

Терещенко Д.О.

Одеський національний політехнічний університет

Пелих С.М.

Одеський національний політехнічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА РЕАКТОРА ВВЕР-1000 ПРОТЯГОМ КАМΠΑНІЇ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

Об'єктом дослідження є умови розробки автоматизованої системи управління для мінімізації радіоактивних протікань у контур ВВЕР за нормальних умов експлуатації шляхом оптимізації режимів навантаження реактора та перестановок тепловиділяючих збірок. Запропоновано автоматизовану систему керування властивостями ядерного палива реактора ВВЕР-1000 з урахуванням параметра деформаційного пошкодження оболонок твелів, глибини вигорання ядерного палива і аксіального офсету. Мета роботи – розробка підґрунтя для поліпшення балансу ефективності безпеки експлуатації реакторів типу ВВЕР, запропоновано новий підхід до мінімізації витоків радіоактивних речовин у ланцюг ВВЕР при нормальних умовах роботи, заснований на мінімізації параметру деформаційного пошкодження оболонок твелів; розробка фундаменту автоматизованої системи контролю властивостей палива реактора ВВЕР-1000 з метою забезпечення балансу безпеки та ефективності роботи палива. Роз'яснено синергічну природу методу СЕТ, розробленого для контролю властивостей ядерного палива. Описано два основні методи забезпечення балансу ефективності під час роботи палива реактора ВВЕР-1000 та надано відповідні цільові функції. Запропоновано технологію контролю герметичності оболонок твелів реактору типу ВВЕР, що включає контроль параметрів, які визначають дозу радіоактивного витоку через оболонки твелів у ланцюг реактора за нормальних робочих умов; запропоновано новий метод управління параметрами, що визначають об'єм радіоактивних протікань у перший контур крізь мікротріщини оболонок твелів, за нормальних умов експлуатації реактора, оптимізація режимів навантаження і перестановок ТВЗ реактора на основі цільової функції, що враховує одночасно параметр пошкодження оболонок, глибину вигорання ядерного палива і аксіальний офсет. Показано умови розробки автоматизованої системи управління для мінімізації радіоактивних протікань в контур ВВЕР за нормальних робочих умов шляхом оптимізації режиму навантаження реактора та перестановок тепловиділяючих збірок. Запропоновані склад і структура автоматизованої системи керування властивостями палива реактора ВВЕР-1000, що забезпечує баланс між безпекою та економічністю експлуатації ядерного палива.

Ключові слова: автоматизована система керування, реактор ВВЕР-1000, програмний засіб, оболонка твела, мінімізація радіоактивних протікань, параметр пошкодження.

Постановка проблеми. Поточний та передбачуваний стан економіки України передбачає, що суворі вимоги щодо безпеки та ефективності ядерної енергетики будуть постійно актуальними. Ця проблема безпеки та ефективності ядерної енергетики тісно пов'язана з проблемою безпеки та ефективності експлуатації ядерного палива, оскільки оболонка палива насамперед є ключовим бар'єром безпеки під час роботи ядерних реакторів. Беручи до уваги, що досі достеменно невідома причина відмови оболонок твелів у ВВЕР, щоб гарантувати безпеку та ефективність роботи палива, слід розробити складні методи контролю

ймовірності відмови облицювання, враховуючи різні фізичні механізми, що призводять до відмови оболонок твелів, включаючи накопичення пошкоджень [1, с. 30].

Оскільки для нормальних умов експлуатації, включаючи змінні режими завантаження, синергічний метод контролю властивостей ядерного палива (метод СЕТ) дозволяє мінімізувати витік радіоактивних речовин через оболонки палива в ланцюг ВВЕР одночасно з оптимізацією параметрів роботи палива, автоматизована система для контролю властивостей палива реактора ВВЕР-1000, що забезпечить збалансованість

ефективності роботи палива, може бути розроблена на основі методу СЕТ. Хоча деякі проблеми в застосуванні методу СЕТ все ще залишаються невирішеними, наприклад, граничне значення параметра пошкодження оболонок твелів, що відповідає будь-якому виду несправності оболонок, повинно бути обґрунтованим, було зрозуміло, що витік радіоактивних речовин у ланцюг реактору типу ВВЕР може бути мінімізованим у звичайних умовах експлуатації за допомогою автоматизованої системи управління, що оптимізує режими завантаження ВВЕР та перестановки основних вузлів палива, застосовуючи об'єктивну функцію, включаючи параметр деформаційного пошкодження оболонок твелів, глибини вигорання ЯП і аксіального офсету [2, с. 10–11; 3, с. 219].

Таким чином, для планування та оцінки дослідницького проекту, присвяченого вдосконаленню балансу ефективності ВВЕР за допомогою поліпшення контролю руйнування оболонки палива за рахунок накопичення пошкоджень, виникає наступне питання: яким має бути склад та структура такої перспективної автоматизованої системи для контролю властивостей палива, якщо потрібно реалізувати його на стандартному ядерному енергоблоці з реактором ВВЕР-1000, який зараз використовується в Україні. [6, с. 109]

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка підґрунтя автоматизованої системи контролю властивостей палива реактора ВВЕР-1000 з метою забезпечення балансу безпеки та ефективності роботи палива. Буде роз'яснено синергічну природу методу СЕТ, розробленого для контролю властивостей ядерного палива. Описано два основні методи забезпечення балансу ефективності під час роботи палива реактора ВВЕР-1000 та надано відповідні цільові функції. Нарешті, буде запропоновано склад та структуру перспективної автоматизованої системи контролю властивостей палива ВВЕР-1000.

Виклад основного матеріалу дослідження. Оскільки параметр пошкодження оболонок твелів є невіддільною характеристикою зростання мікротріщин, ми можемо мінімізувати витік радіоактивних речовин у ланцюг ВВЕР за нормальних умов роботи, включаючи змінні режими завантаження, шляхом мінімізації. Таким чином, ідея полягає у використанні методу СЕТ для мінімізації руйнування оболонок твелів через накопичення пошкоджень за змінного навантаження реактора і, як результат внутрішніх особливостей способу, враховувати історію завантаження будь-якого пального,

а також розподіл параметра пошкодження серед паливних елементів будь-якого пального. Метод СЕТ, розроблений з використанням експериментально перевіреної теорії повзучості, має такі особливості:

1. Універсальність, оскільки це дозволяє нам оптимізувати конструкцію та параметри роботи палива одночасно з оптимізацією параметрів реактора, для різних матеріалів та конструкцій ядра реактора типу ВВЕР, а також для різних режимів завантаження реактора;

2. Значно знижена невизначеність оцінок параметрів пошкодження оболонок твелів;

3. Зниження проектних витрат на пальне, підвищення безпеки / ефективності роботи палива.

Критерій СЕТ та критерій ефективності дозволили нам розробити критерій для мінімізації ймовірності відмови оболонок твелів за рахунок накопичення параметру пошкодження, що описує зростання мікротріщин у оболонках паливних елементів. Важливість параметра пошкодження оболонок твелів, використовуваного в критерії СЕТ, полягає у його сукупному характері, що описує еволюцію мікротріщин, через які витікають радіоактивні речовини. Структура критерію СЕТ дозволила запропонувати узагальнений метод контролю поведінки паливного стрижня. Використовуючи цей узагальнений метод, ймовірність виходу з ладу оболонок твелів у всьому ядрі може бути значно знижена.

Беручи до уваги, що максимальна лінійна швидкість тепла (ЛШТ) паливних елементів є головним фактором, що визначає $\omega(t)$, величиною $\omega(t)$ можна керувати насамперед шляхом оптимізації:

- режиму навантаження реактору типу ВВЕР;
- перестановки паливних збірок в ядрі.

Таким чином, на основі методу СЕТ можна запропонувати інноваційну технологію контролю герметичності оболонок твелів реактору типу ВВЕР, що включає контроль параметрів, які визначають дозу радіоактивного витоку через оболонки твелів у ланцюг реактора за нормальних робочих умов (дивись Рисунок 1).

Метод СЕТ для контролю властивостей ядерного палива на основі використання теорії повзучості дозволяє поліпшити баланс ефективності під час експлуатації реакторів ВВЕР за допомогою мінімізації максимальних і середніх значень параметра пошкодження для оболонок паливних елементів (ПЕ). Цей метод СЕТ є синергічним за своєю природою, оскільки він враховує точну історію завантаження як для паливних збірок

(ПЗ), так і для реактора. Процеси різної природи (нейтронно-фізичні, вироблення та передача тепла, теплогідравлічні, корозійні, повзучі тощо) в ядрі реактора розглядаються одночасно і вивчаються на різних рівнях ієрархії системи.

Як було зазначено в [4, с. 41–42], слід встановити деяку додаткову експериментальну програму для виявлення точної залежності витoku радіоактивних речовин через мікротріщини в оболонці палива від $\omega(t)$, а також для перевірки відомих лабораторних результатів у реальних умовах ядра реактору типу ВВЕР-1000. Але основна ідея покращення балансу безпеки та ефективності роботи палива за рахунок мінімізації $\omega(t)$ для оболонок твєлів за методом СЕТ здається цілком обґрунтованою, беручи до уваги і той факт, що метод СЕТ був перевірений на неопромінених тонких трубках, виготовлених з різних сплавів, у термічних та механічних умовах, близьких до реальних умов ядра, а також на основні переваги моделі СЕТ порівняно з розрахунковою моделлю для оцінки $\omega(t)$ з використанням нормативного критерію SC4.

Розглянемо процедуру оптимізації продуктивності палива ВВЕР-1000 за допомогою цільової функції Eff : [7, с. 101]

Крок 1. Слід визначити перелік керованих параметрів $\{c_i\}$, а також скориговані коефіцієнти $\{d_j\}$, що визначають керовані параметри.

Оскільки оптимізація режимів завантаження реакторів та режимів перестановки паливних збірок повинна здійснюватися з урахуванням безпеки та економічних вимог одночасно, цілком зрозуміло, що цільова функція включає параметри деформаційного пошкодження оболонок

твєлів (ω), глибину вигорання ЯП (B) і аксіальний офсет (АО). Отже, враховуючи (1) завантаження реактора та (2) оптимізацію перестановки паливних збірок, набір керованих параметрів, що входять до цільової функції, становить: (1) $\{c_1 = \omega, c_2 = B, c_3 = AO\}$ та (2) $\{c_1 = \omega, c_2 = B\}$.

Оскільки максимальна лінійна швидкість теплової енергії паливних елементів є головним фактором, що визначає значення параметра пошкодження оболонок твєлів, ключовим змінним коефіцієнтом, який слід скорегувати для покращення балансу ефективності експлуатації палива та оптимізації продуктивності палива, є q_i^{max} , тобто $d \equiv q_i^{max}$.

Крок 2. Враховуючи безпеку палива та економічні вимоги, для кожного c_i визначаються оптимальні коефіцієнти c_i^{opt} та граничні значення c_i^{lim} , так що допустимі значення для c_i лежать в інтервалах:

$$c_i^{lim} \leq c_i \leq c_i^{opt} \text{ або } c_i^{opt} \leq c_i \leq c_i^{lim} \quad (1)$$

Переписавши $c_i, c_i^{opt}, c_i^{lim}$ в безрозмірному вигляді:

$$c_i^{lim,*} \leq c_i^* \leq c_i^{opt,*} = 1 \quad (2)$$

Цільова функція Eff для контролю властивостей паливного реактора записана у формі:

$$Eff = 1 - L / L^{lim}, \quad (3)$$

де

$$L = \sqrt{\sum_{i=1}^n (1 - c_i^*)^2}; \quad L^{lim} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (1 - c_i^{lim,*})^2}, \quad (4)$$

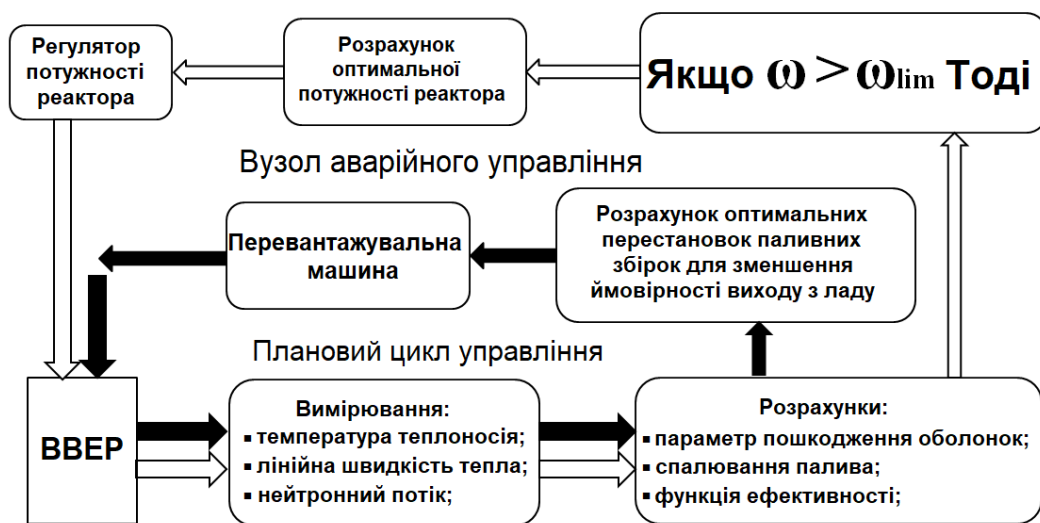


Рис. 1. Принципова схема контролю герметичності оболонок твєлів у ВВЕР

коли $n_i = 3$ та 2 для завантаження реактора та оптимізації перестановки паливних елементів відповідно.

Метод побудови рівнянь для c_i , c_i^{opt} , c_i^{lim} ґрунтується на таких вимогах:

– якщо параметри проектування / експлуатації реактора та палива такі, що виконується умова:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_i = c_i^{opt} \text{ для будь-яких } i, \\ \text{тобто } \omega = \omega^{opt}, B = B^{opt} \text{ та } AO = AO^{opt}, \end{array} \right. \quad (5)$$

тоді умова керованих параметрів, переписаних у безрозмірному вигляді, також виконується:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_i^* = c_i^{opt,*} = 1 \text{ для будь-яких } i, \\ \text{тобто } \omega^* = \omega^{opt,*} = 1, B^* = B^{opt,*} \\ = 1 \text{ та } AO^* = AO^{opt,*} = 1, \\ Eff = Eff^{max} = 1. \end{array} \right. \quad (6)$$

Отже, Eff максимальний, тому задача оптимізації вирішена;

– якщо для керованого параметра c_i умова $c_i^* < c_i^{lim,*}$ виконується, то цей керований параметр дає негативний внесок у загальну ефективність Eff ;

– перевага одного набору параметрів проектування / експлуатації палива перед іншим визначається шляхом узагальнення переваг, заданих контрольованими параметрами c_i .

Крок 3. Оптимізація продуктивності палива за допомогою прийнятої цільової функції Eff .

Результати: Такі методи контролю потужності ВВЕР-1000 були розглянуті далі:

– середня температура теплоносія в ядрі є постійною: $\langle tW \rangle = \text{const}$ (метод I);

– тиск пари на вході другого контуру є постійним: $p_2 = \text{const}$ (метод II);

– температура теплоносія на вході в ядро є постійною: $tW_0 = \text{const}$ (метод III).

Враховуючи 4-річну паливну кампанію, стабільність основного нейтронного потоку була вивчена для добового циклу навантаження: $\{N = 100\%; 80\%; 100\%\}$, де N – теплова потужність реактора. Приймаючи обмежувальну умову $AO^{lim} = 0,05$, допустиму тривалість маневрування основної потужності вивчали для трьох методів управління потужністю за допомогою програми «Реакторний симулятор» [8, с. 560–561]. Було встановлено, що для методів I, II та III АО залишався стабільним протягом 7, 1 та 6 місяців відповідно. Це означає, що при $N = 100\%$ та 80% величина зміни АО залишалася у допустимих межах $[-5; 2.5]$ та $[-5; 4]$ відповідно.

Інші компоненти цільової функції (ω) та (B) для методів I, II та III були знайдені за допомо-

гою програми “Femaxi”. Тоді завдання оптимізації способу управління потужністю реактора було вирішено для 4-річної паливної кампанії шляхом пошуку екстремуму цільової функції (3), написаного у спрощеному вигляді, описаному в [3, с. 122–123]. Враховуючи добовий цикл навантаження $\{N = 100\%; 80\%; \text{На } 100\%\}$, були досліджені такі алгоритми навантаження реактора під час 4-річної кампанії:

Алгоритм 1. $N = \text{var}$ за 2 місяці, $N = \text{const}$ за 10 місяців.

Алгоритм 2. $N = \text{var}$ за 3 місяці, $N = \text{const}$ за 9 місяців.

Алгоритм 3. $N = \text{var}$ за 4 місяці, $N = \text{const}$ за 8 місяців.

Алгоритм 4. $N = \text{var}$ за 5 місяці, $N = \text{const}$ за 7 місяців.

Алгоритм 5. $N = \text{var}$ за 6 місяці, $N = \text{const}$ за 6 місяців.

Оптимальна кількість перевантажень між методами управління потужністю I та III становила 38, 65, 69, 75 та 107 для алгоритмів навантаження 1, 2, 3, 4 і 5 відповідно [3, с. 130–132].

Автоматизована система контролю властивостей паливного реактора включатиме як елементи стандартного обладнання блоку ВВЕР-1000, так і деякі додаткові елементи, необхідні для автоматизованих перемикачів між режимами завантаження реактора та режимами перестановки паливних збірок – дивись Рисунок 2.

Перспективна автоматизована система контролю властивостей палива ВВЕР-1000 матиме такі елементи та об’єкти управління:

– активне зона реактора ВВЕР, вона містить 163 тепловиділяючі збірки (ТВЗ), кожна ТВЗ включає 312 тепловиділяючих елементів (ТВЕЛів). Отже, загальна кількість твелів у ядрі вище 50 000. Згідно з правилами безпеки ядро в нормальних умовах експлуатації може містити не більше 500 оболонки тепловиділяючих елементів, що мають витік радіоактивних речовин, тоді як прямий контакт паливо-теплоносія допускається лише для 50 оболонки [5, с. 5–6].

– датчики ядра (ДЯ) використовуються в автоматизованій системі, що контролює властивості палива для вимірювання температури теплоносія та значення нейтронного потоку, необхідних для імітаційної моделі.

– Шафа керування (ШК) використовуються для перетворення значень фізичних параметрів, отриманих від датчиків ядра, в електричні сигнали, що надсилаються на низькорівневі та високорівневі апарати системи основних приладів.

– обладнання низького та високого рівня вбудованої системи приладів (ОСП) призначене для обробки інформації, отриманої від ШК, та відправлення її в основний пульти управління, для використання її операторами реакторів. ОСП включає інформаційно-вимірювальне обладнання та програмне забезпечення спеціального призначення.

– імітаційна модель для оптимізації продуктивності палива (ІМ) включає в себе модель СЕТ для розрахунку параметрів пошкодження оболонок твелів на основі синергічного методу СЕТ, а також критерійну модель, яка одночасно враховує вимоги безпеки та економічності. Оптимізаційні розрахунки проводяться за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (“Reactor Simulator”, “Femaxi” тощо).

– компаратор даних (КД) призначений для періодичного аналізу поточних значень параметрів пошкодження обшивки $\omega(\tau)$ та порівняння їх з відповідними заздалегідь визначеними граничними значеннями $\omega^{lim}(\tau)$. Якщо значення $\omega(\tau)$ занадто близьке до $\omega^{lim}(\tau)$, тоді починається процедура оптимізації завантаження реактора.

– блок оптимізації завантаження реактора (ОЗР) – це блок, що обчислює цільову функцію оптимізації завантаження реактора, щоб значення параметрів пошкодження оболонок твелів не могли перевищувати їх граничних значень. Потужність реактора змінюється, впливаючи борну

кислоту в активне зону. Об’єм борної кислоти, необхідний для зміни потужності реактора, також розраховується в ОЗР.

– пункт керування (ПК) – це місце, де оператори забезпечують нормальну експлуатацію реакторного блоку на основі поточної інформації про технологічні параметри.

– виконавчий механізм (ВМ), що використовується для зміни потужності реактора, є електромагнітним клапаном.

– блок оптимізації перестановки палива (ОПП) – це блок, що обчислює цільову функцію оптимізації перестановки ТВЗ, щоб значення параметрів пошкодження оболонок не могли перевищувати їх граничних значень.

– блок оптимізації роботи перевантажувальної машини (ОРМ) – це блок, що обчислює алгоритм роботи перевантажувальної машини.

– панель управління перевантажувальної машини (ПУМП) призначена для надання інформації про алгоритми перестановки ТВЗ та алгоритмів роботи автомата на перевантажувальній машині.

– перевантажувальна машина (МП) здійснює перестановку паливних елементів у ядрі.

Висновки. Для покращення балансу безпеки та ефективності під час експлуатації реакторів ВВЕР запропоновано новий підхід до мінімізації витоку радіоактивних речовин у ланцюг ВВЕР при нормальних робочих умовах, заснований на мінімізації параметра пошкодження оболонок

паливних елементів та використанні методу СЕТ. Пояснено процедуру оптимізації продуктивності палива ВВЕР-1000 з використанням цільової функції, що забезпечує збалансованість безпеки та ефективності роботи палива. Запропонована автоматизована система контролю властивостей паливного реактора з урахуванням параметра деформаційного пошкодження оболонок твелів, глибини вигорання ЯП і аксіального офсету. Обговорювались склад та структура цієї перспективної автоматизованої системи, що мінімізує витік радіоактивних речовин у ланцюг реактора за нормальних робочих умов, заснованих на мінімізації параметра пошкодження оболонок твелів та використанні синергічного методу СЕТ.

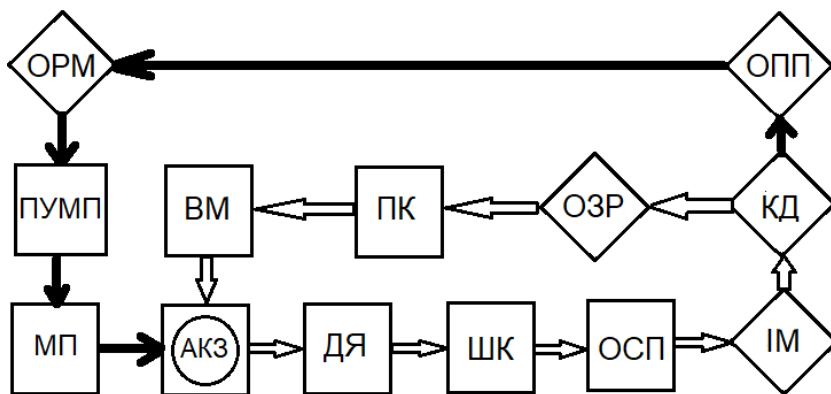


Рис. 2. Структурна схема автоматизованої системи контролю властивостей палива ВВЕР-1000: АКЗ – це активна зона ядерного реактору; ДЯ – це датчики ядра; ШК – це шафа керування; ОСП – це обладнання низького та високого рівня вбудованої системи приладів; ІМ – імітаційна модель для оптимізації продуктивності палива; КД – це компаратор даних для аналізу значень параметрів пошкодження оболонок твелів; ОЗР – це блок, що обчислює цільову функцію для оптимізації завантаження реактора; ПК – це пункт керування; ВМ – це виконавчий механізм для зміни потужності реактора; ОПП – це блок, що обчислює цільову функцію оптимізації перестановки палива; ОРМ – це блок для оптимізації роботи перевантажувальної машини; ПУМП – це панель управління перевантажувальною машиною; МП – це перевантажувальна машина

Список літератури:

1. Pelykh S.N., Zhou H., Maksimov M.V. Minimizing the radioactive leakage into the reactor circuit under extreme conditions of normal operation. European Commission funded International Workshop Materials resistant to extreme conditions for future energy systems 12-14 June 2017. Kyiv : Ukraine, Book of Abstracts, 2017. P. 83
2. Review of fuel failures in water cooled reactors. IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-2.1. Vienna : International Atomic Energy Agency. 2010. P. 191
3. Zhou H., Pelykh S.N., Odrekhovska I.O., Maksymova O.B. Optimization of power control program switching for a VVER-1000 under transient operating conditions. Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Vacuum, Pure Materials and Super-conductors. 2018. № 1(113). P. 218–222.
4. Pelykh S.N., Frolov M.A., Nalyvayko A.V., Zhou H. The problem of minimizing the radioactive leakage into the VVER circuit under normal conditions Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi. 2017. №2(52). P. 39–44.
5. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций НП-082-07. М. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2008. С. 21
6. Pelykh S.N, Maksimov M.V., Nikolsky M.V. A method for minimization of cladding failure parameter accumulation probability in VVER fuel elements. Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. 2014. № 4. P. 108–116.
7. Сузуки М. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения. Одесса : Астропринт, 2010. С. 248.
8. Филимонов П.Е., Мамичев В.В., Аверьянова С.П. Программа «Имитатор реактора» для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000. *Атомная энергия*. 1998. № 6. С. 560–563.
9. Beglov K.V., Tsiselskaya T.A. A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control. Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi. 2012. №1(38). P. 99–106.

Tereshchenko D.O., Pelykh S.N. RESEARCH NUCLEAR FUEL PROPERTIES IN A VVER-1000 REACTOR DURING A CAMPAIGN AND A COMPUTER-INTEGRATED SYSTEM CONTROLLING THE FUEL PROPERTIES

The object of the study is the conditions for the development of an automated control system to minimize radioactive leaks into the VVER circuit under normal operating conditions, by optimizing the modes of reactor loading and permutations of the fuel assemblies. An automated system for controlling the properties of the nuclear fuel of the VVER-1000 reactor is offered, taking into account the fuel cladding damage parameter, burnup and axial offset. Aim: development of bases for improvement of balance of efficiency of safety of operation of reactors of type VVER, new approach to minimization of leakage of radioactive substances in the VVER circuit under normal operating conditions, based on minimization of the damage parameter of fuel claddings is proposed; development of the foundation of the automated system of control of fuel properties of the VVER-1000 reactor in order to ensure the balance of safety and fuel efficiency. Presenting main material: The synergistic nature of the SET method developed to control the properties of nuclear fuel will be explained. We describe two main methods for maintaining the balance of fuel efficiency of the VVER-1000 reactor and provide the corresponding objective functions. The technology of control of the tightness of fuel cladding of the reactor type VVER is proposed, which includes the control of parameters that determine the dose of radioactive leakage through microcracks of fuel claddings into the reactor circuit under normal operating conditions; a new method of parameter control that determines the volume of radioactive leakage into the first circuit through the microcracks of fuel claddings, under normal conditions of reactor operation, optimization of modes of loading and permutations fuel assembly of the reactor based on the objective function, taking into account the fuel cladding damage parameter, burnup and axial offset. Results: the conditions for the development of an automated control system for minimizing radioactive leaks into the VVER circuit under normal operating conditions are shown by optimizing the reactor loading mode and permutations of the fuel assemblies. The composition and structure of the automated system for controlling the fuel properties of the VVER-1000 reactor which provides a balance between the safety and the cost-effectiveness of nuclear fuel operation is proposed.

Key words: *automated control system, VVER-1000 reactor, software tool, fuel cladding, damage parameter, radioactive leakage minimization, damage parameter.*