УДК 621.039.526
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.2/33

Неня М.М.
https://orcid.org/0009-0009-9193-9403
Національний університет «Одеська політехніка»

ГІБРИДНИЙ ГЕНЕТИЧНИЙ АЛГОРИТМ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕСТАНОВОК ТЕПЛОВИДІЛЬНИХ ЗБІРОК У РЕАКТОРІ ВВЕР-1000 З МІНІМІЗАЦІЄЮ ПОШКОДЖЕННЯ ОБОЛОНОК

Актуальність дослідження зумовлена зростанням вимог до ядерної безпеки та паливної надійності енергоблоків із реакторами типу ВВЕР-1000 в умовах подовження термінів їхньої експлуатації та ускладнення паливних кампаній. У праці обґрунтовано, що традиційні підходи до планування перестановок тепловидільних збірок орієнтовані переважно на дотримання нейтронно-фізичних і теплогідравлічних обмежень та не забезпечують цілеспрямованої мінімізації пошкодження оболонок паливних елементів, що має кумулятивний характер і визначає довгострокову надійність активної зони.

Метою статті є наукове обґрунтування та розроблення методу оптимізації перестановок тепловидільних збірок в активній зоні ядерного реактора типу ВВЕР-1000 з використанням гібридного генетичного алгоритму, спрямованого на мінімізацію параметра пошкодження оболонок паливних елементів за дотримання експлуатаційних і безпекових обмежень.

Методи дослідження ґрунтуються на застосуванні системного аналізу процесів управління активною зоною, формалізації задачі перестановок як дискретної оптимізаційної проблеми, методах еволюційної оптимізації та алгоритмічного моделювання. Використано гібридний генетичний алгоритм із проблемно-орієнтованими операторами перестановок і локального вдосконалення, а також підхід інтеграції параметра пошкодження оболонок до цільової функції оптимізації.

Результати дослідження. Досліджено вплив конфігурації перестановок тепловидільних збірок на формування термомеханічних навантажень і накопичення пошкоджень оболонок паливних елементів. Встановлено обмежену ефективність детермінованих та евристичних методів щодо врахування цього параметра. Обґрунтовано вимоги до методу оптимізації з урахуванням дискретності задачі, обмежень ядерної безпеки та обчислювальної складності. Розроблено метод оптимізації на основі гібридного генетичного алгоритму, у якому мінімізацію пошкодження оболонок використано як ключовий критерій ефективності.

Висновки. Доведено, що запропонований метод забезпечує формування фізично допустимих та інженерно інтерпретованих конфігурацій активної зони, які допомагають знизити інтегральне пошкодження оболонок паливних елементів без порушення вимог ядерної безпеки. Показано доцільність використання гібридних еволюційних алгоритмів для розв'язання задач управління паливними кампаніями реакторів типу ВВЕР-1000.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розвитком сурогатних моделей оцінювання цільової функції, урахуванням стохастичних чинників експлуатації та адаптацією запропонованого методу до різних типів паливних кампаній і режимів довготривалої експлуатації енергоблоків.

Ключові слова: *ядерна безпека, управління активною зоною, еволюційна оптимізація, дискретні комбінаторні задачі, паливна надійність, інженерна підтримка рішень.*

Постановка проблеми. Сучасні вимоги до підвищення безпеки та ефективності експлуатації ядерних енергетичних установок із реакторами типу ВВЕР-1000 актуалізують проблему оптимального керування активною зоною, зокрема задачі перестановок тепловидільних збірок у паливних кампаніях. У процесі тривалої експлуатації реактора зростає нерівномірність нейтронно-фізичних і теплогідравлічних полів, що призводить до локального підвищення температурних і механічних навантажень на оболонки паливних елементів і, відповідно, до прискорення процесів їхньої деградації. Це створює ризики зниження паливної надійності, обмежує глибину

© Неня М.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

вигоряння палива та ускладнює досягнення економічно оптимальних режимів роботи енергоблоків. У цьому контексті задача мінімізації пошкодження оболонок паливних елементів набуває ключового значення як з позицій ядерної безпеки, так і з огляду на підвищення ресурсу активної зони та зниження витрат на паливний цикл.

З огляду на наведене, проблема оптимізації перестановок тепловидільних збірок має складний багатокритеріальний і комбінаторний характер, що зумовлено великою розмірністю простору допустимих рішень, наявністю жорстких експлуатаційних обмежень і необхідністю врахування взаємопов'язаних нейтронно-фізичних, теплових і матеріалознавчих чинників. Традиційні детерміновані підходи та класичні евристичні методи виявляються недостатньо ефективними для пошуку наближених до оптимальних конфігурацій активної зони в умовах зростаючої складності моделей і вимог до точності прогнозування пошкоджень оболонок. У цьому контексті розроблення гібридних генетичних алгоритмів, що поєднують еволюційні механізми глобального пошуку з проблемно-орієнтованими процедурами локальної оптимізації, є важливим науковим завданням, що спрямоване на підвищення обґрунтованості рішень з управління паливними кампаніями. Практична значущість дослідження полягає у створенні інструментарію, здатного забезпечити одночасне підвищення рівня ядерної безпеки, паливної ефективності та економічної результативності експлуатації енергоблоків із реакторами ВВЕР-1000.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд сучасних досліджень свідчить про стале домінування еволюційних підходів, насамперед генетичних алгоритмів, у розв'язанні задач перестановок тепловидільних збірок і формування схем завантаження. Зокрема у своїй праці Р. Кіанпур (R. Kianpour) та співавтори окреслили як генетичний алгоритм застосовано для оптимального проєктування активної зони ВВЕР-1000 з урахуванням нейтронно-фізичних і теплогідравлічних коефіцієнтів реактивності, що підтверджує ефективність дискретного кодування конфігурацій активної зони [1]. Натомість С. Со (C. So) та співавтори показали, що адаптивний генетичний алгоритм для PWR забезпечує кращу збіжність і стійкість оптимальних рішень завдяки динамічній зміні операторів еволюції [2]. У своєму дослідженні Г. Фан (G. Phan) та співавтори використали удосконалений генетичний алгоритм для оптимізації завантаження дослідницького реактора, що продемонструвало універсальність підходу, але з фокусом переважно на нейтронних показниках [3]. Аналогічну спрямованість має дослідження Т. Т. П. Зянг (T. T. P. Giang) та співавторів, у якому покращені процедури селекції дали змогу підвищити якість оптимальних схем без явного врахування паливної деградації [4].

Окрім того, значна частина наукових розвідок зорієнтована на гібридизацію генетичних алгоритмів з іншими метаевристиками для підвищення якості глобального пошуку. Так, В. П. Чан (V. P. Tran) та співавтори застосували еволюційний імітаційний відпал для оптимізації завантаження палива ВВЕР-1000, що дало змогу ефективніше досліджувати складні багатовимірні простори допустимих перестановок [5]. У своїй праці В. К. Хоанг (V. K. Hoang) та співавтори використали гібридний підхід для оптимізації активної зони малого реактора, продемонструвавши підвищену стійкість збіжності за жорстких безпекових обмежень [6]. Подібні результати отримали Т. В. Фу (T. V. Phu) та співавтори для реактора теплової потужності 200 МВт, де імітаційний відпал поєднано з еволюційним пошуком [7]. У праці Р. Акбарі (R. Akbari) та співавторів показано ефективність алгоритму зозулиної оптимізації для повномасштабної оптимізації активної зони SMR, що підтверджує потенціал біоінспірованих гібридних методів у ядерній інженерії [8].

Окремий масив праць присвячений поєднанню еволюційних алгоритмів із методами машинного навчання з метою зниження обчислювальної складності оптимізації. Зокрема А. Кораняні (A. Koraniany) та співавтори запропонували підхід ANN-GA для оптимізації змішаної активної зони ВВЕР-1000, що дає змогу апроксимувати складні нейтронні залежності без повномасштабних розрахунків на кожній ітерації [9]. У своєму дослідженні Р. А. Салім (R. A. Saleem) та співавтори окреслили можливості глибоких нейронних мереж для високовимірних задач нейтроніки активної зони BWR, що створює підґрунтя для їхньої інтеграції в оптимізаційні алгоритми [10]. Водночас В. Собес (V. Sobes) та співавтори розвинули концепцію AI-орієнтованого проєктування активної зони, у межах якої машинне навчання постає ключовим елементом пошуку оптимальних конфігурацій [11]. Теоретичні засади таких підходів систематизовано в монографії Б. Золгадр-Аслі (B. Zolghadr-Asli), що формує методологічну базу computational intelligence для складних інженерних задач [12].

Водночас низка досліджень зосереджена на

теплофізичних і конструктивних аспектах палива, які визначають його надійність і мають бути інтегровані в оптимізаційні моделі. Так, М. Гасабіан (M. Ghasabian) та співавтори продемонстрували можливості метаевристичної оптимізації тиску гелію в паливних стрижнях, що безпосередньо впливає на механічний стан оболонок [13]. У праці Ю. Рахмані (Y. Rahmani) та співавторів оптимізацію перестановок тепловидільних збірок ВВЕР-1000 у перехідних кампаніях виконано з використанням алгоритму оптимізації інвазивних бур'янів, що підкреслює важливість експлуатаційної надійності палива [14]. Натомість В. Лутфі (W. Luthfi) та співавтори проаналізували нейтронну поведінку тепловидільних збірок ВВЕР-1000 з удосконаленим дизайном паливних стрижнів, показавши зв'язок між конструктивними параметрами та потенційними механізмами пошкодження оболонок [15].

Попри значні напрацювання у сфері управління активною зоною реакторів типу ВВЕР-1000, низка аспектів залишається невирішеною. Насамперед недостатньо досліджено кількісний вплив конфігурацій перестановок тепловидільних збірок на кумулятивне пошкодження оболонок паливних елементів упродовж декількох паливних кампаній. У більшості наявних підходів цей параметр не інтегрується безпосередньо до цільових функцій оптимізації, а використовується переважно як обмеження чи показник контролю. Окрім того, обмежено опрацьовано методологічні проблеми застосування еволюційних алгоритмів у дискретних задачах управління активною зоною, зокрема питання коректності кодування рішень, збіжності та інтерпретованості результатів за умов високої обчислювальної складності.

Запропоноване дослідження спрямоване на усунення цих прогалин шляхом інтеграції параметра пошкодження оболонок паливних елементів до цільової функції оптимізації та розроблення адаптованого гібридного генетичного алгоритму. Це дає змогу підвищити обґрунтованість управлінських рішень, забезпечити зниження довгострокових ризиків деградації палива та розширити наукові та практичні можливості оптимізації паливних кампаній реакторів типу ВВЕР-1000.

Постановка завдання. Метою статті є наукове обґрунтування та розроблення методу оптимізації перестановок тепловидільних збірок в активній зоні ядерного реактора типу ВВЕР-1000 з використанням гібридного генетичного алгоритму, спрямованого на мінімізацію параметра пошкодження оболонок паливних елементів за дотримання експлуатаційних і безпекових обмежень.

Для досягнення поставленої мети в статті передбачається розв'язання таких завдань:

1. Проаналізувати вплив конфігурацій перестановок тепловидільних збірок на формування пошкоджень оболонок паливних елементів і можливості їх урахування в задачах оптимізації активної зони реактора ВВЕР-1000.

2. Обґрунтувати вимоги до методів оптимізації перестановок тепловидільних збірок з урахуванням дискретного характеру задачі, обмежень ядерної безпеки, обчислювальної складності та особливостей застосування гібридних еволюційних алгоритмів.

3. Розробити метод оптимізації перестановок тепловидільних збірок на основі гібридного генетичного алгоритму з мінімізацією параметра пошкодження оболонок паливних елементів.

Виклад основного матеріалу. У процесі експлуатації ядерного реактора типу ВВЕР-1000 конфігурація перестановок тепловидільних збірок безпосередньо визначає просторову структуру нейтронно-фізичних і теплових полів активної зони, а отже, рівень термомеханічних і корозійних навантажень на оболонки паливних елементів. Нерівномірний розподіл вигоряння та взаємодія збірок із різними експлуатаційними характеристиками формують локальні зони підвищеного навантаження, у яких інтенсифікуються процеси деградації матеріалу оболонок. За таких умов схема перестановок постає не лише організаційним елементом паливної кампанії, а й важливим керованим чинником, що впливає на накопичення пошкоджень паливних елементів упродовж усього експлуатаційного циклу (табл. 1).

Зокрема в сучасних умовах експлуатації енергоблоків ВВЕР-1000 вплив наведених конфігураційних чинників проявляється комплексно і часто має кумулятивний характер. Наприклад, розміщення збірок із високим вигорянням у центральних зонах активної зони може бути допустимим з погляду реактивності, але водночас призводити до стійкого підвищення температур оболонок і зростання швидкості їх повзучості. Водночас часті перестановки збірок у межах декількох паливних кампаній змінюють історію механічних і теплових навантажень паливних елементів, що ускладнює прогнозування довгострокової цілісності оболонок за допомогою традиційних регламентних підходів. На практиці це означає, що навіть за відсутності перевищення граничних параметрів можливе накопичення прихованих пошкоджень, які проявляються на пізніших ета-

Таблиця 1

Вплив конфігурації перестановок тепловидільних збірок на чинники пошкодження оболонок паливних елементів у реакторі ВВЕР-1000

Конфігураційний чинник	Характер впливу на активну зону	Наслідки для пошкодження оболонок
Радіальне розміщення збірок різного вигоряння	Формування локальних піків нейтронного потоку та тепловиділення	Підвищення температури оболонок і термічних напружень
Частота та схема перестановок	Зміна режимів циклічного навантаження паливних елементів	Акумуляція втомних пошкоджень оболонок
Сусідство збірок із контрастними параметрами	Посилення просторових градієнтів температури і потоку	Локальна деградація матеріалу оболонок
Повторне використання та орієнтація збірок	Нерівномірний розподіл механічних і хімічних впливів	Прискорене старіння оболонок у критичних зонах

Джерело: сформовано автором на основі [1; 5; 9; 13; 14; 15].

Таблиця 2

Підходи до оптимізації перестановок тепловидільних збірок і можливості врахування пошкодження оболонок паливних елементів

Підхід до оптимізації	Фокус цільової функції	Можливість інтеграції параметра пошкодження оболонок
Детерміновані методи	Мінімізація пікових теплових і нейтронних навантажень	Обмежена, здебільшого через систему обмежень
Евристичні та шаблонні схеми	Забезпечення нормативної допустимості	Відсутня, параметр не формалізується
Класичні генетичні алгоритми	Вигоряння та реактивність	Часткова, ускладнена багатокритеріальністю
Багатокритеріальні еволюційні методи	Компроміс між ефективністю і безпекою	Висока, можливе явне включення параметра
Гібридні еволюційні алгоритми	Глобально-локальна оптимізація	Найбільш придатна для кількісного врахування

Джерело: сформовано автором на основі [2; 3, p. 11; 4, p. 10; 6; 7, p. 23; 8].

пах експлуатації [15]. Отже, у сучасних системах планування паливних кампаній дедалі більшого значення набувають методи, що дають змогу кількісно оцінювати вплив конкретних конфігурацій перестановок на пошкодження оболонок і використовувати цю інформацію як критерій оптимізації під час вибору раціональних схем завантаження активної зони.

З огляду на це, оптимізація перестановок тепловидільних збірок у реакторах типу ВВЕР-1000 здебільшого зорієнтована на виконання нейтронно-фізичних і теплогідравлічних вимог, тоді як параметри пошкодження оболонок паливних елементів у більшості підходів враховуються опосередковано чи на етапі перевірки допустимості вже сформованих конфігурацій. Така практика обмежує можливість цілеспрямованого впливу на довгострокову паливну надійність і зумовлює потребу в аналізі наявних оптимізаційних методів із позицій їх здатності інтегрувати параметр пошкодження оболонок безпосередньо до цільових функцій (табл. 2).

У сучасних умовах експлуатації енергоблоків ВВЕР-1000 зазначені підходи демонструють різну ефективність з точки зору довгострокового стану паливних елементів. Так, застосування детермінованих методів дає змогу гарантовано уникати перевищення граничних теплових параметрів, однак не запобігає накопиченню пошкоджень оболонок унаслідок повторюваних циклів навантаження протягом декількох кампаній. Евристичні схеми, що широко використовуються на практиці, забезпечують відтворюваність рішень, але практично не чутливі до індивідуальної історії експлуатації конкретних тепловидільних збірок [7, p. 23]. Натомість багатокритеріальні та гібридні еволюційні алгоритми дають змогу включати параметр пошкодження оболонок безпосередньо до цільової функції, що на практиці сприяє відсіюванню конфігурацій з потенційно несприятливим поєднанням температурних, механічних і корозійних чинників. Наприклад, у процесі оптимізації такі алгоритми можуть надавати перевагу схемам перестановок, які дещо поступаються за показ-

никами вигоряння, проте забезпечують зниження інтегрального пошкодження оболонок протягом повного паливного циклу [3, p. 11]. Це робить гібридні підходи перспективними для сучасних систем підтримки прийняття рішень, зорієнтованих не лише на досягнення нормативної допустимості, а й на підвищення надійності та ресурсу активної зони в довгостроковій перспективі.

Таким чином, задача оптимізації перестановок тепловидільних збірок у реакторі типу ВВЕР-1000 є дискретною за своєю природою та реалізується в умовах жорстких обмежень ядерної безпеки та значної обчислювальної складності розрахункових процедур. Це зумовлює необхідність формування таких методів оптимізації, які одночасно забезпечують коректну роботу з дискретними конфігураціями активної зони, недопущення небезпечних режимів експлуатації та прийнятний час отримання рішень для практичного використання (табл. 3).

На практиці виконання наведених вимог визначає можливість інтеграції методу оптимізації в реальні процеси планування паливних кампаній. Так, дискретність задачі вимагає використання операторів перестановок, які гарантують збереження топології активної зони та унеможливлюють появу конфігурацій, що не можуть бути реалізовані фізично. Окрім того, урахування обмежень ядерної безпеки зазвичай реалізується через комбінацію жорстких правил відсікання та штрафних механізмів, завдяки чому небезпечні рішення усуваються ще на ранніх етапах оптимізаційного пошуку. З практичної точки зору це дає змогу суттєво зменшити кількість повних нейтронно-фізичних розрахунків, які виконуються лише для обмеженого набору найбільш перспективних конфігурацій. Наприклад, у сучасних умовах експлуатації можуть застосовуватися спрощені індикатори теплового навантаження або нерівномірності вигоряння для попереднього ранжування рішень, після чого детальний аналіз проводиться лише для схем, що відповідають базовим вимогам безпеки [10, p. 2716]. Такий підхід забезпечує баланс між точністю, обчислювальною ефективністю та надійністю результатів і робить метод оптимізації придатним для використання в інженерній практиці управління активною зоною реакторів типу ВВЕР-1000.

З огляду на це, застосування гібридних еволюційних алгоритмів у задачах управління активною зоною реакторів типу ВВЕР-1000 супроводжується низкою науково-практичних проблем, зумовлених як специфікою предметної області, так і особливостями самих алгоритмічних підходів. Однією з ключових проблем є коректність кодування рішень, оскільки невідповідність між генетичним поданням перестановок тепловидільних збірок і фізично допустимими конфігураціями активної зони призводить до генерації некоректних або нефізичних рішень, що ускладнює чи робить неможливим їх подальший аналіз [11]. Важливою проблемою залишається забезпечення збіжності алгоритму в умовах надзвичайно великого та розірваного простору допустимих рішень, у якому численні локальні екстремуми можуть спричиняти передчасну стабілізацію популяції та втрату здатності до пошуку більш раціональних конфігурацій. Окрім того, оптимізацію додатково ускладнює багатокритеріальний характер задачі, за якого суперечливі вимоги безпеки, ефективності та мінімізації пошкодження оболонок паливних елементів ускладнюють формування адекватної цільової функції та механізмів селекції. До цього додається проблема обчислювальної вартості оцінки кожного рішення, оскільки використання детальних нейтронно-фізичних моделей істотно обмежує кількість ітерацій і розмір популяції, що негативно впливає на стійкість еволюційного

Таблиця 3

Вимоги до методу оптимізації перестановок тепловидільних збірок у реакторі ВВЕР-1000

Група вимог	Зміст вимоги	Практичне значення
Дискретність рішень	Коректне кодування перестановок без втрати допустимості	Усунення фізично неможливих конфігурацій
Безпекові обмеження	Дотримання нейтронно-фізичних і теплогідравлічних критеріїв	Забезпечення ядерної та експлуатаційної безпеки
Обчислювальна ефективність	Обмеження кількості ресурсоємних розрахунків	Придатність для інженерного застосування
Масштабованість	Стійкість до зростання розмірності задачі	Адаптація до різних схем завантаження
Інтерпретованість	Прозорість і відтворюваність результатів	Підтримка прийняття рішень персоналом

Джерело: сформовано автором на основі [2; 6; 7, p. 23; 10, p. 2716; 11; 12].

пошуку. Окрему науково-практичну проблему становить інтерпретованість отриманих результатів, оскільки складна структура гібридних алгоритмів ускладнює встановлення причиново-наслідкових зв'язків між параметрами алгоритму та фізичними характеристиками активної зони.

Отже, запропонований метод оптимізації перестановок тепловидільних збірок базується на використанні гібридного генетичного алгоритму для пошуку раціональних конфігурацій активної зони реактора типу ВВЕР-1000 в умовах дискретного простору рішень і жорстких обмежень ядерної безпеки. Метод призначений для підтримки планування паливних кампаній і спрямований на мінімізацію інтегрального параметра пошкодження оболонок паливних елементів, що розглядається як ключовий критерій довгострокової паливної надійності. На відміну від традиційних підходів, де цей параметр контролюється лише на етапі перевірки допустимості, у запропонованому методі він безпосередньо інтегрований у цільову функцію оптимізації. Алгоритмічне підґрунтя методу поєднує глобальний еволюційний пошук із проблемно-орієнтованими процедурами локального вдосконалення конфігурацій і використовує спеціалізоване кодування перестановок, що гарантує фізичну допустимість рішень та їх інженерну інтерпретованість (рис. 1).

У сучасних умовах експлуатації енергоблоків ВВЕР-1000 застосування такого методу дає змогу перейти від шаблонного формування схем перестановок до керованої оптимізації з урахуванням історії експлуатації кожної тепловидільної збірки. На практиці алгоритм віддає перевагу конфігураціям, у яких знижуються локальні піки термомеханічних навантажень і вирівнюється накопичення пошкоджень оболонок упродовж декількох паливних кампаній. Гібридна структура методу забезпечує поєднання стійкості глобального пошуку з точністю локального коригування, що дає змогу ефективно працювати за обмеженої кількості ресурсоємних нейтронно-фізичних розрахунків. У результаті формуються фізично реалізовні та інтерпретовані інженером конфігурації активної зони, які одночасно відповідають вимогам безпеки та сприяють підвищенню ресурсу та надійності паливних елементів.

Висновки. Отже, у ході дослідження встановлено, що оптимізація перестановок тепловидільних збірок у реакторі типу ВВЕР-1000 є складною дискретною багатокритеріальною задачею, для розв'язання якої традиційні детерміновані та шаблонно-евристичні підходи не забезпечують цілеспрямованого зниження довгострокових ризиків деградації палива. Показано, що конфігурація перестановок істотно впливає на просторовий

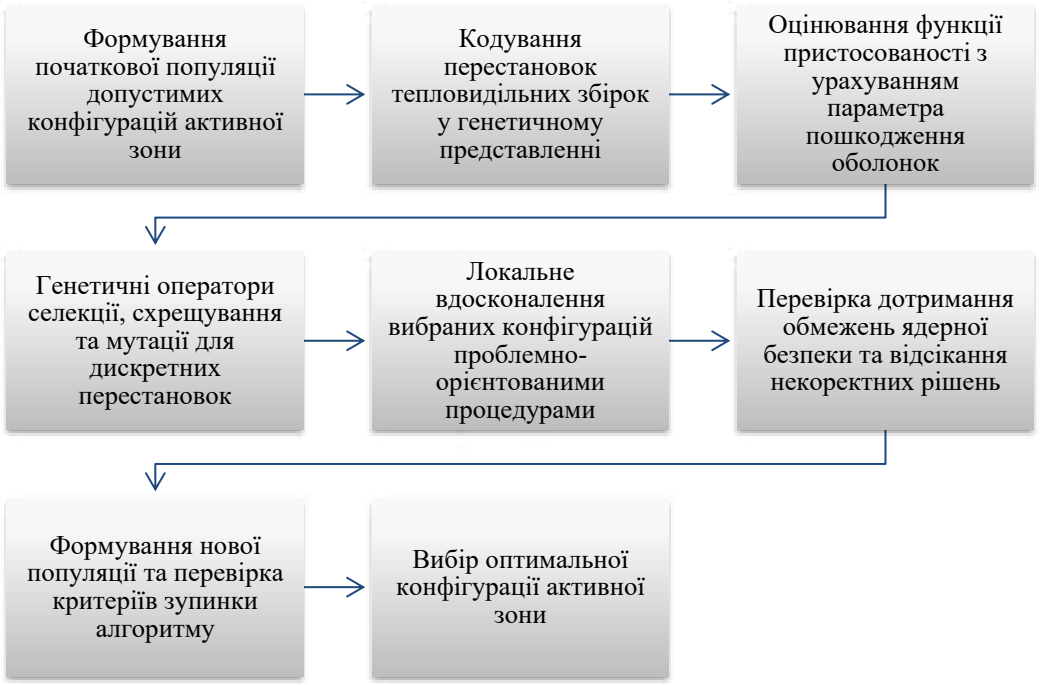

Рис. 1. Метод оптимізації перестановок тепловидільних збірок на основі гібридного генетичного алгоритму

Джерело: власна розробка автора.

розподіл термомеханічних навантажень, а накопичене пошкодження оболонок паливних елементів має кумулятивний характер і не завжди корелює з миттєвими показниками нейтронно-фізичної або теплогідравлічної допустимості. Аналіз наявних підходів до оптимізації засвідчив, що параметр пошкодження оболонок у більшості з них враховується опосередковано або виконує роль обмеження, що обмежує можливості керованої оптимізації паливної надійності. Встановлено, що гібридні еволюційні алгоритми є найбільш придатними для інтеграції цього параметра до цільової функції завдяки гнучкості пошуку в дискретному просторі рішень і здатності враховувати множину експлуатаційних обмежень. Обґрунтовано вимоги до методу оптимізації, пов'язані з коректним кодуванням перестановок, забезпеченням збіжності, обмеженням обчислювальних витрат і інтерпретованістю результатів. Виявлено головні науково-практичні проблеми застосування гібридних еволюційних алгоритмів у задачах управління активною зоною, зокрема ризик передчасної збіжності, складність формування адекватної цільової функції та висока вартість оцінювання конфігурацій. Розроблено метод оптимізації перестановок тепловидільних збірок на основі гібридного генетичного алгоритму, у межах якого мінімізацію пошкодження оболонок паливних елементів використано як ключовий критерій ефективності. Застосування запропонованого методу дає змогу формувати фізично допустимі та інженерно інтерпретовані конфігурації активної зони, що забезпечують зниження інтегрального пошкодження оболонок і підвищення ресурсу палива за умови дотримання вимог ядерної безпеки.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розвитком сурогатних моделей оцінювання, урахуванням стохастичних чинників експлуатації та адаптацією методу до різних типів паливних кампаній.

Список літератури:

1. Kianpour R., Ansarifar G. R., Fathi M. Optimal design of a VVER-1000 nuclear reactor core with dual cooled annular fuel based on the reactivity temperature coefficients using thermal hydraulic and neutronic analysis by implementing the genetic algorithms. *Annals of Nuclear Energy*. 2020. Vol. 148. Article 107682. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107682

2. So C., Ho I. M., Chae J. S., Hong K. H. PWR core loading pattern optimization with adaptive genetic algorithm. *Annals of Nuclear Energy*. 2021. Vol. 159. Article 108331. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108331

3. Phan G., Tran H. N., Do Q. B. Improved genetic algorithm for fuel loading optimization of the DNRR with HEU fuel. *Nuclear Science and Technology*. 2022. Vol. 12, No. 2. P. 1–11. DOI: https://doi.org/10.53747/nst.v12i2.337

4. Giang T. T. P., Nam H. T., Quang B. D. Performance of genetic algorithm with improved selection techniques for fuel loading optimization of the DNRR with HEU fuel. In: *Vietnam Conference on Nuclear Science and Technology VINANST-14. Agenda and Abstracts*. 2021. No. INIS-VN--005. P. 1–10. URL: https://inis.iaea.org/records/5h5wv-sb957

5. Tran V. P., Phan G. T., Hoang V. K., Ha P. N. V., Yamamoto A., Tran H. N. Evolutionary simulated annealing for fuel loading optimization of VVER-1000 reactor. *Annals of Nuclear Energy*. 2021. Vol. 151. Article 107938. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107938

6. Hoang V. K., Phan G. T., Tran V. P., Chu T. N., Nguyen H. T., Phan H., Tran H. N. Core design optimization of a 200 MWt pressurized water SMR using evolutionary simulated annealing. *Nuclear Engineering and Design*. 2024. Vol. 418. Article 112892. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112892

7. Phu T. V., Nam T. H., Van Khanh H. Application of evolutionary simulated annealing method to design a small 200 MWt reactor core. *Nuclear Science and Technology*. 2020. Vol. 10, No. 4. P. 16–23. DOI: https://doi.org/10.53747/jnst.v10i4.11

8. Akbari R., Ochbelagh D. R., Gharib A., Maiorino J. R., D'Auria F. Small modular reactor full scope core optimization using Cuckoo Optimization Algorithm. *Progress in Nuclear Energy*. 2020. Vol. 122. Article 103271. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103271

9. Koraniany A., Ansarifar G. R. Neutronic design and optimizing the mixed core of VVER-1000 nuclear reactor via ANN-GA approach as machine learning method. *Nuclear Engineering and Design*. 2025. Vol. 432. Article 113827. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.113827

10. Saleem R. A., Radaideh M. I., Kozlowski T. Application of deep neural networks for high-dimensional large BWR core neutronics. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020. Vol. 52, No. 12. P. 2709–2716. DOI: https://doi.org/10.1016/j.net.2020.05.010

11. Sobes V., Hiscox B., Popov E., Archibald R., Hauck C., Betzler B., Terrani K. AI-based design of a nuclear reactor core. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11, No. 1. Article 19646. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-021-98037-1

12. Zolghadr-Asli B. Computational intelligence-based optimization algorithms: From theory to practice. Boca Raton: *CRC Press*. 2023. 356 p. DOI: https://doi.org/10.1201/9781003424765

13. Ghasabian M., Talebi S., Safarzadeh O. Application of metaheuristics optimization in fuel rod design: A case study for helium charging pressure. *Progress in Nuclear Energy*. 2021. Vol. 142. Article 103982. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103982

14. Rahmani Y., Shahvari Y., Kia F. Application of invasive weed optimization algorithm for optimizing the reloading pattern of a VVER-1000 reactor (in transient cycles). *Nuclear Engineering and Design*. 2021. Vol. 376. Article 111105. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111105

15. 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. Article 113168. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113168

Nenia M.M. HYBRID GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMIZING THE ARRANGEMENT OF HEAT EXCHANGER ASSEMBLIES IN THE VVER-1000 REACTOR WITH MINIMIZATION OF SHELL DAMAGE

The relevance of the study is determined by the growing requirements for nuclear safety and fuel reliability of power units with VVER-1000 reactors in the context of extending their operating life and complicating fuel campaigns. The paper substantiates that traditional approaches to planning fuel assembly rearrangements are focused primarily on compliance with neutron-physical and thermal-hydraulic constraints and do not provide for the targeted minimization of fuel element cladding damage, which is cumulative in nature and determines the long-term reliability of the core.

The purpose of the article is to scientifically substantiate and develop a method for optimizing fuel assembly repositioning in the core of a VVER-1000 nuclear reactor using a hybrid genetic algorithm aimed at minimizing fuel element cladding damage while complying with operational and safety constraints.

The research methods are based on the application of system analysis of core control processes, formalization of the rearrangement problem as a discrete optimization problem, evolutionary optimization methods, and algorithmic modeling. A hybrid genetic algorithm with problem-oriented permutation and local improvement operators was used, as well as an approach to integrating the fuel element cladding damage parameter into the optimization objective function.

Research results. The influence of the configuration of heat-generating assemblies on the formation of thermomechanical loads and the accumulation of damage to fuel element cladding is investigated. The limited effectiveness of deterministic and heuristic methods for taking this parameter into account is established. Requirements for the optimization method were substantiated, taking into account the discreteness of the problem, nuclear safety constraints, and computational complexity. An optimization method based on a hybrid genetic algorithm was developed, in which the minimization of cladding damage was used as a key criterion of effectiveness.

Conclusions. It has been proven that the proposed method ensures the formation of physically acceptable and engineering-interpreted core configurations that help reduce the integral damage to fuel element cladding without violating nuclear safety requirements. The feasibility of using hybrid evolutionary algorithms to solve fuel campaign management problems for VVER-1000 reactors is demonstrated.

Prospects for further research are related to the development of surrogate models for evaluating the objective function, taking into account stochastic factors of operation, and adapting the proposed method to different types of fuel campaigns and modes of long-term operation of power units.

Keywords: *nuclear safety, core management, evolutionary optimization, discrete combinatorial problems, fuel reliability, engineering decision support.*

Дата першого надходження статті до видання: 14.01.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.02.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026