

УДК 681.51

Бойко О.В.

Одеський національний політехнічний університет

Пелих С.В.

Одеський національний політехнічний університет

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМОМ НАВАНТАЖЕННЯ РЕАКТОРНОЇ УСТАНОВКИ З ВВЕР-1000 З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРА ДЕФОРМАЦІЙНОГО ПОШКОДЖЕННЯ ОБОЛОНОК ТВЕЛІВ

Атомна енергетика сьогодні посідає перше місце з вироблення енергоресурсу. Безперервно збільшується кількість енергії, що виробляється атомними енергетичними станціями (АЕС). У зв'язку з цим все більш актуальним стає питання створення систем управління, які одночасно досягали б максимально ймовірної безпеки та економічності (мінімального параметру пошкодженості оболонок ТВЕЛів та максимальної глибини вигорання палива відповідно).

Національна програма розвитку енергетичної галузі України визначає збільшення частки виробітку електроенергії на АЕС до 60%. Крім того, виникає необхідність адаптації діючих і запланованих до будівництва енергоблоків АЕС до специфічних умов роботи в сучасних і перспективних енергосистемах.

Ключові слова: тепловидільний елемент (ТВЕЛ), атомна електрична станція (АЕС), автоматизація, активна зона (АКЗ), передавальна функція.

Постановка проблеми. Все більш актуальним стає питання створення систем управління, які одночасно досягали б максимально ймовірної безпеки та економічності (мінімального параметру пошкодженості оболонок ТВЕЛів та максимальної глибини вигорання палива відповідно).

У проектах РУ IV покоління підвищені енергонапруженість активної зони (АКЗ), тривалість кампанії і глибина вигорання ядерного палива, що значно збільшує ризик виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації. Головним чинником, що обмежує підвищення цих показників, є довговічність оболонок ТВЕЛів [1, с. 46].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В публікації [7, с. 1–7] показана необхідність і умови розробки автоматизованої системи управління для мінімізації радіоактивних протікань в контур ВВЕР за нормальних умов експлуатації шляхом оптимізації режиму навантаження реактора та перестановок ТВЗ [7, с. 1].

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка теоретичних і технологічних основ експлуатації ТВЕЛів реактора з урахуванням накопиченої в нормальних умовах пошкодженості їх оболонок для досягнення економічної експлуатації ТВЕЛів за умов їх безпечної роботи в нормальних умовах. Тому завданням цієї публікації є:

– аналіз моделей та методів розрахунку зміни властивостей ТВЕЛу й умов руйнування його оболонки;

– розробка математичної моделі зміни властивостей ТВЕЛу, що враховує основний процес накопичення пошкодженості його оболонки і параметри, що визначають пошкодженість;

– розробка методу розрахунку пошкодженості оболонок ТВЕЛів в нормальних умовах експлуатації з урахуванням основного процесу накопичення пошкодженості і визначення параметрів пошкодженості оболонок;

– розробка принципової схеми АСУ;

– розробка методів управління конструкційними параметрами ТВЕЛа і температурним режимом теплоносія, що враховують пошкодженість оболонок твелів, баланс безпеки та економічності експлуатації твелів;

– розробка методів управління режимом навантаження і властивостями твелів, що враховують глибину вигорання палива та пошкодженість оболонок твелів, баланс безпеки та економічності експлуатації ТВЕЛів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Реактор ВВЕР-1000 є водо-водяним енергетичним реактором корпусного типу і представляє собою вертикальну циліндричну посудину з еліптичним дном. Розміщення патрубків двурядне, внутрішня частина і частина фланця та кришки покриті

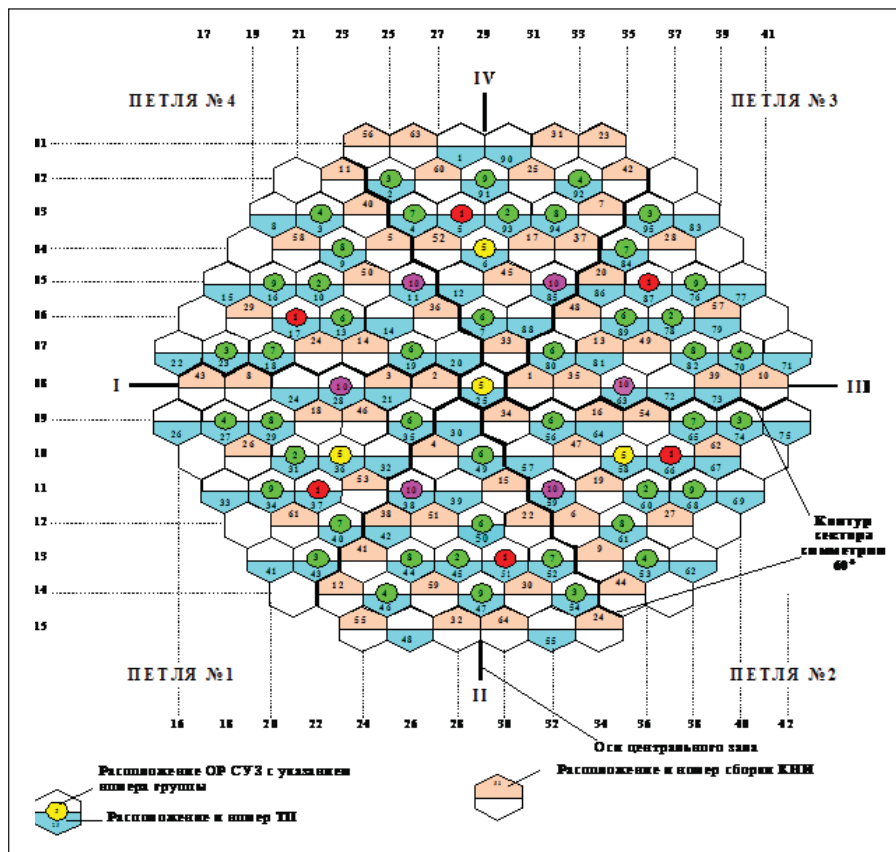


Рис. 1. Картограма активної зони

антикорозійною наплавкою. Корпус реактора зверху закритий кришкою з установленими на ній приводами механізмів СУЗ. За принципом роботи ВВЕР-1000 є гетерогенним ядерним енергетичним реактором корпусного типу на теплових нейтронах. Теплоносієм та сповільнювачем в реакторі є хімічно знесолена вода з борною кислотою, концентрація якої змінюється в процесі експлуатації.

Під час проходження через активну зону теплоносії нагрівається через реакцію поділу ядерного палива.

Теплоносії поступає в реактор через чотири нижніх входних патрубків корпусу, проходить вниз по кільцевому зазору між корпусом та шахтою, далі через перфороване еліптичне днище та опорні труби шахти входить в ТВЗ, з яких складається активна зона. З ТВЗ через перфоровану нижню плиту блока захисних труб (БЗТ) теплоносії виходить в міжтрубне середовище, в кільцевий зазор між шахтою та корпусом та через чотири верхні вихідні патрубків корпусу виходить з реакторів [1, с. 60].

Активна зона призначена для генерації тепла і передачі його з поверхні ТВЕЛів теплоносія першого контуру (рис. 1).

Активна зона реактора належить до пристроїв нормальної експлуатації і до першої категорії сейсмостійкості.

Для режимів порушення умов нормальної експлуатації встановлена межа безпечної експлуатації твєлів: за кількістю та величиною дефектів ТВЕЛ становить 1% ТВЕЛів з дефектами типу газової нещільності і 0,1% ТВЕЛів, для яких наявний прямий контакт теплоносія ядерного палива.

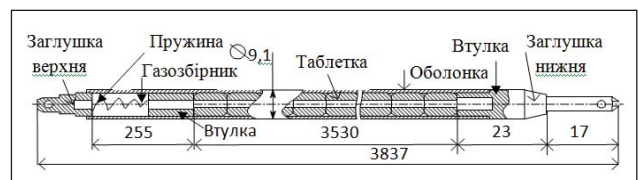


Рис. 2. Конструкція та габаритні розміри ТВЕЛа

Критерієм допустимості встановлених меж пошкодження ТВЕЛів є величина активності води першого контуру.

Експлуатаційною межею обрано значення сумарної питомої активності радіонуклідів йоду 131–135 в теплоносії I контуру $3,7 \times 10^7$ Бк/кг ($1,0 \times 10^{-3}$ Ку/кг).

Межею безпечної експлуатації є максимальна сумарна питома активність радіонуклідів йоду 131–135 в теплоносії I контуру 1,85x108 Бк/кг (5x10-3 Ку/кг) [5, с. 160].

Донедавна для реакторів ВВЕР-1000 проекту В-320 застосовувалися ТВЗ з урановим паливом, поглинаючим матеріалом в ПС СУЗ був карбід бору В4С (тип ПС СУЗ 0401.01.04.000), вигоряючими поглиначами були стрижні СВП, що містять CrB₂ + Al – диборид хрому в алюмінієвій матриці. Сьогодні з'явилися нові види паливних касет (типи касет 0401.12.00.000 і 496.00.000 з уран-гадолієвим паливом) і ПС СУЗ (типи ПС СУЗ 0401.12.04.000 і 496.00.070). Наведемо характеристики типів касет, типів ПС СУЗ, пучків СВП.

Касети з уран-гадолієвим паливом, на відміну від касет з урановим паливом, містять 312 ТВЕЛів і 6 так званих твегів, розташованих по краях ТВЗ. Твеги – це паливні елементи, де як паливо використовується суміш діоксиду урану (UO₂) та оксиду гадолінію (Gd₂O₃). Вміст оксиду гадолінію в суміші становить 5 ± 2%. Під час використання в активній зоні реактора касет з уран-гадолієвим паливом не застосовуються пучки СВП – вигоряючим поглиначем слугує гадоліній, який знаходиться прямо в паливі. Це знижує вартість і час проведення ТТО з перевантаженням палива. Крім того, стрижні СВП (CrB₂ + Al – диборид хрому в алюмінієвій матриці) спотворюють поле енерговиділення по радіусу ТВЗ. Використання в активній зоні реактора касет з уран-гадолієвим паливом дозволяє істотно вирівняти поле енерговиділення по радіусу ТВЗ.

Нові ПЗ СУЗ типу 0401.12.04.000 і 496.00.070 мають ту ж поглинаючу здатність, що застосовувалася раніше (300 мм в нижній частині займає титанат диспрозія Dy₂O₃ • TiO₂). Під час процесу вага кластера збільшується на 2,5 кг – з 16 кг до 18,5 кг. Застосування обважнених кластерів дозволить скоротити час падіння ОР СУЗ на нижні вимикачі за спрацьовування аварійного захисту (згідно з вимогами, цей час не повинен перевищувати 4 секунди). Передбачається також використовувати в нижній частині ПЗ СУЗ як навантажувач гафній (Hf). Вага такого кластера становитиме 21,2 кг.

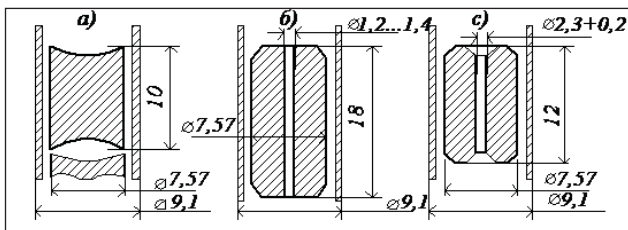


Рис. 3. Паливна таблетка

Спочатку паливні таблетки не мали отворів всередині, їх діаметр становив 7,53 мм, а висота 10 мм (рис. 3-а) Потім збільшилася висота паливних таблеток до 18 мм (рис. 3-б), всередині з'явився отвір для зниження температури діаметром 1,4 мм (рис. 3-б). Подальша еволюція палива привела до наступних змін:

- знижена висота паливної таблетки (до 12 мм) (рис. 3-с);
- збільшено діаметр внутрішнього отвору таблетки (з 1,4 мм до 2,2 мм);
- у таблетках виконана внутрішня фаска (рис. 3-с);
- збільшена щільність палива;
- виконано напилення на внутрішню поверхню ТВЕЛ;
- збільшено початковий газовий обсяг під ТВЕЛ з 18 см³ до 30,5 см³;
- збільшено тиск гелію всередині ТВЕЛа з 2x10⁵ Па до 22x10⁵ Па.

Розглянемо вплив цих змін на міцнісні й механічні характеристики палива і оболонки ТВЕЛ.

Збільшення висоти таблетки значно знижує в нормальних умовах експлуатації частку виходу під оболонку ТВЕЛ газоподібних і летючих продуктів поділу палива. Так, при T_{UO₂} < 1690°C, шляхом зниження сумарної площі поверхні таблеток, ця частка зменшується з 5% до 2%. Однак це пред'являє більш жорсткі вимоги до швидкості зміни навантаження РУ через можливість розтріскування паливних таблеток по висоті.

Використання збільшеного діаметру внутрішнього отвору:

- знижує акумульовану теплоємність палива;
- знижує внутрішні температурні напруження і деформації в паливі;
- збільшує допустимі глибини вигорання.

Використання в таблетках внутрішньої фаски знижує ймовірність виникнення точкових контактних напружень між оболонкою і паливом внаслідок розтріскування таблеток.

Зниження щільності палива полегшує накопичення газоподібних продуктів поділу в керамічній матриці без виходу їх під оболонку ТВЕЛ за практично незмінного коефіцієнта теплопровідності палива.

Напилення чистого цирконію на внутрішню поверхню ТВЕЛ знижує небезпеку хімічної корозії під напругою на кордоні цирконій-ніобієвих зерен з боку агресивних продуктів поділу палива (I, Cd, Cs та інші). Шляхом поступового утворення плівки діоксиду цирконію ZrO₂, що створюється в процесі взаємодії чистого цирконію з вивільненого палива з киснем, і є абсолютно стійкою до

агресивних летючих продуктів поділу до температур 800°C. У цьому разі необхідний якийсь час для поступового окислення чистого цирконію, протягом якого, проте, не відбувається руйнування основної оболонки. Наявність захисної плівки ZrO_2 також дозволяє більш ефективно й досить довго утримувати напрацьовані аніони йоду до утворення ними з катіонами цезію з'єднання CsI – який вже є небезпечним для оболонки [2, с. 55].

Збільшення початкового вільного газового обсягу під ТВЕЛ з 18,0 см³ до 30,5 см³ значно полегшує накопичення легких продуктів розподілу (за 100% потужності РУ вільний об'єм становить 21,8 см³), особливо за умови збільшеного початкового тиску гелію, що знижує максимально досягнений тиск під ТВЕЛ наприкінці кампанії палива.

Збільшення тиску гелію всередині ТВЕЛа:

- покращує теплопровідність газового шару;
- зменшує можливість різких контактів оболонка / паливо;
- зменшує локальні згини оболонки під розбухання палива;
- зменшує точкові напруги від розтріскуючих таблеток шляхом загального растягуючого тиску;
- усуває ефект «наповзання» оболонки під час гідровипробувань І контуру (коли під дією тиску відбувається деформація оболонки ТВЕЛа за формою паливних таблеток).

До того ж більш високі рівні тиску під ТВЕЛом в кінці їхньої кампанії компенсуються збільшенням вільного газового об'єму.

Необхідна нам система автоматизованого керування має одночасно забезпечувати економічну та безпечну експлуатацію реакторної установки. Для зручності в систему роботи РУ були додані елементи, що забезпечують автоматизоване управління режимом навантаження, зокрема такі, як Імітаційна модель; блок порівняння параметрів деформаційної пошкодженості; блок розрахунку критерію ефективності; блок вибору режиму навантаження; виконуючий механізм [3, с. 110].

Створена система управління забезпечує автоматичне керування режимом навантаження РУ з реактором типу ВВЕР-1000 згідно з виданим завданням. На рисунку 4 представлена схема АСК режимом навантаження РУ з реактором типу ВВЕР-1000 з урахуванням параметру деформаційної пошкодженості оболонок твєлів.

Розроблена АСУТП передбачає контроль величини пошкодженості твєлів не залежно від паливного циклу. Величина пошкодженості фіксується в потрібний нам момент. Розроблене програмне

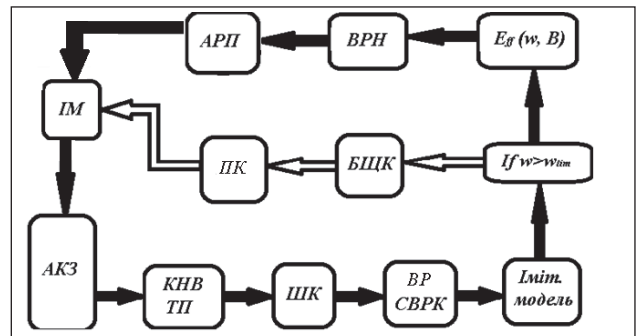


Рис. 4. Структурна схема АСК режимом навантаження, де АКЗ–активна зона реактора, ТП–термопара, КНВ–канал нейтронний вимірюючий, СВРК–система внутрішньореакторного контролю, ВРН–вибір режиму навантаження, БЩК–блочний щит керування, ПК–пульт керування, АРП–Автоматичне регулювання підсилення, ІМ–виконуючий механізм, $E_g(\omega, B)$ – розроблене програмне забезпечення, $I_f(\omega > \omega_{lim})$ – розроблене програмне середовище, Іміт. модель. – імітаційна модель, ШК – шафи кросові

забезпечення аналізує перевищення поточної величини пошкодженості та порівнює з допустимими нормами безпечної експлуатації. Отримані значення відображаються на БЩУ, це дає можливість головному інженеру управління реактором слідкувати за нормами пошкодженості твєлів та у разі перевищення значення пошкодженості за допомогою АРП понизити потужність реактора, тим самим зменшити значення пошкодженості. Цей контроль запобігає розгерметизації твєлів, яка може призвести до повної зупинки всієї ядерної енергетичної установки. Отже, розроблена АСУТП передбачає безпечну та економічну експлуатацію [4, с. 88].

Висновки. Практична цінність отриманих результатів полягає в безпечній експлуатації твєлів легко-водяного реактора, яка дозволяє враховувати накопичену в нормальних умовах експлуатації РУ пошкодженість оболонок твєлів; розширити межі і підвищити економічність експлуатації РУ; розробити регламент й автоматизований програмно-технічний комплекс керування властивостями твєлів на стадіях проектування та експлуатації РУ з урахуванням пошкодженості оболонок, балансу безпеки та економічності експлуатації.

У теоретичній частині роботи розглянуті процеси та технічне обладнання, яке бере участь в управлінні перестановками ТВЗ та контролю параметрів активної зони реактора типу ВВЕР–1000.

У проектній частині розроблена автоматизована система управління технологічним проце-

сом експлуатації твєлів легко-водяного реактора з урахуванням накопиченої в нормальних умовах пошкоженості їх оболонок для підвищення еко- номічної ефективності експлуатації твєлів шляхом управління їх властивостями за дотримання вимог безпеки.

Список літератури:

1. Pelykh, S.N., Maksimov M.V., Ryabchikov S.D. The prediction problems of VVER fuel element cladding failure theory. Nuclear Engineering and Design. Vol. 302, Part A, (June). 2016. P. 46–55.
2. Pelykh, S.N., Parks G.T., Maksimov M.V. A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup. Nuclear Engineering and Design. Vol. 257, № 4. 2013. P. 53–60.
3. Pelykh, S.N., Nikolsky M.V., Maksimov 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. Iss. 4. 2014. P. 108–116.
4. Стефанік В.М. Комп'ютерно-інтегрована система управління перестановками ТВС в АКЗ ВВЭР-1000 с учетом поврежденности оболочек твэлов. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. Vol. 8, № 1. 2016. С. 83-89.
5. Пельх С. Н. Основы управления свойствами твэлов ВВЭР. Саарбрюккен, 2013. 160 с.
6. Пелих С.М., Фролов М.О., Наливайко А.В., Хуїю Чжоу. Проблема мінімізації радіоактивних протікань в контур ВВЭР за нормальних умов експлуатації. Праці Одеського політехнічного університету. Вип. 2 (52). Одеса, 2017. С.1-7.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ НАГРУЗКИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ВВЭР-1000 С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРА ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ

Атомная энергетика занимает первое место по выработке энергоресурса в настоящее время. Непрерывно увеличивается количество энергии, вырабатываемой атомными энергетическими станциями (АЭС). В связи с этим все более актуальным становится вопрос создания систем управления, которые одновременно достигали бы максимально возможной безопасности и экономичности (минимального параметра поврежденности оболочек ТВЭЛов и максимальной глубины выгорания топлива соответственно).

Национальная программа развития энергетической отрасли Украины определяет увеличение доли выработки электроэнергии на АЭС до 60%. Кроме того, диктуется необходимость адаптации действующих и планируемых к строительству энергоблоков АЭС к специфическим условиям работы в современных и перспективных энергосистемах.

Ключевые слова: *тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ), атомная электростанция (АЭС), автоматизация, активная зона (АКЗ), передаточная функция.*

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF AUTOMATED SYSTEM OF MANAGEMENT OF LOADING MODE OF REACTOR INSTALLATION WITH VVER-1000 WITH TAKING OF THE PARAMETER OF DEFORMATION DAMAGE OF ENVELOPES OF HEAT-CONDUCTING ELEMENTS

Atomics is at ranks first to produce energy at the present time. The amount of energy produced by nuclear power plants (NPPs) is continuously increasing. In connection with this, the issue of creating control systems that simultaneously achieve the most probable safety and economy (the minimum parameter of damage to the envelopes of fuels elements and the maximum depth of fuel burn, respectively) is becoming more and more actual.

The National Program for the Development of the Energy Industry of Ukraine determines the increase of the share of power generation at the NPP to 60%. In addition, the necessity of adapting existing and planned NPP power units to the specific conditions of work in modern and perspective power systems is dictated.

Key words: *heat-conducting element (HCE), atomic power station (NPP), automation, active zone(AZ), transfer function.*