

УДК 621.039

Аналіз безпеки при диверсифікації ядерного палива
Анализ безопасности при диверсификации ядерного топлива
Analysis of safety at nuclear fuel diversification

Науковий керівник - кафедра атомних електричних станцій; професор, доктор
технічних наук - Скалозубов В. І., магістр - Сергієнко Е. Д.

Научный руководитель – кафедра атомных электрических станций; профессор,
доктор технических наук – Скалозубов В. И., магистр – Сергиенко Е. Д.

Scientific Supervisor - Department of Nuclear Power Plants; Professor, Doctor of
Technical Sciences - Skalozubov V. I., Master - Sergienko E. D.

Анотація. Метою даної роботи є проведення аналізу досвіду диверсифікації ядерного палива для реакторів типу ВВЕР і дати обґрунтування безпеки диверсифікації проектних тепловиділяючих збірок тепловиділяючими збірками в компанії Westinghouse.

Ключові слова: активна зона, водо-водяний енергетичний реактор, запроектна аварія, захисна оболонка, тепловиділяюча збірка альтернативної конструкції, тепловиділяючий елемент, турбогенератор.

Аннотация. Целью данной работы является проведение анализа опыта диверсификации ядерного топлива для реакторов типа ВВЭР и дать обоснование безопасности диверсификации проектных тепловыделяющих сборок тепловыделяющими сборками в компании Westinghouse.

Ключевые слова: активная зона, водо-водяной энергетический реактор, запроектная авария, защитная оболочка, тепловыделяющая сборка альтернативной конструкции, тепловыделяющие элементы, турбогенератор.

Annotation. The purpose of this work is to analyze the experience of diversification of nuclear fuel for WWER type reactors and to substantiate the safety of diversification of design fuel assemblies with fuel assemblies at Westinghouse.

Key words: core, water-water power reactor, beyond design basis, protective shell, fuel assembly of alternative design, fuel element, turbogenerator.

Основним постачальником ядерного палива європейських і українських АЕС з ВВЕР є Росія. Однак досвід інших ядерних ринків показує, що монополізація поставок і зберігання ядерного палива негативно впливає як на забезпечення безпеки, так і на забезпечення конкуренції для поліпшення технологій і економічності [1]. Крім того, є позитивний досвід змішаного завантаження активної зони реактора ядерним паливом різних постачальників.

Транснаціональна Westinghouse Electric Company має багаторічний досвід поставок ядерного палива для різних типів реакторів і є перспективним постачальником альтернативного палива для ВВЕР (в тому числі і для України). Всеодно питання безпеки при використанні паливних збірок компанії Westinghouse є головним питанням на сьогодні.

Аналіз безпеки при диверсифікації ядерного палива експрес методом. Метод експрес-аналізу ядерної безпеки заснований на визначенні з необхідним рівнем консерватизму оперативних розрахункових оцінок впливу модернізацій активної зони реактора на здійсненність умов безпеки по гранично допустимим температур оболонки твєлів і ядерного палива в відношенні проектного стану без залучення додаткового моделювання аварійних процесів детерміністськими кодами.

Експрес-метод заснований на двозонним енергетичної моделі ядерного палива

твелів, що враховує температурну радіальну нерівномірність в твелах, [10, 12, 36]:

- центральна зона паливної матриці з максимальною температурою T_{tm} ;
- периферійна зона паливної матриці зі значним градієнтом по товщині матриці.

Також консервативно покладається, що потужність тепловиділення всієї паливної матриці масою M_T визначається максимальною температурою T_{tm} .

Тоді рівняння збереження енергії для твела може бути представлено у вигляді

$$M_T \frac{d}{dt}(C_T T_{tm}) = N_T M_T - \alpha_0 (T_{tm} - T_{th}) \quad (1)$$

при початковому і граничному умовах

$$T_{tm}(t=0) = T_{tm0}, \quad (2)$$

$$\alpha F_{ob}(T_{ob} - T_{th}) = R_T^{-1}(T_{tm} - T_{ob}), \quad (3)$$

де t – поточний час; C_T – питома теплоємність палива; N_T – щільність потужності тепловиділень ядерного палива; R_T – термічний опір твела, наведене на площу поверхні міжфазного теплообміну; T_{ob} , T_{th} – температура оболонки і охолоджуючого теплоносія відповідно; F_{ob} – зовнішня площа поверхні оболонки твела; α – коефіцієнт зовнішньої теплопередачі на поверхні твела.

Приведений коефіцієнт теплопередачі від центральної зони паливної матриці до теплоносія

$$\alpha_0 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha F_{ob}} + R_T}.$$

Для нормальних і аварійних режимів (в тому числі при закритому теплообміні і умовах природної циркуляції) коефіцієнт теплопередачі визначається термічним опором твелів ВВЕР

$$\alpha_0 \approx R_T^{-1}.$$

При цілком обґрунтованому зневажанні термічним опором оболонки термічний опір твела можна представити у вигляді

$$R_T = \frac{\delta_r}{\lambda_r F_r} + \frac{\delta_t}{\lambda_t F_t},$$

де δ_r , δ_t – товщина газового зазору і паливної таблетки відповідно; λ_r , λ_t – показник теплопровідності газу і палива відповідно, для якого консервативно приймаються мінімально можливі значення; F_r , F_t – площа поверхні газового зазору і паливної матриці відповідно.

Після перетворень формул (10) - (12) отримаємо

$$\frac{dT_{tm}}{dt} + K_1 T_{tm} = K_2, \quad (4)$$

$$T_{tm}(0) = T_{tm0}, \quad (5)$$

$$T_{ob} = \frac{T_{tm}}{Nu + 1} + \frac{Nu}{Nu + 1} T_{th}, \quad (6)$$

де при цілком обґрунтованому припущенні $C_T \gg \frac{dC_T}{dT_T} T_T$

$$K_1 = \frac{R_T^{-1}}{C_T M_T}, \quad K_2 = \frac{N_T M_T + R_T^{-1} T_{\text{тн}}}{C_T M_T}, \quad \text{Nu} = \alpha F_{\text{об}} R_T, \quad (7)$$

Nu – модифікований критерій Нуссельта, що відображає ставлення інтенсивності процесів зовнішнього і внутрішнього теплообміну.

У загальному випадку рішення (13), (14) має вигляд

$$T_{\text{тн}} = \left\{ T_{\text{тн}0} + \int_0^t K_2(\tau) \exp \left[\int_0^\tau K_1(\xi) d\xi \right] d\tau \right\} \exp \left[- \int_0^t K_1(\tau) d\tau \right].$$

Показники відмінностей альтернативних («непроектних») і проектних ТВЗ в загальному випадку:

$$\tilde{K}_1 = \frac{K_1(\text{H})}{K_1(\text{П})}; \quad \tilde{K}_2 = \frac{K_2(\text{H})}{K_2(\text{П})}, \quad (8)$$

де H – «непроектні» ТВЗ; П – проектні ТВЗ.

Тоді розбіжності в оцінках максимальної температури ядерного палива і температури оболонок твелів в процесі розвитку аварії для «непроектного» і проектного палива:

$$T_{\text{тн}}(\text{H}) - T_{\text{тн}}(\text{П}) = \left\{ T_{\text{тн}0}(\text{H}) + \int_0^t \tilde{K}_2 K_2(\text{П}, \tau) \exp \left[\int_0^\tau \tilde{K}_1 K_1(\text{П}, \xi) d\xi \right] d\tau \right\} \exp \left[- \int_0^t \tilde{K}_1 K_1(\text{П}, \tau) d\tau \right] - \left\{ T_{\text{тн}0}(\text{П}) + \int_0^t K_2(\text{П}, \tau) \exp \left[\int_0^\tau K_1(\text{П}, \xi) d\xi \right] d\tau \right\} \exp \left[- \int_0^t K_1(\text{П}, \tau) d\tau \right], \quad (9)$$

$$T_{\text{об}}(\text{H}) - T_{\text{об}}(\text{П}) = \frac{T_{\text{тн}}(\text{H})}{\text{Nu}(\text{Hu}+1)} - \frac{T_{\text{тн}}(\text{П})}{\text{Nu}(\text{Pu}+1)} + \left[\frac{\text{Nu}(\text{Hu})}{\text{Nu}(\text{Hu}+1)} - \frac{\text{Nu}(\text{Pu})}{\text{Nu}(\text{Pu}+1)} \right] T_{\text{тн}}. \quad (10)$$

Теплогідродинамічна модель теплоносія в активній зоні реактора для визначення умов зовнішнього теплообміну (Nu) в рамках експрес-методу аналізу ядерної безпеки заснована на наступних положеннях / допущеннях.

1. Швидкість потоків теплоносія в активній зоні значно менше швидкості поширення звукових збурень (дозвукові режими), і впливом стисливості теплоносія на гідродинамічні параметри можна знехтувати.

2. Необхідною умовою міжкasetного змішання потоків є контактне розташування неізолюваних ТВЗ.

При забезпеченні необхідної умови міжкasetного змішання можливе відмінність швидкостей потоків теплоносія в різних ТВЗ враховується на вході в активну зону реактора до перетину повного міжкasetного змішання.

Рівняння балансу витрат теплоносія при частковій / повному завантаженні модернізованими ТВЗ:

$$F_A N_A v_0 + F_w N_w v_0 = F_A N_A v_A + F_w N_w v_w, \quad (11)$$

де F_A , F_w – площа прохідного перетину теплоносія в проектних і модернізованих ТВЗ відповідно; N_A , N_w – кількість проектних і модернізованих ТВЗ відповідно; v_0 , v_A , v_w – середня по перетину швидкість змішаного теплоносія, швидкість теплоносія на вході в активну зону для проектних і модернізованих ТВЗ відповідно.

Перепад тиску гідравлічних втрат на активній зоні:

для ізолюваних ТВЗ

$$\Delta P_a = \kappa_{AS} \frac{\rho}{2} v_A^2 = \kappa_{wS} \frac{\rho}{2} v_w^2; \quad (12)$$

для неізолюваних ТВЗ

$$\Delta P_a = \kappa_{Ai} \frac{\rho}{2} v_A^2 + (\kappa_{AS} - \kappa_{Ai}) \frac{\rho}{2} v_0^2 = \kappa_{wi} \frac{\rho}{2} v_w^2 (\kappa_{wS} - \kappa_{wi}) \frac{\rho}{2} v_0^2, \quad (13)$$

де κ_{AS} , κ_{wS} , κ_{Ai} , κ_{wi} – сумарні і вхідні коефіцієнти гідравлічного опору для проектних і модернізованих ТВЗ відповідно; ρ – щільність теплоносія.

Рішення системи рівнянь (9) - (13) дозволяє без залучення додаткового моделювання деталізованими кодами консервативно і оперативно оцінити вплив будь-якої модернізації активної зони на відповідність критеріям безпеки за максимально допустимим значенням температури оболонки твела $T_{об}^n$ і ядерного палива $T_{тм}^n$.

Розглянемо питання застосування запропонованого експрес-методу аналізу ядерної безпеки альтернативних / «непроектних» WFA в ВВЕР.

Основні відмінності між WFA і проектними ТВЗ-А пов'язані з різницею гідравлічних опорів (КГС - коефіцієнт гідравлічного опору), які в загальному випадку можуть привести до відносної зміни швидкості теплоносія і інтенсивності теплообміну на поверхні твела. В цьому випадку показники відмінностей «непроектних» і проектних ТВЗ визначаються показниками відмінностей середньої швидкості теплоносія K_V .

Показники відмінності швидкостей K_V впливають з (11) – (13):

- для ізолюваних ТВЗ

$$K_V = \frac{v_w}{v_A} = \sqrt{\frac{\kappa_{AS}}{\kappa_{wS}}};$$

- для неізолюваних ТВЗ (при допущенні несуттєвого впливу вхідних умов на процеси міжкasetного змішання потоків теплоносія)

$$K_V = \frac{v_0}{v_A} \approx \frac{F_A N_A + F_w N_w \sqrt{\kappa_{AS}/\kappa_{wS}}}{F_A N_A + F_w N_w}.$$

Можливі відмінності в хімічному складі і властивостях ядерного палива, а також в конструкціях твелів WFA і ТВЗ-А в даному випадку не враховуються.

Для завершення часткового завантаження WFA (менше 1/3 від загального числа ТВЗ): $1,00 \geq K_V \geq 0,97$.

Для великих обсягів завантаження WFA (в тому числі і повного завантаження активної зони реактора) мінімально можливе значення $K_V = 0,86$.

Коефіцієнти тепловіддачі на поверхні твела в активній зоні реактора: $\alpha \sim v^n$ ($0 \leq n \leq 1$ для різних режимів теплообміну).

Отже, співвідношення між коефіцієнтами тепловіддачі в проектних і модернізованих ТВЗ, які визначаються середньою швидкістю теплоносія:

$$\alpha(WFA) = K_V^n \alpha(TBCA).$$

Вплив додаткових турбулізаторів WFA на критичні теплові потоки консервативно не враховується.

Для закризисного теплообміну $n \leq 0,8$:

$$Nu(WFA) = K_V^n Nu(TBCA).$$

Для різних режимів теплообміну в активній зоні реактора (в тому числі для природної циркуляції закризисного теплообміну) найбільш характерні умови

$$\text{Nu}(\text{ТВСА}) \gg 1 \left(\alpha \gg 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{град}} \right).$$

У цьому випадку значення критеріїв K_1 і K_2 (див. формули (7)) для WFA і ТВЗ-А фактично однакові

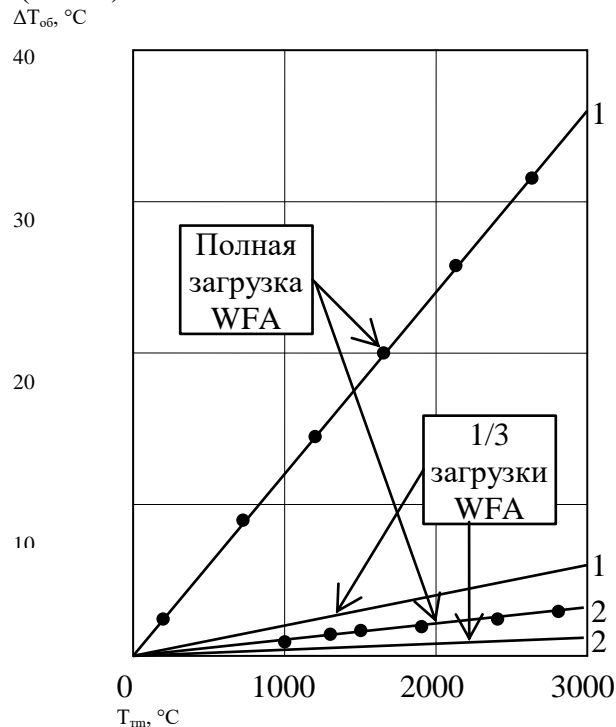
$$K_1(\text{ТВСА}) = K_1(\text{WFA}); \quad K_2(\text{ТВСА}) = K_2(\text{WFA})$$

і при допущенні ідентичності значень максимальної температури палива WFA і ТВЗ-А $T_{\text{tm}0}$ в початковий момент часу ($t = 0$):

$$\Delta T_{\text{tm}} = T_{\text{tm}}(\text{WFA}) - T_{\text{tm}}(\text{ТВСА}) = 0,$$

$$\Delta T_{\text{об}} = T_{\text{об}}(\text{WFA}) - T_{\text{об}}(\text{ТВСА}) = \frac{T_{\text{tm}0}}{\text{Nu}(\text{ТВ})} \left(\frac{1}{K_v''} - 1 \right).$$

Поточні значення різниці $\Delta T_{\text{об}}$ при різних загрузках WFA активної зони ВВЕР і різної інтенсивності теплообміну в залежності від максимальної температури ядерного палива T_{tm} наведені на (Рис. 1).



Рисуюнок 1 - Максимальна різниця температур оболонок твєлів WFA і ТВЗ -А $\Delta T_{\text{об}}$ при різних загрузках активної зони:
1 – $\text{Nu} = 10$; 2 – $\text{Nu} = 100$.

Висновки. Проведено аналіз безпеки при диверсифікації ядерного палива експрес методом. Аналіз результатів моделювання проектних і запроектних аварій в ВВЕР з ТВЗ-А можуть бути адаптовані на будь-яке завантаження WFA активної зони за умов необхідної інтенсивності тепловіддачі (коефіцієнта тепловіддачі $\alpha \gg 10^{-3} \text{Вт}/(\text{м}^2 \text{град})$).

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Kirst M.* Fuel Diversification of the VVER. Fuel Market in Eastern Europe and Ukraine / M. Kirst, U. Benjaminsson, and C. Öneby // ATW. – 2015. – V. 60, issue 3.
2. *Кириллов П. Л.* Справочник по теплогидравлическим расчетам / П. Л. Кириллов, Ю. С. Юрьев, В. П. Бобков. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.

3. *Васильченко В. Н.* Моделирование аварий на ядерных энергетических установках атомных электростанций / В. Н. Васильченко, Е. З. Емельяненко, А. Е. Смышляев, В. В. Ким; Под общ. ред. В. И. Скалозубова. – Одесса : Резон, 2002. – 466 с.
4. *Скалозубов В. И.* Основы управления запроектными авариями с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР / В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, В. Н. Колыханов. – Чернобыль : ИПБ АЭС НАНУ, 2010. – 400 с.

Скалозубов Володимир Іванович, skalozubov@opu.ua

Скалозубов Владимир Иванович,

Skalozubov Vladimir,

Сергієнко Єфим Денисович,

Сергиенко Ефим Денисович,

Sergienko Efim