрями. Перший напрям зосереджений на розробці алгоритмічних і автоматизованих методів оптимізації паливних завантажень з урахуванням ресурсу оболонок. С. М. Пелих (S. N. Pelykh), М. В. Максимов (M. V. Maksimov) та Ґ. Т. Паркс (G. T. Parks) [1] запропонували метод, що одночасно враховує вигоряння палива та ступінь пошкодження оболонок твелів, забезпечуючи баланс між ефективністю та безпекою. У подальшій роботі С. Пелих, М. Фролов, А. Наливайко та Х. Чжоу [2] описано автоматизовану систему контролю за параметром пошкодження оболонок під час експлуатації ВВЕР-1000, яка сприяє точному моніторингу технічного стану активної зони. Дослідження С. М. Пелиха (S. N. Pelykh) [3] присвячено методологічному удосконаленню розрахунку параметра пошкодження оболонок за нормальних умов, що є ключовим для подальших оптимізаційних алгоритмів. Перспективними є дослідження, що поєднують алгоритмічну оптимізацію з реальними даними сенсорного моніторингу пошкоджень твелів для створення адаптивних моделей конфігурації.

Другий напрям охоплює дослідження безпеки та поведінки паливних елементів у нормальних та аварійних умовах. С. Х. Абдель-Латіф (S. H. Abdel-Latif), С. А. Васфі (S. A. Wasfy) та А. М. Рефаей (A. M. Refaey) [4] аналізують збереження цілісності твелів під час втрати потоку теплоносія (LOFA), що дає змогу враховувати аварійні сценарії в оптимізації конструкцій. М. Ю. М. Мохсен (M. Y. M. Mohsen) та М. А. Е. Абдель-Рахман (M. A. E. Abdel-Rahman) [5] проводять детальну оцінку безпеки паливних збірок ВВЕР-1000, а в подальшій роботі разом із А. А. Ґалахомом (A. A. Galahom) [6] досліджують інтеграцію ATF-матеріалів, які підвищують термічну та механічну стійкість оболонок. К. М. Яссін (K. M. Yassin), М. Х. Хассан (M. H. Hassan), М. М. Ґонейм (M. M. Ghoneim), М. С. Ельколіль (M. S. Elkolil), А. Аліян (A. Alyan) та С. А. Аґамі (S. A. Agamy) [7] моделюють поведінку палива в умовах експлуатації, поєднуючи теплові та механічні характеристики оболонок. Подальші дослідження мають бути спрямовані на узгодження результатів мультифізичного моделювання з експериментальними даними для точнішої оцінки граничних умов пошкодження оболонок.

Третій напрям стосується конструкційних інновацій і матеріалознавчих рішень, що сприяють зниженню напружень у оболонках. О. Сафарзаде (O. Safarzadeh) і М. Карані-Тамай (M. Qarani-Tamai) [8] аналізують вплив покриттів tolerant-to-accidents на зміну фізичних характеристик активної зони, а В. Лутфі (W. Luthfi), Х. Адріал (H. Adrial) і А. Хакім (A. Khakim) [9] пропонують дворівневу конструкцію твелів (duplex fuel), яка знижує

напруження оболонок. Т. Назарі (T. Nazari), А. Рабії (A. Rabiee) та Х. Каземінежад (H. Kazeminejad) [10] досліджують модальні характеристики збірок, які можуть спричиняти мікропошкодження оболонок, тоді як Д. Восуггі (J. Vosoughi), Н. Восуггі (N. Vosoughi) та А. А. Салехі (A. A. Salehi) [11] моделюють ефект викривлення збірки, що впливає на розподіл потужності та локальне перевантаження оболонок. Доцільно розширити в цьому напрямі застосування композитних матеріалів у конструкції оболонок та оптимізувати параметри охолодження на основі аналізу термомеханічного стану.

Четвертий напрям присвячено перспективним паливним концепціям і структурним інноваціям, що впливають на розподіл потужності та теплове навантаження. Х. Н. Чан (H. N. Tran), В. К. Хоанг (V. K. Hoang), П. Х. Лієм (P. H. Liem) та Х. Т. Хоанг (H. T. Hoang) [12] обґрунтовують застосування поглиначів вигоряння для зниження локального навантаження оболонок. А. Флорес (A. Y. Flores), М. Ржегулка (M. Rzehulka) та Ґ. Маццiні (G. Mazzini) [13] вивчають змішані конфігурації ядра та їхній вплив на викиди радіонуклідів і водню, пов'язані з деградацією оболонок. М. Т. Ахмед (M. T. Ahmed) і А. Шеллі (A. Shelley) [14] аналізують анулярні твели, які покращують нейтронно-фізичний баланс активної зони, а С. Насірі (S. Nasiri) та Ґ. Р. Ансаріфар (G. R. Ansarifar) [15] проводять повний нейтронно-динамічний аналіз ATF з урахуванням реакційної здатності та параметрів стійкості оболонок. Варто зосередити подальші дослідження на інтеграції нових матеріалів у конструкцію збірок з урахуванням тривалих циклів навантаження та високотемпературної деградації оболонок.

Загалом, аналіз підтверджує, що ефективна оптимізація тепловиділяючих збірок у ВВЕР-1000 неможлива без урахування параметрів пошкодження оболонок твелів, які потребують мультидисциплінарного підходу до розрахунків, моделювання та застосування матеріалів нових поколінь. Перспективними є напрями, що поєднують автоматизовані системи моніторингу, інноваційні конструкції збірок і ATF-матеріали з адаптивними алгоритмами завантаження.

Незважаючи на наявність значного обсягу наукових досліджень, низка аспектів оптимізації конфігурацій тепловиділяючих збірок у реакторах типу ВВЕР-1000 залишається невирішеною. Зокрема, недостатньо вивчено вплив просторового розміщення ТВЗ на формування зон локального перевантаження оболонок паливних елементів, особливо в умовах змінних теплових і нейтронних навантажень. Існуючі методології часто не враховують багатокритеріальні залежності, що включають безпеку, рівномірність розподілу потужності та ресурс оболонок. Обмеження пов'язані також із високою обчислювальною складністю задачі, відсутністю адаптивних моделей та недостатнім емпіричним обґрунтуванням вибору критеріїв ефективності.

Запропоноване дослідження спрямовано на заповнення зазначених прогалин шляхом обґрунтування нових критеріїв оцінки конфігурацій ТВЗ і розробки концепції дискретної моделі оптимізації, що враховує багатофакторний вплив на оболонки паливних елементів. Запропоновано використання генетичних алгоритмів як основи для побудови адаптивного методу, здатного враховувати зміну параметрів протягом паливного циклу. Таким чином, дослідження поглиблює теоретичне розуміння механізмів просторових перевантажень та пропонує підґрунтя для практичного удосконалення процесів паливного планування.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є розроблення дискретної моделі та методу оптимізації перестановок ТВЗ у активній зоні реактора типу ВВЕР-1000, що враховує багатокритеріальні залежності з метою мінімізації пошкоджень оболонок паливних елементів та досягнення рівномірного розподілу теплових і нейтронних характеристик.

Завдання статті

1. Проаналізувати вплив просторового розміщення ТВЗ на утворення локальних перевантажень оболонок паливних елементів з урахуванням теплових і нейтронних характеристик активної зони.
2. Обґрунтувати систему критеріїв ефективності конфігурацій активної зони з позицій безпеки, рівномірності навантажень і довговічності паливних елементів.
3. Виявити обмеження існуючих підходів та запропонувати дискретну модель оптимізації перестановок ТВЗ на основі генетичних алгоритмів з урахуванням багатокритеріальних залежностей.

Викладення основного матеріалу дослідження

У структурі активної зони реакторів типу ВВЕР-1000 формування оптимальної конфігурації ТВЗ є одним із ключових чинників забезпечення рівномірного розподілу теплового навантаження та довговічності паливних елементів. Просторове розміщення збірок визначає інтенсивність локального енерговиділення, що безпосередньо впливає на температурні градієнти, швидкість накопичення пошкоджень оболонок і ризик втрати герметичності. Надмірна щільність тепловиділення в окремих ділянках призводить до утворення зон перевантаження, в яких оболонки паливних елементів піддаються підвищеним термомеханічним та нейтронним навантаженням. З урахуванням того, що герметичність оболонки є критичним бар'єром безпеки, дослідження впливу геометричного фактору розміщення ТВЗ набуває першочергового значення для прогнозування довготривалої поведінки палива та мінімізації аварійних ризиків (табл. 1).

Таблиця 1

Взаємозв'язок між розміщенням ТВЗ та ризиком локального перевантаження оболонок паливних елементів

Характеристика конфігурації ТВЗ	Типова ознака локалізації навантаження	Потенційні наслідки для оболонок паливних елементів
Центральне розміщення збірок із підвищеним збагаченням	Формування теплових піків у центрі активної зони	Прискорене старіння та ризик розтріскування оболонок
Групування ТВЗ з однаковими характеристиками по секторах	Локалізована інтенсивність нейтронного потоку	Нерівномірне розширення оболонок, мікротріщини
Змішане чергування ТВЗ із різним ступенем вигоряння	Зниження контрасту енерговиділення	Рівномірне навантаження, зниження ризику пошкоджень
Розміщення збірок із пошкодженими оболонками поблизу свіжих	Різке збільшення температурного градієнта	Поглиблення дефектів, ймовірність втрати герметичності
Віддалення ТВЗ із підвищеним ризиком від центральної області	Зменшення локального перевантаження	Підвищення ресурсу оболонок і безпеки паливного циклу

Джерело: сформовано автором на підставі [1; 2; 6; 7; 10; 11]

У практиці експлуатації реакторів типу ВВЕР-1000 конфігурація ТВЗ визначає не лише загальний розподіл потужності в активній зоні, але й локальний характер навантажень, які сприймаються оболонками паливних елементів. Як засвідчують експлуатаційні спостереження та дані постреакторного контролю, саме неправильно збалансоване просторове розміщення ТВЗ є чинником формування критичних зон із підвищеною температурою, напруженнями та флюенсом нейтронів. Зокрема, концентрація збірок зі свіжим паливом у центрі активної зони без урахування градієнтів вигоряння призводить до утворення температурних аномалій, що викликають зниження пластичності оболонок і зростання ризику утворення міжкристалічних тріщин [4]. Натомість конфігурації зі змішаним розташуванням ТВЗ продемонстрували в умовах реальних кампаній зменшення амплітуди термомеханічних коливань, що забезпечує стабільніший стан оболонки протягом паливного циклу. Таким чином, практичне застосування принципів керованої симетрії та компенсованого вигоряння в розміщенні збірок дозволяє суттєво знизити частку пошкоджених паливних елементів, оптимізувати режим роботи реактора та підвищити ресурс використання активної зони без зменшення її енергетичної ефективності.

Теплові та нейтронні параметри активної зони є критично важливими показниками, що визначають ефективність і безпеку функціонування ядерного реактора типу ВВЕР-1000. Ці параметри залежать не лише від фізичних характеристик палива та теплоносія, але й від конфігурації завантаження ТВЗ, яка змінюється з урахуванням вигоряння, реактивності, необхідності регулювання потужності та обмеження температурних піків. Реальні сценарії пошкодження паливних оболонок в умовах експлуатації часто пов'язані з нерівномірністю теплових потоків і локальним накопиченням нейтронного опромінення, що посилює крихкість матеріалу оболонки та прискорює деградаційні процеси [11]. У зв'язку з цим аналіз теплових і нейтронних характеристик для різних схем розміщення ТВЗ дозволяє ідентифікувати зони ризику та розробити більш збалансовані конфігурації, які підвищують надійність паливної кампанії (табл. 2).

Таблиця 2

Вплив типових конфігурацій завантаження ТВЗ на теплові та нейтронні параметри активної зони

Конфігурація завантаження	Профіль теплового навантаження	Нейтронне поле	Вірогідність пошкодження оболонок
Радіально симетрична (чергування ТВЗ із різним вигорянням)	Помірна, із згладженими градієнтами	Рівномірне, із зменшеними флуктуаціями	Низька, за умови рівномірного збагачення
Централізоване розміщення свіжого палива	Високе в центральній частині, різкий градієнт до периферії	Локальні піки флюенсу нейтронів	Висока, зокрема для оболонок у центральних ТВЗ
Квазішахове розташування ТВЗ із регулюючими вставками	Локальні теплові спади навколо вставок	Асиметричне, із зонами зниженого потоку	Помірна, залежно від термогідравлічних умов
Конфігурація з екрануванням дефектних ТВЗ	Зменшене локальне навантаження на пошкоджені зони	Локальне згладжування флюенсу	Знижена в обмеженій області
Стандартне тригексагональне завантаження без оптимізації	Нерівномірне, залежне від вигоряння	Випадкова неоднорідність	Підвищена, з непередбачуваною локалізацією
Конфігурація завантаження	Профіль теплового навантаження	Нейтронне поле	Вірогідність пошкодження оболонок

Джерело: сформовано автором на підставі [1; 5; 8; 9; 12; 15]

У сучасних умовах на АЕС із ВВЕР-1000 впровадження автоматизованих систем планування завантаження активної зони базується на використанні обчислювальних кодів, які дозволяють моделювати розподіл теплових і нейтронних характеристик з високою просторовою точністю. Практика показала, що конфігурації із чергуванням

збірок різного вигоряння та використанням зонального екранування дефектних ТВЗ дозволяють суттєво знизити ймовірність перевищення критичних значень теплового навантаження на оболонки [5]. Застосування детального аналізу флюенсних карт і розрахунків коефіцієнтів локального перегріву дає змогу обґрунтовано прогнозувати зони підвищеного ризику, що, у свою чергу, підвищує якість технічних рішень щодо оптимізації розміщення ТВЗ. У поєднанні з інструментами статистичної оцінки на основі історичних даних пошкоджень це створює передумови для переходу до індивідуалізованих моделей планування паливних кампаній з підвищеним рівнем надійності.

Оцінювання ефективності конфігурацій активної зони у реакторах типу ВВЕР-1000 потребує багатокритеріального підходу, що базується на поєднанні технічних, експлуатаційних і безпекових параметрів. В умовах сучасних навантажень на енергоблоки критичними стають не лише інтегральні показники вигоряння чи енерговіддачі, а й характеристика просторової рівномірності теплових і нейтронних полів, максимальні локальні значення напружень у оболонках та довговічність паливних елементів. Вибір критеріїв оцінювання повинен відображати не лише здатність конфігурації до енергетичного виробітку, а й її стабільність у часі, відсутність зон пікових навантажень, мінімальну ймовірність пошкоджень та прогнозований ресурс палива. У зв'язку з цим доцільним є формалізований підхід, який дозволяє порівнювати конфігурації на основі узагальнених, але фізично вивірених критеріїв ефективності (табл. 3).

Таблиця 3

Критерії ефективності для оцінювання конфігурацій активної зони реактора ВВЕР-1000

Критерій ефективності	Фізичний зміст	Значення для безпеки та ресурсу
Максимальна теплова потужність на ТВЗ	Пікове значення лінійного тепловиділення	Визначає ризик перегріву оболонок, межа для допустимих навантажень
Градієнт вигоряння між сусідніми збірками	Різниця у накопиченій енергії	Високі значення спричиняють нерівномірне розширення і втому матеріалу оболонок
Рівномірність розподілу нейтронного потоку	Коливання флюенсу в активній зоні	Пов'язана зі швидкістю радіаційного пошкодження та корозії
Індекс напружень оболонки (σmax/σдоп)	Відношення максимальних напружень до допустимих	Показує наближення до межі пластичності та ризик втрати герметичності
Сумарне очікуване вигоряння ТВЗ	Прогнозована тривалість паливного циклу	Визначає економічну доцільність та ефективність використання палива

Джерело: сформовано автором на підставі [1; 5; 6; 10; 11; 15]

Так, автоматизовані розрахункові комплекси дозволяють побудувати карту градієнтів вигоряння для конкретної конфігурації, що дає змогу уникнути розташування збірок із різким контрастом за активністю. Значення максимального лінійного тепловиділення контролюється не лише на етапі проектування, а й протягом циклу за допомогою даних нейтронно-фізичних вимірювань, що дає змогу оперативно коригувати режим. Індекс напружень оболонок оцінюється за результатами термомеханічного моделювання, яке враховує локальні температури, гідростатичний тиск і вплив іонізаційного опромінення. У поєднанні ці критерії дозволяють комплексно оцінити надійність та ресурсність конфігурації, виявити потенційно проблемні зони та сформувати раціональну стратегію оптимізації, орієнтовану як на продовження терміну служби ТВЗ, так і на дотримання нормативних вимог безпеки.

У процесі реалізації алгоритмів оптимізації перестановок ТВЗ у активній зоні реактора типу ВВЕР-1000 виникає низка технічних і методологічних проблем, які суттєво ускладнюють досягнення збалансованого розв'язання багатокритеріального завдання. Однією з ключових перешкод є надвисока розмірність простору можливих конфігурацій, що зростає експоненційно зі збільшенням кількості збірок і типів палива. Така комбінаційна складність потребує застосування евристичних або метаевристичних підходів, оскільки перебір усіх варіантів є обчислювально неприйнятним навіть за умов використання високопродуктивних обчислювальних систем [1]. Крім того, структура оптимізації є динамічною за своєю природою: параметри, що визначають якість рішення (вигоряння, температура, нейтронний флюенс, механічний стан оболонок), змінюються впродовж паливного циклу, що унеможливлює використання статичних моделей [3].

Ще однією суттєвою проблемою є складність адекватного врахування реальних експлуатаційних умов, зокрема флуктуацій температурного поля, змін у регулюючих вставках, впливу радіаційного здуття та повзучості оболонок. Більшість існуючих моделей спрощують ці процеси, ігноруючи взаємозалежність між локальними пошкодженнями та еволюцією нейтронного поля [11]. Відсутність доступу до детальних даних пошкоджень або обмеженість історичних спостережень унеможливлює повноцінну валідацію складних моделей. Крім того, на практиці спостерігається конфлікт між цільовими функціями оптимізації: зниження пікового навантаження часто відбувається за рахунок зменшення сумарного вигоряння або зростання нерівномірності енерговиділення в інших зонах активної зони [15]. В результаті потрібне формування компромісного розв'язання, яке враховує множину суперечливих критеріїв і забезпечує прийнятний рівень безпеки та ресурсної ефективності.

У сучасній практиці управління ядерними паливними кампаніями питання оптимального розміщення тепловиділяючих збірок в активній зоні реакторів типу ВВЕР-1000 набуло особливої актуальності через необхідність досягнення балансу між ефективністю енерговиробництва, безпековими вимогами та ресурсною стійкістю паливних елементів. Дискретна модель, побудована на основі генетичних алгоритмів, спрямована на розв'язання задачі комбінаційного характеру з великою кількістю змінних і обмежень, які охоплюють теплові, нейтронні, механічні та економічні параметри. Така модель дозволяє знаходити компромісні рішення у багатовимірному просторі конфігурацій, де класичні методи оптимізації є малоефективними або неадаптивними до складної структури завдання.

На відміну від традиційних методів жорсткого моделювання, що використовують локальну оптимізацію або статичні припущення, генетичний підхід дозволяє враховувати динамічний характер паливного циклу та варіативність вхідних параметрів. Основними складниками моделі є: кодування кожної конфігурації ТВЗ у вигляді хромосоми, оцінювання кожної особини за багатокритеріальною цільовою функцією (враховується теплове навантаження, флюенс, напруження оболонок, вигоряння, симетричність), селекція, кросовер, мутація, а також введення адаптивного коефіцієнта ваг для керування пріоритетами критеріїв у різні етапи ітерацій. Вхідні дані для моделі включають вигоряння кожної ТВЗ, рівень збагачення, історію пошкоджень, допуски з точки зору безпеки, а також конструктивні обмеження реакторної установки (рис. 1).

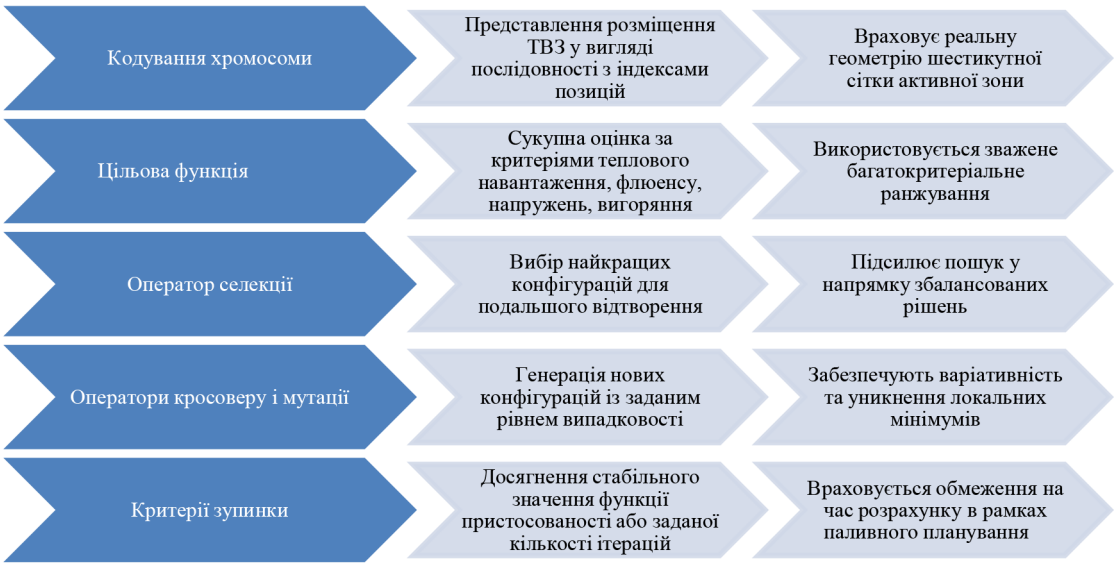

Рис. 1. Структура дискретної моделі оптимального розміщення ТВЗ на основі генетичних алгоритмів

Джерело: власна розробка автора

У реальних умовах експлуатації АЕС ця модель дозволяє автоматизувати процес планування завантаження активної зони, замінюючи ручне або експертне розміщення ТВЗ на обґрунтовану ітеративну процедуру з високим ступенем точності. Практична ефективність полягає у здатності зменшити пікові навантаження на оболонки, мінімізувати кількість пошкоджених елементів, досягти більш рівномірного вигоряння та подовжити тривалість паливного циклу без перевищення нормативних меж безпеки. Використання багатокритеріального підходу дозволяє адаптувати модель до різних стратегій – від зниження експлуатаційних витрат до зменшення імовірності позаштатних ситуацій. У перспективі така модель може бути інтегрована в системи підтримки прийняття рішень на АЕС, забезпечуючи обґрунтоване, швидке та гнучке коригування стратегії паливного завантаження у відповідь на зміну вихідних параметрів або появу нових обмежень.

Висновки

У результаті дослідження встановлено, що конфігурація тепловиділяючих збірок у реакторі ВВЕР-1000 суттєво впливає на рівномірність розподілу теплових і нейтронних навантажень, ризик пошкодження оболонок паливних елементів і безпеку експлуатації. Обґрунтовано доцільність застосування багатокритеріального підходу до оцінювання ефективності завантаження активної зони, який враховує теплове навантаження, флюенс, градієнти вигоряння та механічний стан оболонок. Виявлено ключові проблеми реалізації оптимізації перестановок ТВЗ, серед яких надмірна комбінаційна складність, динамічність паливного циклу, суперечливість критеріїв ефективності та нестача достовірних експлуатаційних даних. Розроблена дискретна модель на основі генетичних алгоритмів дозволяє формувати оптимальні конфігурації ТВЗ, що забезпечують мінімізацію перевантажень, підвищення довговічності палива та покращення балансу між ефективністю й безпекою. Перспективи подальших

досліджень пов'язані з інтеграцією методів машинного навчання для адаптації моделі до реальних умов експлуатації та розширенням емпіричної бази для точнішої параметризації оптимізаційних критеріїв.

Список використаної літератури

1. Pelykh S. N., Maksimov M. V., Parks G. T. A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup. *Nuclear Engineering and Design*. 2013. Vol. 257, № 1. P. 53–60. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.12.022

2. Пелих С., Фролов М., Наливайко А., Чжоу Х. Автоматизована система керування властивостями ядерного палива ВВЕР-1000 з урахуванням параметра пошкодження оболонок твелів. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2018. Вип. 1(54). С. 46–50. DOI: https://doi.org/10.15276/opu.1.54.2018.06

3. Pelykh S. N. The cladding damage parameter under normal operating conditions in VVER fuel design: Resolving contradictions. *Nuclear Engineering and Design*. 2021. Vol. 379, № 1. Article 111198. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111198

4. Abdel-Latif S. H., Wasfy S. A., Refaey A. M. A study of VVER-1000 fuel rod integrity during LOFA. *Progress in Nuclear Energy*. 2023. Vol. 159, № 1. Article 104650. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104650

5. Mohsen M. Y. M., Abdel-Rahman M. A. E. Detailed safety assessment for the VVER-1000 fuel assembly. *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*. 2021. Vol. 15, № 1. P. 36–60. DOI: https://doi.org/10.1504/IJNEST.2021.120138

6. Mohsen M. Y. M., Abdel-Rahman M. A. E., Galahom A. A. Integrated analysis of VVER-1000 fuel assembly fueled with accident tolerant fuel (ATF) materials. *Annals of Nuclear Energy*. 2021. Vol. 159, № 1. Article 108330. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108330

7. Yassin K. M., Hassan M. H., Ghoneim M. M., Elkolil M. S., Alyan A., Agamy S. A. Multiphysics simulation of VVER-1200 fuel performance during normal operating conditions. *Nuclear Science and Techniques*. 2023. Vol. 34, № 1. Article 28. DOI: https://doi.org/10.1007/s41365-023-01172-9

8. Safarzadeh O., Qarani-Tamai M. Full-core reactor physics analysis for accident tolerant cladding in a VVER-1000 reactor. *Annals of Nuclear Energy*. 2021. Vol. 155, № 1. Article 108163. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108163

9. Luthfi W., Adrial H., Khakim A. Study on neutronic behavior of VVER-1000 fuel assembly with duplex fuel rod design. *Nuclear Engineering and Design*. 2024. Vol. 422, № 1. Article 113168. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113168

10. Nazari T., Rabiee A., Kazeminejad H. Numerical investigation of the modal characteristics for a VVER-1000 fuel assembly. *Nuclear Engineering and Design*. 2019. Vol. 345, № 1. P. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.02.004

11. Vosoughi J., Vosoughi N., Salehi A. A. Development of a calculation model to simulate the effect of bowing of the VVER-1000 reactor fuel assembly on power distribution. *Annals of Nuclear Energy*. 2023. Vol. 181, № 1. Article 109535. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109535

12. Tran H. N., Hoang V. K., Liem P. H., Hoang H. T. Neutronics design of VVER-1000 fuel assembly with burnable poison particles. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. Vol. 51, № 7. P. 1729–1737. DOI: https://doi.org/10.1016/j.net.2019.05.026

13. Flores A. Y., Rzehulka M., Mazzini G. Influence of mixed core in the radionuclides releases and hydrogen production for VVER-1000. *Nuclear Engineering and Design*. 2024. Vol. 417, № 1. Article 112858. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112858

14. Ahmed M. T., Shelley A. Annular fuel for VVER-1000 reactor: Moderation impact on neutronic behavior. *Progress in Nuclear Energy*. 2023. Vol. 165, № 1. Article 104907. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104907

15. Nasiri S., Ansarifar G. R. Neutronic design and analysis of the accident-tolerant fuel (ATF) application to VVER-1000 nuclear reactor as well as evaluation of dynamic parameters. *Nuclear Engineering and Design*. 2025. Vol. 432, № 1. Article 113814. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113814

References

1. Pelykh, S. N., Maksimov, M. V., & Parks, G. T. (2013). A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup. *Nuclear Engineering and Design, 257*(1), 53–60. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.12.022

2. Pelykh, S., Frolov, M., Nalyvayko, A., & Zhou, H. (2018). Avtomatyzovana systema keruvannia vlastyvostiamy yadernoho palyva VVER-1000 z urakhuvanniam parametra poshkodzhennia obolonok tveLiv [Automated system for controlling VVER-1000 nuclear fuel properties considering fuel cladding damage parameter]. *Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu – Proceedings of the Odessa Polytechnic University, 1*(54), 46–50. DOI: https://doi.org/10.15276/opu.1.54.2018.06 [in Ukrainian].

3. Pelykh, S. N. (2021). The cladding damage parameter under normal operating conditions in VVER fuel design: Resolving contradictions. *Nuclear Engineering and Design, 379*(1), Article 111198. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111198

4. Abdel-Latif, S. H., Wasfy, S. A., & Refaey, A. M. (2023). A study of VVER-1000 fuel rod integrity during LOFA. *Progress in Nuclear Energy, 159*(1), Article 104650. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104650

5. Mohsen, M. Y. M., & Abdel-Rahman, M. A. E. (2021). Detailed safety assessment for the VVER-1000 fuel assembly. *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology, 15*(1), 36–60. DOI: https://doi.org/10.1504/IJNEST.2021.120138

6. Mohsen, M. Y. M., Abdel-Rahman, M. A. E., & Galahom, A. A. (2021). Integrated analysis of VVER-1000 fuel assembly fueled with accident tolerant fuel (ATF) materials. *Annals of Nuclear Energy, 159*(1), Article 108330. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108330

7. Yassin, K. M., Hassan, M. H., Ghoneim, M. M., Elkolil, M. S., Alyan, A., & Agamy, S. A. (2023). Multiphysics simulation of VVER-1200 fuel performance during normal operating conditions. *Nuclear Science and Techniques, 34*(1), Article 28. DOI: https://doi.org/10.1007/s41365-023-01172-9

8. Safarzadeh, O., & Qarani-Tamai, M. (2021). Full-core reactor physics analysis for accident tolerant cladding in a VVER-1000 reactor. *Annals of Nuclear Energy, 155*(1), Article 108163. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108163

9. Luthfi, W., Adrial, H., & Khakim, A. (2024). Study on neutronic behavior of VVER-1000 fuel assembly with duplex fuel rod design. *Nuclear Engineering and Design, 422*(1), Article 113168. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113168

10. Nazari, T., Rabiee, A., & Kazeminejad, H. (2019). Numerical investigation of the modal characteristics for a VVER-1000 fuel assembly. *Nuclear Engineering and Design, 345*(1), 1–6. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.02.004

11. Vosoughi, J., Vosoughi, N., & Salehi, A. A. (2023). Development of a calculation model to simulate the effect of bowing of the VVER-1000 reactor fuel assembly on power distribution. *Annals of Nuclear Energy, 181*(1), Article 109535. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109535

12. Tran, H. N., Hoang, V. K., Liem, P. H., & Hoang, H. T. (2019). Neutronics design of VVER-1000 fuel assembly with burnable poison particles. *Nuclear Engineering and Technology, 51*(7), 1729–1737. DOI: https://doi.org/10.1016/j.net.2019.05.026

13. Flores, A. Y., Rzehulka, M., & Mazzini, G. (2024). Influence of mixed core in the radionuclides releases and hydrogen production for VVER-1000. *Nuclear Engineering and Design, 417*(1), Article 112858. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112858

14. Ahmed, M. T., & Shelley, A. (2023). Annular fuel for VVER-1000 reactor: Moderation impact on neutronic behavior. *Progress in Nuclear Energy, 165*(1), Article 104907. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104907

15. Nasiri, S., & Ansarifar, G. R. (2025). Neutronic design and analysis of the accident-tolerant fuel (ATF) application to VVER-1000 nuclear reactor as well as evaluation of dynamic parameters. *Nuclear Engineering and Design, 432*(1), Article 113814. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113814