

Ю. Ю. Воробйов, А. В. Носовський,  
О. С. Погонець, І. А. Шевченко

Державний науково-технічний центр з ядерної  
та радіаційної безпеки, м. Київ, Україна

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

*Наведено результати теплогідралічного аналізу змішаних паливних завантажень шляхом перевірки неперевищенння критеріїв безпеки. Підтверджено надійність охолодження ядерного палива в показників 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 °C. Зроблено висновок про можливість безпечної 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 непревышения 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 твэла при введении нового топлива ТВС-WR и ТВСА-12 в загрузку совместно с ТВСА не превышает 1200 °C. 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 твэла.

© Ю. Ю. Воробйов, А. В. Носовський, О. С. Погонець, І. А. Шевченко, 2016

На 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 постачань 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 неперевищенння критеріїв безпеки, основним з яких є максимальна температура оболонки твела, яка не повинна бути більшою за 1200 °C в аварійних режимах. Саме оболонка твела, як другий бар'єр на шляху розповсюдження радіоактивних речовин, запобігає розповсюдженням радіоактивності в перший контур.

Мета цієї роботи — за допомогою теплогідралічного аналізу показати неперевищенння максимальної проектної 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 ТВЗА-12 російського виробництва і ТВЗ-WR виробництва компанії Westinghouse мають більші сумарні значення коефіцієнтів гіdraulічного опору (КГО, табл. 2), ніж ТВЗА.

Таблиця 2. Коефіцієнти гіdraulічного опору ТВЗ [2]

Параметр	ТВЗА	ТВЗА-12	ТВЗ-WR
КГО вхідної ділянки	0,7	1,3	1,03
КГО частини пучка труб, що обігрівається	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 ТВЗ	11,5	12,5	16,19

Моделювання активної зони з новими ТВЗ складається з налаштування гіdraulічних характеристик і характеристик теплових структур.

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

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

Налаштування гіdraulічних характеристик ТВЗ — ітераційний процес за гіdraulічними опорами ділянок ТВЗ. 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 ТВЗ, наближають отриманий перепад тиску до розрахованого відповідно до КГО. Налаштування проводилося в однофазній області, середня густина в активній зоні бралася рівною  $713 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Коефіцієнт гіdraulічного опору моделі дистанціонуючої решітки змінено для ТВЗ-WR на 0,87 (КГО вхідної частини для базової моделі налаштування каналу — 0,7). Коефіцієнт гіdraulічного опору для моделі ТВЗА-12 змінено на 0,375 (КГО вхідної частини для базової моделі налаштування каналу — 0,78). Саме змінення опору вхідної частини дає змогу керувати витратою теплоносія. У змішаній активній зоні використовуються однакові опції вхідної ділянки, щоб проводити порівняльний аналіз з ТВЗА.

**Розрахунковий аналіз переходів процесів.** Для детально-го кількісного розрахунку вибираються аварії, найбільш не-сприятливі відносно критеріїв надійного охолодження ТВЗ. Наслідками таких аварій може бути порушення цілісності оболонок твель — 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 переходів аварійних процесів — заклинювання ГЦН і двостороннього розриву ГЦТ — перевірялося недосягнення оболонкою твела температури  $1200^\circ\text{C}$ , що є максимальною проектною межею пошкодження [3]. Дано 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 твела. За лінійної потужності 448 Вт/см і відсутності зв'язку з іншими ТВЗ максимальна температура оболонки твела для канала ТВЗ-WR дорівнює  $759^\circ\text{C}$ , для каналу ТВЗА —  $618^\circ\text{C}$  (рис. 1). Розрахунок проводився на моделі із завантаженням активної зони ТВЗА з двома ізольованими гарячими каналами ТВЗ-WR, що є консервативним з точки зору зменшення витрати крізь ТВЗ-WR. Для аналогічного завантаження ТВЗА-12 в активній зоні ТВЗА отримано такі максимальні значення температур оболонок: для каналу ТВЗА-12 —  $708^\circ\text{C}$ , для ТВЗА —  $616^\circ\text{C}$  (рис. 2).

Отже, максимальна межа пошкодження твель не по-рушується. Більше того, маючи різницю в значеннях коефіцієнтів гіdraulічного 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 ТВЗ під час пропікання переходів процесів.

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

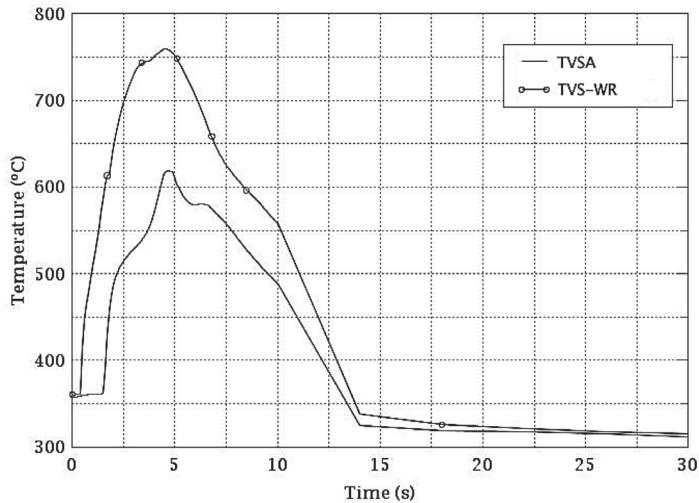


Рис. 1. Максимальна температура оболонки твела для каналу ТВЗ-WR і ТВЗА

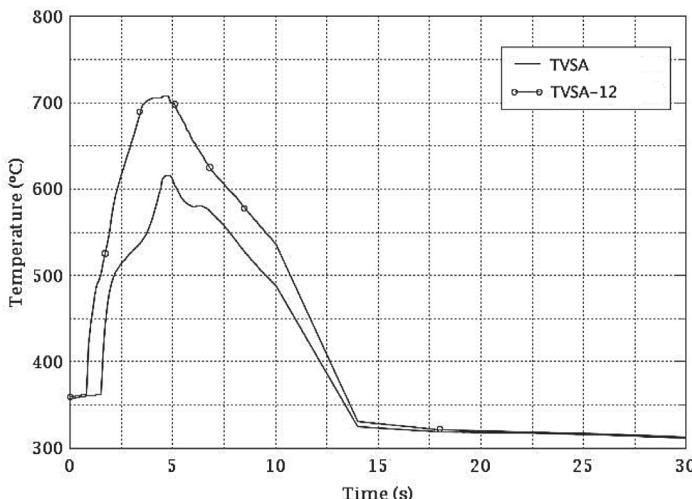


Рис. 2. Максимальна температура оболонки твела для каналу ТВЗА-12 і ТВЗА

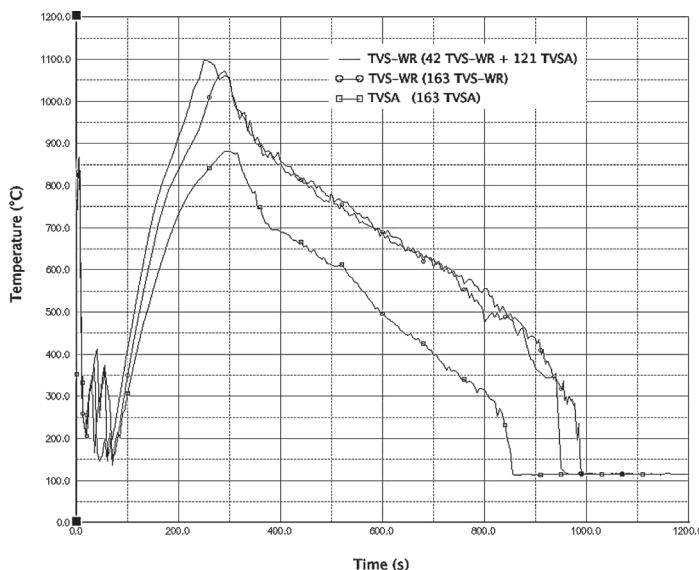


Рис. 3. Максимальна температура оболонки твела для каналу ТВЗ-WR і ТВЗА за різних комбінацій паливних завантажень

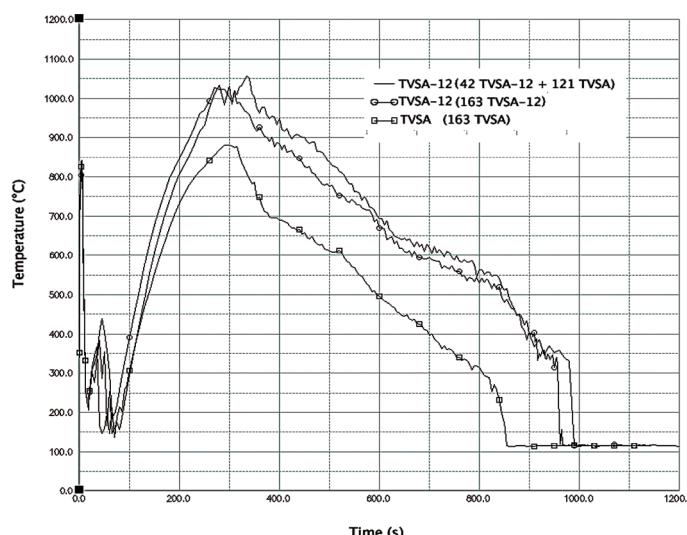


Рис. 4. Максимальна температура оболонки твела для каналу ТВЗА-12 і ТВЗА за різних комбінацій паливних завантажень

121 ТВЗА і 42 ТВЗА-12 або ТВЗ-WR, у другому випадку активна зона повністю завантажується новими ТВЗ. Аналіз проводився порівнянням результатів розрахунків, виконаних на моделі з АкЗ з ТВЗА і на моделі перехідних паливних завантажень.

Границі 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 ТВЗА + 42 ТВЗ-WR, або ТВЗА-12), а саме: 1099 °C — для каналу ТВЗ-WR (рис. 3) і 1058 °C — для каналу ТВЗА-12 (рис. 4).

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

У разі переведення реакторної установки на однорідне паливо, або ТВЗ-WR, або ТВЗА-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 ТВЗ. Даний факт є визначальним для отримання дозволу на використання інших типів ТВЗ у змішаних паливних завантаженнях.

## Висновки

У статті наведено результати теплогідравлічного аналізу змішаних активних зон, що складаються з палива ТВЗА і ТВЗА-12, а також ТВЗА і ТВЗ-WR.

Зміна умов охолодження ТВЗ внаслідок перерозподілу потоку теплоносія в активній зоні викликана різними значеннями гідралічного опору. Хоча коефіцієнти гідралічного опору нових типів ТВЗ 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 ТВЗ (ТВЗА-12 і ТВЗ-WR), з теплогідравлічної точки зору, придатні для використання на АЕС України з реакторними установками типу ВВЕР-1000.

## Список використаної літератури

1. Звіт про науково-дослідну роботу: Розробка багатоцильової теплогідравлічної моделі ЯПВУ із ВВЕР-1000/320. Деталізація основних компонентів моделі / ДНТЦ ЯРБ; керівник О. Р. Кочар'янц; викон. С. В. Чорнобай, Ю. Ю. Воробйов. — К., 2010. — 788 с. — № держреєстрації 0109U008229.
2. Предварительный отчет по обоснованию безопасности использования упрощенной конструкции ТВС компании «Вестингауз» на энергоблоке № 3 ЮУАЭС. — Кн. 1. Ред. 0/ ННЦ ХФТИ. ЦПАЗ. — Харьков, 2014. — 279 с. — Изв. № 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-W и ТВС-WR 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 закризисного течения.

плообмена при аналізі проектних аварій для реакторів типу ВВЭР-1000 / Ю. Ю. Вороб'єв, О. І. Жабін, І. А. Терещенко // Ядерна та радіаційна безпека. — 2014. — № 4 (64). — С. 17–21.

## References

1. Kocharyants, 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 bahatotsiliovoi teplohidravlichnoi 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 obosnovaniyu bezopasnosti ispolzovaniia uprochnionnoi konstruktsii 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 [Pravila 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 dlja 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 tsirkuliatsionnogo nasosa i uchiat zakrizisnogo teploobmena pri analize proektnykh avariiv dlja reaktorov tipa VVER-1000], Nuclear and Radiation Safety, No. 4 (64), pp. 17–21. (Rus)

Отримано 09.12.2015.