

В. І. Борисенко*

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: vborysenko@isnppp.kiev.ua

Коментар до статті:

В. І. Скалозубов, І. Л. Козлов, Ю. О. Комаров, О. О. Чулкін, О. І. Піонтковський

**АНАЛІЗ ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ ДИВЕРСИФІКАЦІЇ
ПАЛИВНИХ ЗБІРОК WESTINGHOUSE НА ВВЕР-1000**

Оригінальна стаття: [Ядерна фізика та енергетика 20\(2\) \(2019\) 159](#)

Стаття, що коментується, базується на необґрунтованих припущеннях, а також на неточних вихідних даних щодо деяких геометричних параметрів тепловидільних збірок (ТВЗ) виробництва «ТВЭЛ» (ТВС-А) і «Westinghouse» (FA-WR).

Проведемо аналіз формули (5с) (символ «с» у номері формули означає, що це номер формули зі статті)

$$q_T = \frac{T_{FM} - T_{clad}}{R_T}, \quad (5c)$$

де q_T – густина теплового потоку на поверхні твела; R_T – тепловий опір твела (далі для термічного опору твела застосуємо позначення ξ_T , щоб не плутати з радіусом твела R); T_{FM}, T_{clad} – температура палива в центрі твела і температура оболонки твела відповідно.

Співвідношення (5с) є загально відомим, але замість максимальної температури (у центрі) палива у формулі (5с) має бути середня температура палива у твелі.

Співвідношення (5с) отримано при розв’язанні стаціонарного рівняння теплопровідності для циліндричного твела радіусом R з питомою об’ємною потужністю внутрішніх енерговиділень q_V , теплопровідністю λ , при заданій температурі на поверхні твела T_{clad} і симетричних граничних умовах.

Рівняння теплопровідності для визначення зміни температури по радіусу твела має вигляд [1]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{q_V}{\lambda} = 0,$$

розв’язком якого є вираз

$$T = T_{clad} + \frac{q_V R^2}{4\lambda} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

У статті тепловий потік на поверхні твела визначається як

$$q_T = \alpha(T_{clad} - T_T)$$

(формула у статті без номера на с.160), де T_T – температура теплоносія, що охолоджує твел, α – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні твела до теплоносія.

Тепловий потік на поверхні твела при стаціонарних умовах визначається з рівняння балансу енергії, що генерується в об’ємі твела і відводиться з поверхні твела на одиницю довжини твела. Для стаціонарного стану (генерація тепла дорівнює відводу тепла) очевидним є

$$q_T = \frac{q_V R}{2}. \quad (2)$$

Середня температура палива по об’єму твела \bar{T} з урахуванням формули (1)

$$\bar{T} = T_{clad} + \frac{q_V R^2}{8\lambda}. \quad (3)$$

Еквівалентний термічний опір твела визначається як відношення різниці температур: середній по об’єму \bar{T} (3) і на поверхні циліндра (твела) T_{clad} до теплового потоку на поверхні твела (2).

Тому термічний опір циліндричного твела

$$\xi_T = \frac{R}{4\lambda}. \quad (4)$$

З рівнянь (3) і (4) можна легко отримати, що з урахуванням виразу (2)

$$\frac{\bar{T} - T_{clad}}{\xi_T} = q_T. \quad (5)$$

Таким чином, у формулі (5с) має бути не максимальна, а середня температура палива по об'єму твела (5).

Наскільки це важливо? Максимальна температура палива в твелі на декілька сотень градусів більша, ніж середня температура палива по об'єму твела, тому це дуже важливо з огляду на визначення густини теплового потоку на поверхні твела q_T .

Аналізуючи формулу (2), можна зробити такий висновок: при стаціонарних умовах тепловий потік на поверхні твела q_T визначається тільки питомим об'ємним енерговиділенням q_V .

Відповідно формула статті

$$q_T(WFA) = 0,9q_T(TBCA) \quad (6)$$

(у статті формула без номера, після (6с)) є помилковою, бо при однаковій потужності різних ТВЗ (однакових q_V) теплові потоки на поверхні твелів q_T будуть однаковими за визначенням (2).

При отриманні співвідношення (6с) автори помилково вважають, що у формулі (5с) залежить від типу ТВЗ тільки термічний опір твела ξ_T . Однак не тільки для різних конструкцій ТВЗ, але й для ТВЗ одного виробника всі параметри \bar{T} , T_{clad} , ξ_T , які визначають q_T , є різними, навіть для ТВЗ з однаковою потужністю.

Найбільша зміна значення термоопору під час експлуатації ТВЗ відбувається за рахунок зменшення товщини газового зазору, навіть до його «зникнення» при вигораннях ~30 МВт·діб/кг урану. У випадку досягнення умов контакту «паливо - оболонка твела» зменшується середня температура палива, а відповідно це впливає на значення ξ_T за рахунок залежності коефіцієнта теплопровідності палива λ від температури.

Таким чином, аналізуючи вплив експлуатаційних факторів на зміну параметрів формули (6с), очевидним є їхній суттєвий вплив на значення ξ_T , а відповідно й на q_T .

Наступне припущення – визначення впливу на значення ξ_T різних геометричних розмірів: паливної таблетки, газового зазору й товщини оболонки твела, які за даними авторів статті мають такі співвідношення: розмір паливної таблетки (δ_{FM}) і газового зазору (δ_g) для твелів ТВЗ – FA-WR на ~10 % більше, ніж відповідні розміри ТВС-А.

$$\delta_{FM}(F)/\delta_{FM}(A) = 1,1, \quad \delta_g(F)/\delta_g(A) = 1,1.$$

На ВВЕР-1000 АЕС України використовуються твели з такими геометричними розмірами:

$$TBCA - 1,4 - 7,57 - 7,79;$$

$$FA-WR - 0,0 - 7,831 - 8,039,$$

де наведено значення діаметрів внутрішнього отвору паливної таблетки, зовнішнього діаметра паливної таблетки та внутрішнього діаметра оболонки твела відповідно.

З наведених даних розмірів ТВЗ, що використовуються на ВВЕР-1000 АЕС України [2],

$$\delta_r(F)/\delta_r(A) = 1,27, \quad \delta_g(F)/\delta_g(A) = 0,85.$$

Автори статті вказують, що відповідні розміри ТВЗ різних виробників взяті з публікацій [4с, 5с]. Але якщо автори пропонують нові методи аналізу безпеки ВВЕР, то перш за все необхідно визначити, які саме ТВЗ використовуються на ВВЕР-1000.

Ще одне зауваження стосується коректності застосування формули (6с) для визначення термічного опору твела, а саме наближення «плоскої стінки». Порівнюючи формулу (6с) з (4), яка отримана саме для циліндричного твела, можна констатувати, що наближення «плоскої стінки» (6с) є неприпустимим для аналізу безпеки, а саме внесок у загальний термоопір твела від термоопору на паливній таблетці в 4 рази вище, ніж у випадку коректного циліндричного наближення.

Таким чином, необґрунтоване застосування наближення (6с), помилкове визначення густини теплового потоку q_T (5с), а також «помилкові» розміри твелів надають привід вважати, що висновки статті є сумнівними.

Наступне зауваження стосується актуальності проведеного авторами статті дослідження. У статті пропонується застосовувати «альтернативний аналіз» безпеки впровадження у так званих змішаних активних зонах, ядерного палива різних виробників: російського «ТВЭЛ» і Westinghouse. Як приклад пропонується розглянути результати публікації 2015 р. [3] з аналізу максимальної проектної аварії (МПА) щодо максимальних температур, що досягаються на оболонках твелів. Результати, представлені в [3], отримані при застосуванні «самих» консервативних припущень, а тому й результати теж консервативні і не задовольняють вимогам НТД по критерію – температура оболонки твелів < 1200 °С.

Однак у статті за 2016 р. [4] представлено результати аналізу МПА з меншим ступенем консерватизму, і результати аналізу безпеки

задовольняють усім вимогам НТД, у тому числі й за температурою оболонки твєлів. До того ж і у Звіті з аналізу безпеки, розробленого в Центрі проектування активних зон (ЦПАЗ) ХФТІ [5], також наведено результати, які підтверджують виконання всіх вимог НТД, у тому числі щодо температур оболонок твєлів при МПА.

Таким чином, на момент публікації статті у 2019 р. ні наукової, ні інженерної проблеми

аналізу температурних режимів твєлів при МПА не існувало, у тому числі й за допомогою «альтернативного аналізу».

З урахуванням вищенаведених зауважень основні положення статті побудовані на помилкових і необґрунтованих припущеннях, а розглянута проблема альтернативного аналізу температурних режимів твєлів при аваріях не є актуальною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. И.А. Кузнецов, В.М. Поплавский. *Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах* (Москва, ИздАт, 2012) 632 с.
2. Y. Kovbasenko. Comparative Analysis of VVER-1000 Westinghouse and TVEL Spent Fuel Capability. *Universal Journal of Physics and Application* 10(4) (2016) 105.
3. И.А. Шевченко, Ю.Ю. Воробьев. Проверка критериев безопасности смешанных загрузок ядерного топлива для реакторов типа ВВЭР-1000. *Ядерная та радіаційна безпека* 2(66) (2015) 3.
4. Ю.Ю. Воробйов та ін. Теплогидравлический анализ безопасности смешанных топливных завантажень для АЭС Украины с реакторами ВВЕР-1000. *Ядерная та радіаційна безпека* 2(70) (2016) 9.
5. Обоснование безопасности использования перегрузочной партии ТВС компании «Вестингауз» на энергоблоке № 3 ЮУАЭС. Отчет ЦПАЗ ХФТИ, 2014 г. 174 с.

В. И. Борисенко*

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев, Украина

*Ответственный автор: vborysenko@isnpp.kiev.ua

Комментарий к статье:

В.И. Скалозубов, И. Л. Козлов, Ю. А. Комаров, О. А. Чулкин, О. И. Пионтковский

АНАЛИЗ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ДИВЕРСИФИКАЦИИ ТОПЛИВНЫХ СБОРОК WESTINGHOUSE НА ВВЭР-1000

Оригинальная статья: *Ядерная физика та енергетика* 20(2) (2019) 159.

V. I. Borysenko*

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: vborysenko@isnpp.kiev.ua

Comment on the article:

V. I. Skalozubov, I. L. Kozlov, Yu. A. Komarov, O. A. Chulkin, O. I. Piontkovskiy

ANALYSIS OF NUCLEAR SAFETY IN DIVERSIFICATION OF WESTINGHOUSE FUEL ASSEMBLIES AT WWER-1000

Original article: *Yaderna Fyzyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 20(2) (2019) 159.

REFERENCES

1. I.A. Kuznetsov, V.M. Poplavsky. *Safety of NPPs with Fast Neutron Reactors* (Moskva, IzdAT, 2012) 632 p. (Rus)
2. Y. Kovbasenko. Comparative Analysis of VVER-1000 Westinghouse and TVEL Spent Fuel Capability. *Universal Journal of Physics and Application* 10(4) (2016) 105.
3. I.A. Shevchenko, Yu. Vorobiev. Verification of safety criteria for mixed loads of nuclear fuel for VVER-1000 reactors. *Yaderna ta Radiatsiyana Bezpeka (Nuclear and Radiation Safety)* 2(66) (2015) 3. (Rus)
4. Yu.Yu. Vorobyov et al. Thermohydraulic safety analysis of mixed fuel loads for Ukrainian NPPs with WWER-1000 reactors. *Yaderna ta Radiatsiyana Bezpeka (Nuclear and Radiation Safety)* 2(70) (2016) 9. (Ukr)
5. Justification of the safety of use of a reloading batch of fuel assemblies of the “Westinghouse” company at the power unit No. 3 of the South Ukraine NPP. Report of Core Design Center of KIPT, 2014, 174 p. (Rus)

Надійшла/Received 08.06.2020