

ОПЕРАТИВНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ЗАЛИШКОВОГО ЕНЕРГОВИДІЛЕННЯ ОПРОМІНЕНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА СПРОЩЕНИМИ МЕТОДАМИ: ПЕРЕВАГИ ТА ОБМЕЖЕННЯ

С.П. Ладан^{1,2}, В. І. Борисенко^{1,2}

*Київський Академічний Університет, Київ, Україна
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна*

На сьогодні залишкове енерговиділення опроміненого ядерного палива енергетичних реакторів визначається переважно розрахунковими методами. В Україні чинним нормативним документом для оцінки залишкового енерговиділення є СОУ НАЕК 099:2023 [1]. Як було продемонстровано в попередніх дослідженнях автора та співавторів, використані у зазначеному стандарті спрощення, зокрема нехтування впливом питомої потужності палива під час експлуатації та історії його навантаження, можуть призводити до суттєвих розбіжностей у результатах розрахунків [2, 3]. Водночас для задач оперативного контролю опроміненого ядерного палива критично важливим є забезпечення достатньої точності та швидкості визначення ЗЕ, що обмежує можливість застосування ресурсомістких методів комп'ютерного моделювання, зокрема із використанням пакета SCALE [4].

Як об'єкт дослідження було обрано тепловидільну збірку (ТВЗ) з початковим збагаченням 4,4 %, вигоранням 52 МВт·д/кг U та питомою потужністю 40 МВт/т U.

Розрахунки залишкового енерговиділення відповідно до стандартів ISO 10645 виконувалися з урахуванням усіх складових та їхнього внеску у сумарне значення залишкового енерговиділення [5].

В даній роботі ми розглянуто один з найбільш сучасних «спрощених» методів розрахунку – у відповідності до ISO 10645 в останніх редакціях та порівняння із комплексним методом розрахунків за допомогою інструментарію SCALE.

Сумарне залишкове енерговиділення після часу t від зупинки, якому передувало навантаження протягом часу T , розраховується:

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

де,

P_S : потужність ЗЕ продуктів поділу (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu);

P_B : внесок ^{239}U , ^{239}Np ;

P_A : внесок інших нуклідів (актиноїдів);

P_{Cs} : внесок ^{134}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 ;

Моделювання здійснювалося із використанням мови програмування Python та бібліотек SciPy, NumPy і Matplotlib. Вихідні дані щодо часток внеску окремих нуклідів визначалися за допомогою інтерполяційних функцій на основі даних, наведених у роботі R. W. Mills [6].

На Рис. 1 відображено порівняння розрахунків залишкового енерговиділення розраховані в коді SCALE та відповідно до [5].

У роботі підтверджено, що спрощені методи розрахунку залишкового енерговиділення опроміненого ядерного палива відповідно до [5], можуть бути використані для більш точного оперативного розрахунку у порівнянні з актуальним на сьогоднішні СОУ НАЕК 099:2023, який не враховує питому потужність та історію навантаження ядерного палива.

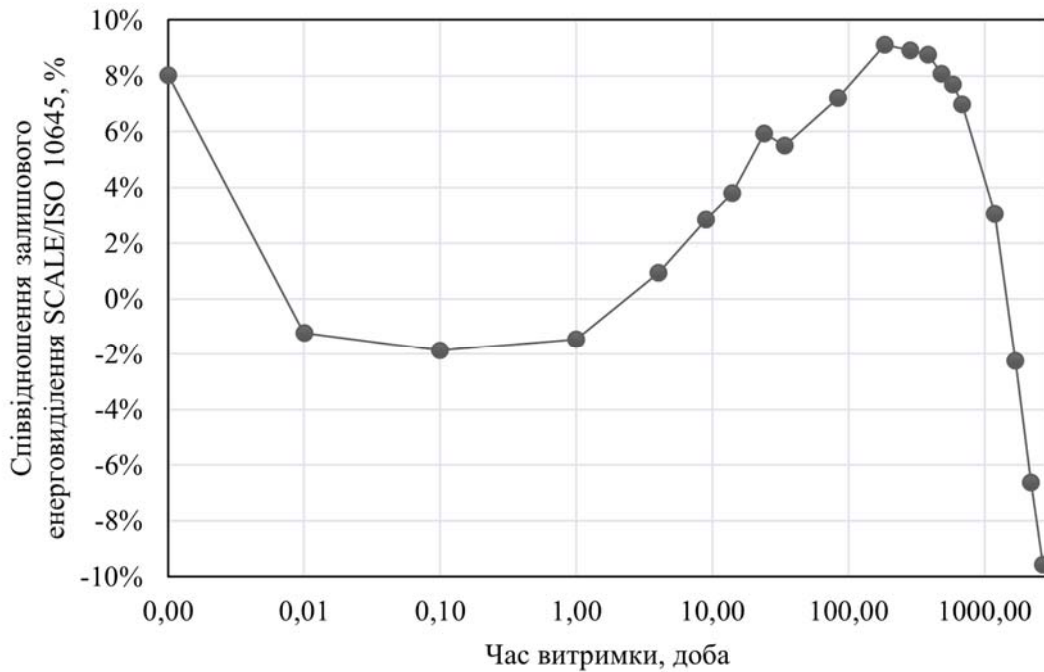


Рис. 1. Порівняння розрахунків потужності залишкового енерговиділення опроміненого ядерного палива методами SCALE та ISO 10645 для ТВЗ з початковим збагачення 4,4% до вигорання 52 МВт·д/кг U на питомій потужності 40 МВт/т U.

Для періодів до 30 діб після опромінення ядерного палива вагомий вклад в потужність залишкового енерговиділення дають ізотопи ^{239}U та ^{239}Np .

Для часових інтервалів понад 200 діб суттєвий внесок у залишкове енерговиділення забезпечує вклад ^{134}Cs та інших актиноїдів (крім ^{239}U та ^{239}Np).

Отримані результати свідчать про можливість застосування моделей ISO 10645 у системах внутрішньореакторного контролю для оперативного визначення залишкового енерговиділення. Перевагами такого підходу є скорочення часу підготовки вихідних даних та виконання розрахунків, а також відсутність необхідності використання надмірно деталізованих характеристик конкретної ТВЗ та умов її експлуатації. Для реалізації розрахунків достатньо параметрів, що вже контролюються системами внутрішньореакторного контролю, зокрема початкового збагачення, режиму навантаження.

1. СОУ НАЕК 099:2023 Поводження з ядерним паливом. Радіаційні характеристики і залишкове енерговиділення відпрацьованих тепловидільних збірок ВВЕР-1000.
2. Борисенко В. І., Горанчук В. В., Юров М. С. Ядерна енергетика та довкілля 2(26) (2023) 3.
3. Ладан С.П., Борисенко В. І. Ядерна енергетика та довкілля 2(33) (2025) 45.
4. SCALE Code System. Oak Ridge National Laboratory: official website.
5. ISO 10645:2022. Nuclear energy - Light water reactors - Decay heat power in non-recycled nuclear fuels.
6. R.W. Mills at al. Nuclear Engineering and Technology 52 (2020) 2130.