



Ідентифікатор подання: 74

Тип: Секційна доповідь

## Розрахунок залишкового енерговиділення опроміненого ядерного палива: методи ISO 10645/ANS 5.1, SCALE

середа, 28 травня 2025 р. 11:15 (20 хвилин)

РОЗРАХУНОК ЗАЛИШКОВОГО ЕНЕРГОВИДІЛЕННЯ ОПРОМІНЕНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА: МЕТОДИ ISO 10645/ANS 5.1, SCALE

С.П. Ладан<sup>1,2</sup>, В. І. Борисенко<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Київський Академічний Університет, Київ, Україна<sup>2</sup> Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна

Залишкове енерговиділення (ЗЕ) опроміненого/відпрацьованого ядерного палива (ОЯП, ВЯП) визначається радіоактивним розпадом продуктів поділу і трансуранових ізотопів. Основна частина ЗЕ (в перші ~10 років з моменту припинення опромінення ВЯП) визначається енергією  $\beta$ - і  $\gamma$ -випромінювання продуктів поділу.

В роботі проведено порівняння значень ЗЕ ОЯП/ВЯП, з параметрами запропонованими в стандарті [1], на основі моделювання у коді SCALE [2] та за моделями в [3, 4]. Розглянуто можливість використання [3, 4] для оперативного визначення ЗЕ ОЯП/ВЯП.

Відповідно до визначення [3, 4] потужність залишкового енерговиділення ядерного палива - це теплова потужність, що утворюється в результаті радіоактивного розпаду продуктів поділу і активації ядерного палива після зупинки ядерного реактора.

Після зупинки ядерного реактора (припинення самопідтримувальної ланцюгової реакції поділу) в опроміненому ядерному паливі наявні певні компоненти та продовжують відбуватись ядерні процеси, які є джерелом виділення теплової енергії.

Відповідно до ядерних процесів, які відбуваються в ядерному паливі і конструкційних елементах ТВЗ після опромінення, джерела генерації тепла будуть наступні:

- Продукти поділу;
- Важкі елементи -актиноїди;
- Поділи викликані нейтронами, що запізнюються;
- Спонтанний поділ;
- Конструктивні матеріали та елементи корпусу реактора.

В процесі опромінення уранового палива, трансуранові елементи синтезуються внаслідок реакцій захоплення ( $n, \gamma$ ) на уранових ядрах палива та їх похідних, а також реакцій ( $n, 2n$ ) та ( $n, p$ ), ймовірність яких значно нижча та часто не враховується при розрахунках ЗЕ ядерного палива.

В даній роботі розглянуто два стандарти по розрахунку ЗЕ ОЯП - ANS 5.1, ISO 10645 в редакціях 2022 та 2014 років. Саме вони на думку авторів найбільш актуальні та релевантні для можливого застосування в Україні.

За ISO 10645 Розрахунок залишкового енерговиділення опроміненого палива LWR реакторів на UOX паливі протягом часу до 109 с проводиться за наступною формулою:

$$P_N(t, T) = P_S(t, T) + P_B(t, T) + P_A(t, T) + P_{Cs}(t, T) + P_E(t, T) \quad (1)$$

де,  $P_S$ : потужність ЗЕ продуктів поділу ( $^{235}\text{U}, ^{238}\text{U}, ^{239}\text{Pu}, ^{241}\text{Pu}$ )

$$P_S(t, T) = \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^m \frac{P_{ik}}{Q_i} \sum_{j=1}^{23} \left[ \frac{\alpha_{ij}}{\lambda_{ij}} (1 - e^{-\lambda_{ij} T_k}) e^{-\lambda_{ij} t_k} \right] \quad (2)$$

$P_B$ : внесок  $^{239}\text{U}, ^{239}\text{Np}$ ;  $P_A$ : внесок інших нуклідів (актиноїдів);  $P_{Cs}$ : внесок  $^{134}\text{Cs}$ ;

$P_E$ : потужність ЗЕ захоплення нейтронів іншими продуктами поділу;

$T, T_k$ : час опромінення повний та час опромінення протягом інтервалу  $k$ , відповідно;

$t$ : час після зупинки опромінення;  $t_k$  - час від моменту закінчення часу роботи на потужності  $T_k$ ;

$P_{ik}$ : сумарна теплова потужність палива протягом поділу;

$Q_i$ : сумарна теплова потужність одного поділу нукліду  $i$ ;

$\alpha_j, \lambda_j$ : частка та стала -ої групи ядер ЗЕ, утворених при поділі ізотопу  $j$ , відповідно.

В якості об'єкта для розрахунків було використано параметри реальної ТВЗ з початковим збагаченням 4,4%, вигоранням 6 МВт·д/кг U та питомою потужністю 40 МВт/т U.

Розрахунки залишкового енерговиділення відповідно до [4] проводились:

- з урахуванням лише доданку  $P_S$  – вклад в ЗЕ продуктів поділу  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ , відповідно до (2)

- Моделювання проводилось за допомогою Python з відповідними бібліотеками: SciPy, NumPy, Matplotlib

- Початкові дані щодо часток вкладу нуклідів розраховувались за допомогою функцій інтерполяції відповідно до [7]

- Зміна графіку навантаження в даній роботі не розглядалась

Розрахунки залишкового енерговиділення в SCALE проводились для реальних параметрів ТВЗ в програмному коді SCALE за допомогою модулів TRITON, ORIGEN-S та OPUS.

На Рис. 1 відображено графіки ЗЕ розраховані в коді SCALE та відповідно до [4].

Indico rendering error

Could not include image: Cannot read image data. Maybe not an image file?

Рис. 1. Залишкове енерговиділення, розраховане відповідно до ISO 10645/ANS 5.1 та SCALE.

В роботі показано, що розрахунок залишкового енерговиділення опроміненого ядерного палива відповідно до [3, 4] з високою точністю (різниця менше 5% в інтервалах часу 10-1200 діб від зупинки реактора) корелює з розрахунком залишкового енерговиділення за допомогою коду SCALE. Що дає припущення щодо можливості використання розрахунків ЗЕ базуючись на основі моделей ISO 10645/ANS 5.1 в системі внутрішньореакторного контролю, за рахунок використання меншого часу на підготовку розрахунків та меншого часу самих розрахунків, а також відсутності необхідності деталізованих даних технічних параметрів конкретної ТВЗ та умов її експлуатації (спрощення, які прийняті в стандартах [3, 4]).

Для часу менше ніж 10 діб різниця в розрахунку ЗЕ більше ніж 5% може бути пояснена вкладом не врахованих в розрахунку по ISO 10645 від нуклідів  $^{239}\text{U}$  та  $^{239}\text{Np}$  – доданок  $P_B$  в (1).

В періоди часу більше 1200 діб різниця може бути пояснена - не врахуванням вкладу  $^{134}\text{Cs}$  та інших актиноідів (крім  $^{239}\text{U}$  та  $^{239}\text{Np}$ ), які мають вагомий вклад в ці періоди часу – доданки  $P_A$  та  $P_{Cs}$  в (1).

1. COU НАЕК 099:2023 Поводження з ядерним паливом. Радіаційні характеристики і залишкове енерговиділення відпрацьованих тепловидільних збірок ВВЕР-1000.
2. SCALE Code System. Oak Ridge National Laboratory: official website.
3. ANSI/ANS-5.1, 2014. Decay Heat Power in Light Water Reactors.
4. ISO 10645:2022. Nuclear energy - Light water reactors - Decay heat power in non-recycled nuclear fuels.
5. Борисенко В. І., Горанчук В. В., Юров М. С. Ядерна енергетика та довкілля 2(26) (2023) 3
6. Юров М. С., Борисенко В. І. Ядерна енергетика та довкілля 3(29) (2024) 8.
7. R.W. Mills at al. Nuclear Engineering and Technology 52 (2020) 2130

**Authors:** БОРИСЕНКО, Володимир (Київський Академічний Університет, Інститут проблем безпеки АЕС НАН України); Пан ЛАДАН, Сергій (Київський Академічний Університет, Інститут проблем безпеки АЕС НАН України)

**Доповідач:** Пан ЛАДАН, Сергій (Київський Академічний Університет, Інститут проблем безпеки АЕС НАН України)

**Тип засідання:** Атомна енергетика

**Класифікація за напрямком:** Атомна енергетика