

## Теплогідравлічний аналіз безпеки змішаних паливних завантажень для АЕС України з реакторами ВВЕР-1000

Наведено результати теплогідравлічного аналізу змішаних паливних завантажень шляхом перевірки неперевищення критеріїв безпеки. Підтверджено надійність охолодження ядерного палива в показних подіях аналізу проектних аварій. За допомогою програмного коду RELAP5/MOD3.2 показано, що максимальна температура оболонки твела в разі введення нового палива ТВЗ-WR та ТВЗА-12 у завантаження сумісно з ТВЗА не перевищує 1200 °С. Зроблено висновок про можливість безпечного впровадження нових типів палива для АЕС України.

Ключові слова: змішані паливні завантаження, тепловидільна збірка, ТВЗА-12, ТВЗ-WR, аналіз проектних аварій, максимальна температура оболонки твела.

Ю. Ю. Воробьев, А. В. Носовский, А. С. Погонец, И. А. Шевченко

### Теплогидравлический анализ безопасности смешанных топливных загрузок для АЭС Украины с реакторами ВВЭР-1000

Представлены результаты теплогидравлического анализа смешанных топливных загрузок путем проверки превышения критериев безопасности. Подтверждена надежность охлаждения ядерного топлива в представительных событиях анализа проектных аварий. С помощью программного кода RELAP5/MOD3.2 показано, что максимальная температура оболочки твела при введении нового топлива ТВС-WR и ТВСА-12 в загрузку совместно с ТВСА не превышает 1200 °С. Сделан вывод о возможности безопасного внедрения новых типов топлива для АЭС Украины.

Ключевые слова: смешанные топливные загрузки, тепловыделяющая сборка, ТВСА-12, ТВС-WR, анализ проектных аварий, максимальная температура оболочки твела.

Н а сьогодні в Україні експлуатується 15 енергоблоків, 13 з яких мають ядерні установки типу ВВЕР-1000, що працюють на паливному завантаженні з використанням тепловидільних збірок типу ТВЗА. Це паливо зарекомендувало себе як надійне і безпечне з мінімальною кількістю відмов і дефектів. Але ядерне паливо з метою підвищення ефективності його використання постійно вдосконалюється.

Кожна нова модель ТВЗ базується на кращих ідеях та досвіді розробок попередніх поколінь палива з урахуванням сучасних досягнень. Модернізація спрямована на зростання рівня безпеки експлуатації, покращення техніко-економічних характеристик, підвищення конкурентоспроможності реакторної установки і АЕС в цілому. Проте миттєва заміна ядерного палива на модернізоване є неефективною з економічної точки зору, а тому використовують перехідні змішані паливні завантаження з різними типами ТВЗ. В активній зоні реактора можуть водночас міститися не тільки удосконалені ТВЗ одного виробника, а й ТВЗ іншого постачальника.

Одним з головних напрямів розвитку атомної енергетики України є диверсифікація постачання ядерного палива для АЕС України. Наприкінці грудня 2014 року компанія Westinghouse Electric Company та ДП НАЕК «Енергоатом» уклали договір про розширення постачання ядерного палива на АЕС України до 2020 року, і тепловидільні збірки типу ТВЗ-WR вже експлуатуються на енергоблоці № 3 Южно-Української АЕС.

Введення нового типу палива в завантаження активної зони потребує підтвердження неперевищення критеріїв безпеки, основним з яких є максимальна температура оболонки твела, яка не повинна бути більшою за 1200 °С в аварійних режимах. Саме оболонка твела, як другий бар'єр на шляху розповсюдження радіоактивних речовин, запобігає розповсюдженню радіоактивності в перший контур.

Мета цієї роботи — за допомогою теплогідравлічного аналізу показати неперевищення максимальної проектною межі пошкодження твелів, а саме температури оболонки твела в разі спільного завантаження ТВЗА з ТВЗА-12 і ТВЗ-WR. Моделювання перехідних процесів у реакторних установках ВВЕР-1000 проводилось із застосуванням програмного коду RELAP5/MOD3.2.

**Моделювання нових типів палива.** Як вихідну в розробці моделі змішаної активної зони (АкЗ) з ТВЗ-WR і ТВЗА-12 використано модель ВВЕР-1000 для коду RELAP5, активна зона якої складається з ТВЗА [1]. До моделі внесено зміни, що відповідають параметрам нових ТВЗ.

Параметри паливної таблетки і внутрішні діаметри оболонок твелів змінено. Ці параметри (табл. 1) вносяться до описання теплових структур активної зони реактора.

Таблиця 1. Основні параметри твелів

Параметр	ТВЗА	ТВЗА-12	ТВЗ-WR
Діаметр центрального отвору таблетки, мм	1,4	0,0	0,0
Зовнішній діаметр паливної таблетки, мм	7,57	7,8	7,84
Внутрішній діаметр оболонки твела, мм	7,73	7,93	8,0
Зовнішній діаметр оболонки твела, мм	9,1	9,1	9,14

Удосконалені збірки ТВ3А-12 російського виробництва і ТВ3-WR виробництва компанії Westinghouse мають більші сумарні значення коефіцієнтів гідравлічного опору (КГО, табл. 2), ніж ТВ3А.

Таблиця 2. Коефіцієнти гідравлічного опору ТВ3 [2]

Параметр	ТВ3А	ТВ3А-12	ТВ3-WR
КГО вхідної ділянки	0,7	1,3	1,03
КГО частини пучка труб, що обігривається	8,58	8,7	12,67
КГО вихідної ділянки	2,5	2,5	2,49
КГО дистанціонуючої решітки	0,3	0,41	0,61
Сумарний КГО ТВ3	11,5	12,5	16,19

Моделювання активної зони з новими ТВ3 складається з налаштування гідравлічних характеристик і характеристик теплових структур.

Нааявність ТВ3 з різними значеннями КГО зумовлює перерозподіл теплоносія по активній зоні і, відповідно, створює різні умови охолодження палива. Тому для моделювання перехідних процесів виникає потреба у виділенні окремих каналів з відмінним енерговиділенням і більш консервативними умовами щодо перемішування з оточуючими ТВ3. З цією метою використовують гарячий канал, що моделює найбільш навантажену ТВ3 і твєл з максимальним локальним енерговиділенням. Щоб унеможливити перемішування теплоносія з сусідніми ТВ3, унеможливаються перетоки між ними і гарячим каналом налаштуванням гідравлічного опору з'єднань, внаслідок чого отримуємо ізолюваний канал з максимальним енергонавантаженням.

Відносне енерговиділення гарячого каналу для змішаного завантаження ТВ3А і ТВ3-WR становить  $1,5 \times 1,16 = 1,74$  і  $1,63 \times 1,13 = 1,84$  для активної зони з ТВ3А і ТВ3А-12 (1,5 і 1,63 — коефіцієнти нерівномірності енерговиділення твєлів в активній зоні; 1,16 і 1,13 — механічні (інженерні) коефіцієнти запасу). Це дає можливість за потужності реактора 104 % отримати лінійну потужність твєлів 448 Вт/см. Отже, цей канал моделює область навколо найгарячішого твєла і є найбільш консервативними з точки зору енерговиділення.

Налаштування гідравлічних характеристик ТВ3 — ітераційний процес за гідравлічними опорами ділянок ТВ3. За представленими даними визначають повний опір ділянки (тертя і місцеві втрати), за якими коректувалися місцеві опори на зв'язках моделі. Визначають перепад тиску відповідно до значень КГО збірки. У моделі, змінюючи значення опорів на зв'язках, що описують ТВ3, наближають отриманий перепад тиску до розрахованого відповідно до КГО. Налаштування проводилося в однофазній області, середня густина в активній зоні бралася рівною  $713 \text{ кг/м}^3$ . Коефіцієнт гідравлічного опору моделі дистанціонуючої решітки змінено для ТВ3-WR на 0,87 (КГО вхідної частини для базової моделі налаштування каналу — 0,7). Коефіцієнт гідравлічного опору для моделі ТВ3А-12 змінено на 0,375 (КГО вхідної частини для базової моделі налаштування каналу — 0,78). Саме змінення опорів дає змогу керувати витратою теплоносія. У змішаній активній зоні використовуються однакові опції вхідної ділянки, щоб проводити порівняльний аналіз з ТВ3А.

**Розрахунковий аналіз перехідних процесів.** Для детального кількісного розрахунку вибираються аварії, найбільш несприятливі відносно критеріїв надійного охолодження ТВ3. Наслідками таких аварій може бути порушення цілісності оболонок твєлів — фізичного бар'єра між радіоактивними речовинами і теплоносієм першого контуру, в разі руйнування якого радіоактивні речовини потрапляють до теплоносія й розносяться по першому контуру.

У проведених розрахунках перехідних аварійних процесів — заклинювання ГЦН і двостороннього розриву ГЦТ — перевірялося досягнення оболонкою твєла температури  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ , що є максимальною проектною межею пошкодження [3]. Дана методологія описана в [4].

Для отримання максимальних температур оболонок тепловидільних елементів у випадку моделювання заклинювання ГЦН використовувався підхід, детально описаний в [5]. Вихідна модель [1] модернізувалася із застосуванням консервативного підходу.

Результати розрахунку свідчать про те, що в разі миттєвого зменшення швидкості обертання ГЦН зменшується витрата теплоносія через реактор, а це призводить до кризи теплообміну біля поверхні гарячого твєла. За лінійної потужності 448 Вт/см і відсутності зв'язку з іншими ТВ3 максимальна температура оболонки твєла для каналу ТВ3-WR дорівнює  $759 \text{ }^\circ\text{C}$ , для каналу ТВ3А —  $618 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 1). Розрахунок проводився на моделі із завантаженням активної зони ТВ3А з двома ізолюваними гарячими каналами ТВ3-WR, що є консервативним з точки зору зменшення витрати крізь ТВ3-WR. Для аналогічного завантаження ТВ3А-12 в активній зоні ТВ3А отримано такі максимальні значення температур оболонок: для каналу ТВ3А-12 —  $708 \text{ }^\circ\text{C}$ , для ТВ3А —  $616 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 2).

Отже, максимальна межа пошкодження твєлів не порушується. Більше того, маючи різницю в значеннях коефіцієнтів гідравлічного опору близько 22,8 % і однакові граничні та початкові умови, різниця в максимальних температурах гарячих каналів дорівнює 6,7 %, що говорить про приблизно однакову поведінку нових ТВ3 під час протікання перехідного процесу.

Розрахунок максимальної проектної аварії проводився для різних конфігурацій завантаження активної зони реактора ВВЕР-1000. Розроблялися дві типові моделі активних зон: у першому випадку умовно завантажуються

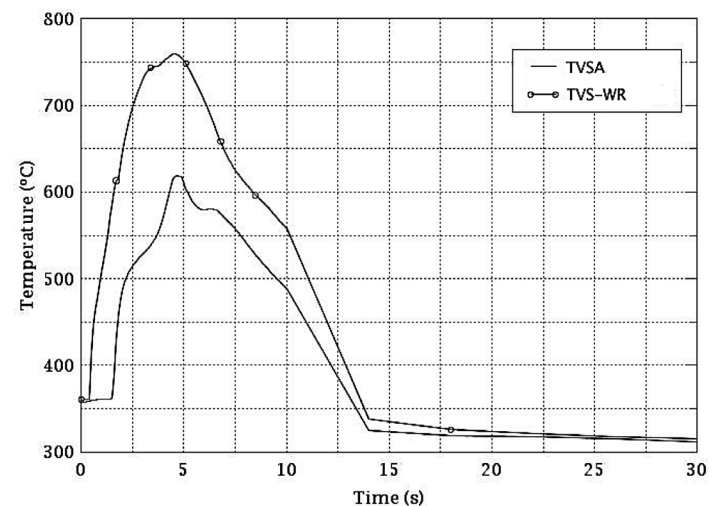


Рис. 1. Максимальна температура оболонки твєла для каналу ТВ3-WR і ТВ3А

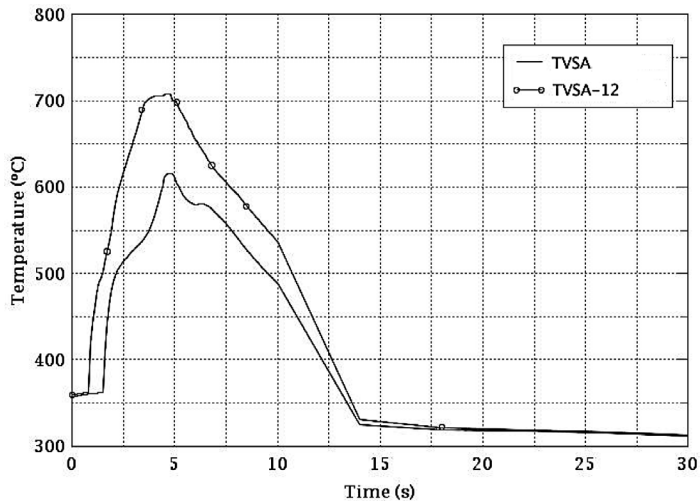


Рис. 2. Максимальна температура оболонки твела для каналу ТВ3А-12 і ТВ3А

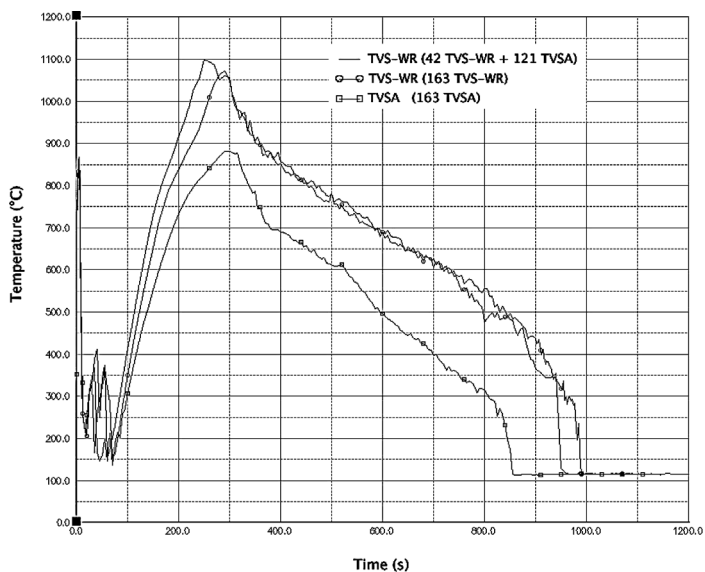


Рис. 3. Максимальна температура оболонки твела для каналу ТВ3-ВР і ТВ3А за різних комбінацій паливних завантажень

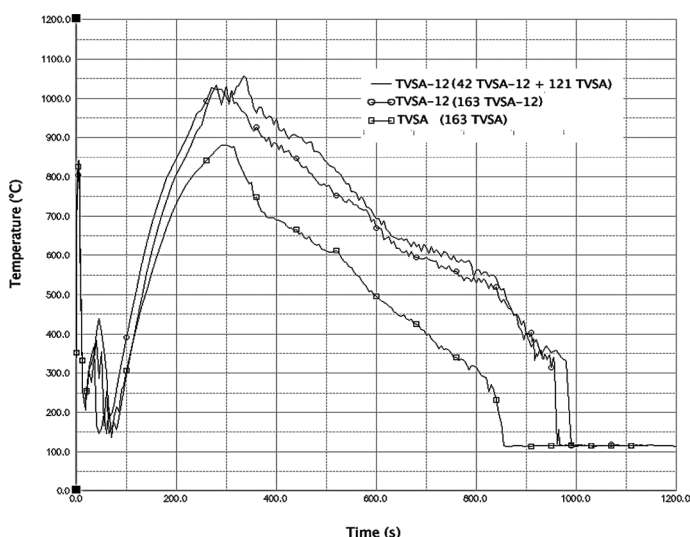


Рис. 4. Максимальна температура оболонки твела для каналу ТВ3А-12 і ТВ3А за різних комбінацій паливних завантажень

121 ТВ3А і 42 ТВ3А-12 або ТВ3-ВР, у другому випадку активна зона повністю завантажується новими ТВ3. Аналіз проводиться порівнянням результатів розрахунків, виконаних на моделі з Ак3 з ТВ3А і на моделі перехідних паливних завантажень.

Граничні умови, що бралися в розрахунку, аналогічні умовам, вибраним для аналізу МПА в [5].

Найбільші значення температур отримані для 1/4 завантаження активної зони новим типом палива (121 ТВ3А + 42 ТВ3-ВР, або ТВ3А-12), а саме: 1099 °С — для каналу ТВ3-ВР (рис. 3) і 1058 °С — для каналу ТВ3А-12 (рис. 4).

Такі значення температур отримано за консервативних припущень у розрахунках, але навіть при цьому перевищення максимальної проектної межі пошкодження твелів нема.

У разі переведення реакторної установки на однорідне паливо, або ТВ3-ВР, або ТВ3А-12 значення температури оболонки під час проектної аварії знижується.

Проведений аналіз дає можливість стверджувати, що за будь-якої вихідної події аварії, що визначена для проектних аварій, забезпечуватиметься надійне охолодження ТВ3. Даний факт є визначальним для отримання дозволу на використання інших типів ТВ3 у змішаних паливних завантаженнях.

## Висновки

У статті наведено результати теплогідрравлічного аналізу змішаних активних зон, що складаються з палива ТВ3А і ТВ3А-12, а також ТВ3А і ТВ3-ВР.

Зміна умов охолодження ТВ3 внаслідок перерозподілу потоку теплоносія в активній зоні викликана різними значеннями гідравлічного опору. Хоча коефіцієнти гідравлічного опору нових типів ТВ3 значно відрізняються, це практично не впливає на протікання аварій. Аналіз вибраних аварійних послідовностей показав, що максимальна межа пошкодження твелів не була порушена.

Отримані температури оболонок твелів є близькими, а отже, два типи ТВ3 (ТВ3А-12 і ТВ3-ВР), з теплогідрравлічної точки зору, придатні для використання на АЕС України з реакторними установками типу ВВЕР-1000.

## Список використаної літератури

1. Звіт про науково-дослідну роботу: Розробка багатоциклової теплогідрравлічної моделі ЯПВУ із ВВЕР-1000/320. Деталізація основних компонентів моделі / ДНТЦ ЯРБ; керівник О. Р. Кочар'янець; викон. С. В. Чорнобай, Ю. Ю. Воробйов. — К., 2010. — 788 с. — № держреєстрації 0109U008229.
2. Предварительный отчет по обоснованию безопасности использования упроченной конструкции ТВС компании «Вестингауз» на энергоблоке № 3 ЮУАЭС. — Кн. 1. Ред. 0/ ННЦ ХФТИ. ЦПАЗ. — Харьков, 2014. — 279 с. — Инв. № 12-3-293.
3. НП 306.2.145-2008. Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском. — К.: Держ. комітет ядерного регулювання України, 2008. — 28 с.
4. Шевченко І. А. Проверка критериев безопасности смешанных загрузок ТВСА, ТВС-В и ТВС-ВР при помощи расчетного кода RELAP5/MOD3.2 для реакторов типа ВВЭР-1000 / И. А. Шевченко, Ю. Ю. Воробьев // Ядерна та радіаційна безпека. — 2015. — № 2 (66). — С. 3-7.
5. Воробьев Ю. Ю. Особенности моделирования заклинивания главного циркуляционного насоса и учет закритического те-

плообмена при анализе проектных аварий для реакторов типа ВВЭР-1000 / Ю. Ю. Воробьев, О. И. Жабин, И. А. Терещенко // Ядерна та радіаційна безпека. — 2014. — № 4 (64). — С. 17–21.

## References

1. *Kochariants, O.R., Chornobai, S.V., Vorobyov, Yu.Yu.* (2010), R&D Report: Development of Multipurpose NSSS Hydraulic Model of the VVER-1000/320. Detailing of Model Main Components [Zvit pro naukovo-doslidnu robotu: Rozrobka bahatotsilivovoi teplohidravlitchnoi modeli YaPVU iz VVER-1000/320. Detailizatsiia osnovnykh komponentiv modeli], SSTC NRS, Kyiv, State Registration No. 0109U008229, 788 p. (Ukr)

2. Preliminary Safety Analysis Report on Using Improved Westinghouse TVS Structure at SUNPP-3 [Predvaritelnyi otchiot po obosnovaniiu bezopasnosti ispolzovaniia uprochnionnoi konstruktssii TVS kompanii “Westinghouse” na energobloke №3 YuAES], Book 1, Rev. 0, NSC KIPT, Kharkiv, 2014, 279 p. (Rus)

3. *NP 306.2.145–2008.* Nuclear Safety Rules for Nuclear Power Plants with Pressurized Water Reactors [Pravyla yadernoi bezpeky reaktornykh ustanovok atomnykh stantsii z reaktoramy z vodoiu pid tyskom], Kyiv, State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, 2008, 28 p. (Ukr)

4. *Shevchenko, I. A., Vorobyev, Yu. Yu.* (2015), “Verification of Safety Criteria for WWER-1000 Mixed Cores” [Proverka kriteriiev bezopasnosti smeshannykh zagruzok TVSA, TVS-W i TVS-WR pri pomoshchi raschiotnogo koda RELAP5/MOD3.2 dlia reaktorov tipa VVER-1000], Nuclear and Radiation Safety, No. 2 (66), pp. 3–7. (Rus)

5. *Vorobyev, Yu. Yu., Zhabin, O. I., Tereshchenko, I. A.* (2014), “Modeling of MCP Jamming and Accounting of Post-Critical Heat Transfer during Analysis of Design-Basis Accidents at WWER-1000” [Osobennosti modelirovaniia zaklinivaniia glavnogo tsirkulatsionnogo nasosa i uchiot zakrizisnogo teploobmena pri analize proektnykh avarii dlia reaktorov tipa VVER-1000], Nuclear and Radiation Safety, No. 4 (64), pp. 17–21. (Rus)

Отримано 09.12.2015.