

УДК 621.039.51

АНАЛИЗ ПО ОПЫТУ ЭКСПЛУАТАЦИИ СМЕШАННЫХ АКТИВНЫХ ЗОН
АНАЛІЗ З ДОСВІДУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗМІШАНИХ АКТИВНИХ ЗОН
ANALYSIS OF EXPLOITATION EXPERIENCE OF MIXED REACTOR CORE

Научный руководитель – кафедра атомных электрических станций; доцент, канд. физ.-
мат. наук - Зотеев О.Е., магистр – Рябуха И.В.

Науковий керівник - кафедра атомних електричних станцій; доцент, канд.фіз.-мат наук -
Зотеев О.Є., магістр – Рябуха І.В.

Supervisor - department of nuclear power plant; associate professor, doctor –
Zotееv O.E., master –Ryabukha I.V.

Аннотация. Объектом исследования статьи была тепловыделяющая сборка компании «Вестингауз» (ТВС-WR).

Была рассмотрена тепловыделяющая сборка альтернативная (ТВСА). Проведено её сравнение с тепловыделяющей сборкой компании «Вестингауз» (ТВС-WR).

Также в статье был рассмотрен опыт эксплуатации смешанных активных зон ядерных энергетических реакторов, при одновременном использовании ТВСА и ТВС-WR.

Ключевые слова: ТВСА, ТВС-WR, смешанная активная зона, ТВЭЛ, безопасная эксплуатация, проектные условия работы РУ.

Анотація. Об'єктом дослідження статті була тепловиділяюча збірка компанії «Вестінгауз» (ТВЗ-WR).

Була розглянута тепловиділяюча збірка альтернативна (ТВЗА). Проведено її порівняння з тепловиділяючою збіркою компанії «Вестінгауз» (ТВЗ-WR).

Також в статті було розглянуто досвід експлуатації змішаних активних зон ядерних енергетичних реакторів, при одночасному використанні ТВЗА і ТВЗ-WR.

Ключові слова: ТВЗА, ТВЗ-WR, змішана активна зона, ТВЕЛ, безпечна експлуатація, проектні умови роботи РУ.

Annotation. The object of the article was the Westinghouse fuel assembly (FA-WR).

An alternative fuel assembly (FAA) was considered. It was compared with Westinghouse fuel assembly (FA-WR).

The article also considered the experience of operating mixed reactor core of nuclear power reactors, while using FAA and FA-WR.

Key words: FAA, FA-WR, mixed reactor core, fuel element, safe operation, design operating conditions of the reactor facility.

Тепловиділяючі збірки (ТВЗ) ядерного реактора - це основний технологічний компонент активної зони ядерного енергетичного реактора, що містить в єдиній збірці ядерні матеріали, бар'єри захисту і пристрої теплообміну, призначені для отримання теплової енергії в ядерному реакторі за рахунок здійснення контрольованої ядерної реакції. Базовим компонентом ТВЗ є тепловиділяючий елемент (паливний елемент ядерного реактора) ТВЕЛ - конструктивний елемент ядерного реактора, в якому відбувається процес поділу або ділення і відтворення ядерного пального.

Конструкція ТВЕЛ повинна бути стійкою проти зміни розмірів сердечника під впливом опромінення, нагрівання та інших факторів. ТВЕЛи об'єднуються в реакторах в

групи, утворюючи ТВЗ або касети. Загальне завантаження активної зони для реактора ВВЕР-1000 складає 163 ТВЗ (близько 80 тон паливного діоксиду урану). Необхідною властивістю ТВЗ є їх уніфікація, тобто можливість їх завантаження в активну зону, планового переміщення по її обсягу, видалення звідти в міру вигорання і заміни на свіже паливо без зміни конструктивних параметрів активної зони.

Аналіз умов і експлуатаційного досвіду російських і зарубіжних ТВЗ в активних зонах водо-водяних реакторів, а також результатів післяреакторних досліджень ТВЗ, які відпрацювали показав, що формозміни, що призводить до аномалій в роботі ПС СУЗ, є наслідком цілого ряду факторів конструктивного, технологічного та експлуатаційного характеру. До них, зокрема, відносяться:

- нерівномірність виділення енергії, потоку нейтронів по радіусу та висоті ТВЗ;
- нерівномірність вигорання і подовження ТВЕЛів;
- розкид зусиль затиску ТВЕЛів в дистанціонуючих решітках (ДР);
- значні осьові зусилля, діючі на ТВЗ від притискних пружин;
- сильна залежність стійкості ТВЗ без чохла від жорсткості пучка ТВЕЛів, яка визначається величиною натягу в системі "ТВЕЛ - центр ДР" і знижується в процесі роботи ТВЗ через "всихання" ТВЕЛів.

ТВЗА для реакторів ВВЕР.

Тепловиділяюча збірка реактора ВВЕР-1000 є активною конструкцією з 312 твелів, 18 напрямних каналів, 15 дистанціонуючих і однієї нижньої решіток. На Рис.1 представлений загальний вид ТВЗА : умовно показана частина дистанціонуючих решіток та не відображено частину твелів по висоті (для візуалізації напрямних каналів).

Кінцеві деталі ТВЗА служать для фіксації касети в настановних гніздах активної зони. Верхня кінцева деталь (головка) забезпечує взаємодію з внутрішньокорпусних пристроїв реактора і утримування ТВЗ від спливання, а також роз'ємне з'єднання з каркасом ТВЗ. Нижня кінцева деталь (хвостовик) забезпечує задане розташування касети в активній зоні, а також організацію протоку теплоносія.

На енергоблоках ВВЕР-1000 АЕС України, АЕС Болгарії та на Калінінській АЕС експлуатується ядерне паливо - ТВЗА. Головною відмінною рисою конструкції ТВЗА є наявність постійно діючого силового каркаса (15 ДР, 6 куточків жорсткості), застосування якого забезпечує необхідну згинальну жорсткість, що не змінюється при експлуатації, і геометричну стабільність паливної збірки за весь період служби в активних зонах ВВЕР-1000.

Така конструкція ТВЗА при проектній експлуатації забезпечує мінімальні вигини і скручування ТВЗА в умовах роботи в активній зоні з паливним циклом 4х1 рік. Розрахунки формозміни ТВЗА показали, що прогин, який надано їй за рахунок внутрішніх і зовнішніх впливів на протязі 4 років не перевищує 6 мм, а кут скручування практично відсутній (менше 1°), що підтверджено досвідом експлуатації на енергоблоках блоках ВВЕР-1000.

Тривала робота ТВЗА показала, що зусилля підтискання ТВЗА від пружинного блоку забезпечують її стабільну поведінку і характеристики. Тому першочерговим завданням цього аналізу було розгляд можливості стискання ТВЗА і його вплив на поведінку ТВЗА, а так само заходи щодо виправлення а.з. реактора в цілому. Припущення про перетискання ТВЗА в окремих осередках а.з. на енергоблоках Південно-Української АЕС розглядається як прояв несприятливого складання допусків.

Найбільше значення осьового навантаження на ТВЗА відбувається з боку БЗТ,

враховуючи найбільше стиснення пружин в голівці ТВЗА (причина - різні значення коефіцієнта температурного розширення сталевго корпусу реактора і цирконієвих матеріалів в ТВЗА).

Можлива міра по боротьбі з стисканням і як наслідок з формозміною ТВЗА, що призводить до "затирання" ТВЗА на енергоблоках АЕС - доробка БЗТ шляхом підрізування платиків, дані рекомендації за величиною доопрацювання платиків БЗТ в сторону зменшення підтискання ТВЗА в активній зоні зі збереженням запасу на їх спливання. Перетискання (або завищене підтискання) є ефективним фактором впливу на формозміну ТВЗА в активній зоні, збільшення зусиль взаємодії між собою.

Також непрямыми причинами підвищених зусиль "затирання" ТВЗА при ТТО є:

- неспіввісність захвату перевантажувальної машини або секцій робочої штанги;
- відхилення від вертикалі опорної стакану. Можлива міра по боротьбі із затиранням - доопрацювання РШ МП.

При різних умовах стискання, проведено аналіз формозміни (вигину) ТВЗ, на основі якого виробляють вимоги щодо зниження зусиль (вимоги за величиною підрізування платиків) пружинного блоку.

На сьогодні ТВЗА експлуатується на 20 енергоблоках ВВЕР-1000: 4 блоках КЛНАЕС, 2 блоках АЕС "Темелін", 2 блоках АЕС "Козлодуй" і 12 блоках України. Впровадження ТВЗА на АЕС України почалося в 2003 році з енергоблоку №3 Запорізької АЕС.

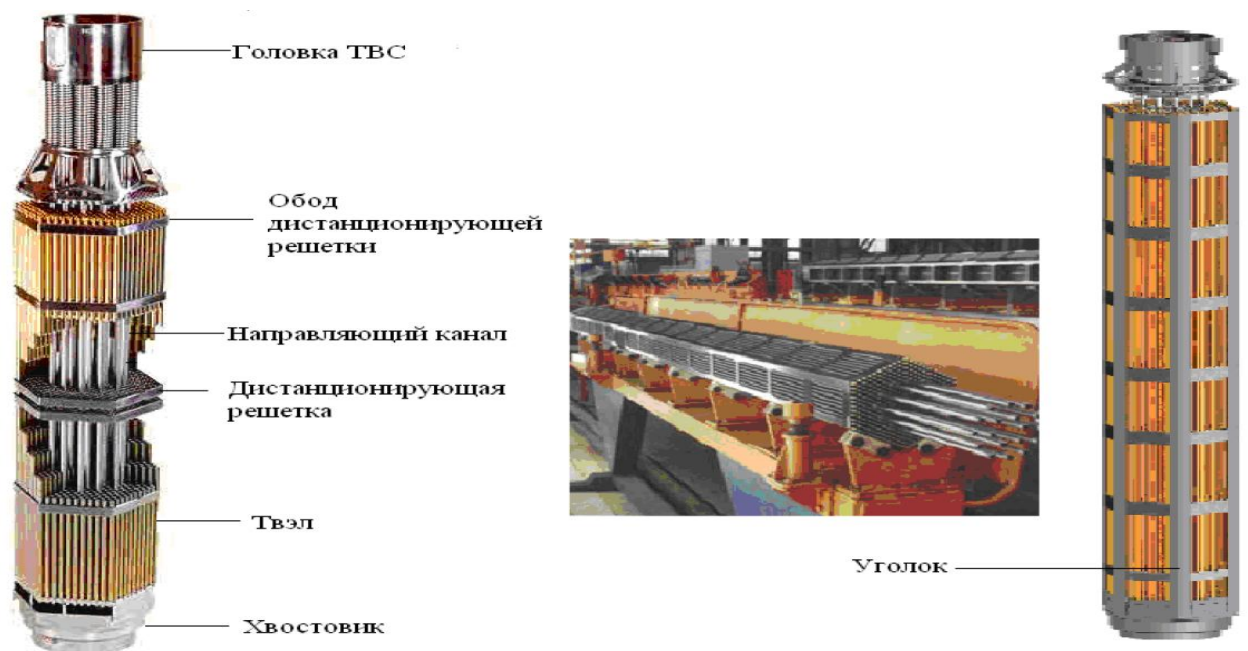


Рис. 1 Загальний вигляд тепловиділяючої збірки ТВЗА

Впровадження ТВЗ компанії «Вестінгауз»

ТВЗ компанії «Вестінгауз» почали експлуатуватися на енергоблоці №3 ВП ЮУАЕС з 2005 року, коли 6 дослідних ТВЗ були завантажені в активну зону в складі 17-ї паливного завантаження. Зараз на 3-му блоці ВП ЮУАЕС проходить експлуатація повного складу касет виробництва "Вестінгауз", виготовлених з "Технічними умовами на ТВЗ компанії «Вестінгауз».

За результатами досвіду експлуатації палива виробництва «Вестінгауз» на АЕС "Темелін", з метою створення достатнього запасу по міцності каркаса ТВЗ-W посилено кріплення середніх дистанціонуючих решіток до напрямних каналів без зміни гідравлічних характеристик ТВЗ-W. Перенесення компанією «Вестінгауз» виробництва ТВЗ-WR з заводу в Коламбії (США) на завод в Вастерас (Швеція), який використовує (на відміну від заводу в Коламбії) в якості вигораючого поглинача оксид гадолінію і дещо інші методи контролю виробництва, а також посилення в конструкції ТВЗ кріплення середніх дистанціонуючих решіток до напрямних каналів викликали необхідність перегляду технічних умов на ТВЗ-WR і випуску нової редакції ТУ.

Подальше розширення дослідної експлуатації ТВЗ-WR на енергоблоках з реактором ВВЕР-1000 (тип В-320, В-338) буде виконуватися із застосуванням конструкції по ТУ "Технічні умови на ТВЗ компанії «Вестінгауз» для реактора ВВЕР-1000.

Метою рішення є диверсифікація джерел постачання ядерного палива на всі енергоблоки АЕС України з ВВЕР-1000 відповідно до Наказу Міненерго України від 24.02.2009 №111 у виконання Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17.12.2009 №1578-р.

Планом "За розширенням дослідної експлуатації палива виробництва компанії «Вестінгауз» на енергоблоках з реакторами ВВЕР-1000" було передбачено розширення дослідної експлуатації палива виробництва компанії «Вестінгауз» в двадцять четвертої паливної кампанії енергоблоку №5 ЗАЕС.

Згідно "Концептуального галузевого технічного рішення", на підставі "Типовою програмою робіт" була розроблена програма робіт "По розширенню дослідної експлуатації палива виробництва компанії «Вестінгауз» на енергоблоці №5 ВП ЗАЕС».

У 21 паливної кампанії енергоблоку №3 ЮУ АЕС завершено перший рік експлуатації 42-х ТВЗ-WR компанії «Вестінгауз». Результати експлуатації 42-х ТВЗ-WR в складі 21 паливної кампанії були позитивні.

Згідно "Концептуального галузевого технічного рішення" на енергоблоці №5 ЗАЕС, в 24 паливної кампанії, планувалося розпочати дослідну експлуатацію ТВЗ-W.

У розділі "Механічне проектування" ("Обґрунтування безпеки використання ТВЗ компанії «Вестінгауз» на енергоблоці №5 ЗАЕС") виконано обґрунтування працездатності твелів і твегів ТВЗ-W в 24-27-й паливних кампаніях і стаціонарному паливному циклі для НЕ і ПНЕ. Розрахунковий аналіз виконаний з використанням консервативних припущень з експлуатаційним параметрам РУ, конструкційними параметрами твелів/твегів і розрахункових моделей. Проведені розрахунки показали достатню теплофізичну, корозійну, деформаційну, міцнісну і вібраційну надійність тепловиділяючих елементів ТВЗ-W.

У розділі "Теплогідравлічний аналіз змішаних активних зон в стаціонарних режимах нормальної експлуатації" ("Обґрунтування безпеки використання ТВЗ компанії «Вестінгауз» на енергоблоці №3 ЮУ АЕС") показано, що в стаціонарних режимах нормальної експлуатації РУ забезпечується виконання проектних критеріїв охолодження твелів і твегів в ТВЗ-W і ТВЗА, встановлених в активну зону 24-27-й паливних завантажень. Є запас до кризи тепловіддачі в найбільш теплонапружених каналах ТВЗ-W і ТВЗА. Критерій не всплиття ТВЗ-W і ТВЗА під впливом потоку теплоносія в змішаній активній зоні виконується. Є запас до закінчення ПС СУЗ спільно зі штангою СУЗ для активної зони, що повністю складається з ТВЗ-W.

У розділі "Ядерна безпека при поведженні з ТВЗ компанії «Вестінгауз» показано, що при поведженні з ТВЗ-W в БВ енергоблоку №3 ЮУ АЕС виконується вимога

Кефф <0.95 як для нормальної експлуатації, так і для аварійних ситуацій при виконанні необхідних компенсуючих організаційно технічних заходів.

Для контролю за експлуатацією активної зони, що містить ТВЗ-W/WR, використовуються робочі станції ПС 5120 СВРК-М. Основним завданням системи внутрішнього реакторного контролю є видача достовірної оперативної інформації про об'ємний розподіл полів енерговиділення, середньозваженої теплової потужності, температури та інших тепло- гідравлічних і нейтронно-фізичних параметрів активної зони і реакторної установки в цілому при експлуатації енергоблоку.

Робочі станції ПС 5120 є верхнім рівнем СВРК-М і забезпечують контроль стану активної зони і теплоносія першого і другого контурів при експлуатації реакторної установки в енергетичному діапазоні потужності шляхом збору, обробки, архівації та подання інформації оператору блочного щита управління.

На енергоблоці №3 ЮУ АЕС після завершення експлуатації 6-ти "пілотних" ЛТА - ТВЗ-W компанії «Вестінгауз» наявні результати експлуатації "пілотних" ЛТА - ТВЗ-W в складі 17-20 паливних завантажень РУ енергоблоку №3 позитивні:

- видимого свідчення порушення цілісності оболонок твелів і інших елементів ТВЗ-W не виявлене. Не виявлено видимих пошкоджень або непроектних положень окремих компонентів ТВЗ-W, які могли б привести до зачеплення з компонентами активної зони, що з'єднуються обладнанням або пристроями для поводження з ТВЗ;
- величини зусиль затірки дослідних ТВЗ-W при установках в активну зону і вивантаженнях з активної зони реактора не перевищували величини 75 кгс;
- максимальна різновисотних ТВЗ-W, виміряна перед вивантаженням з активної зони складала 5, 4, 2 і 1 мм після першого, другого, третього і четвертого року експлуатації відповідно;
- за результатами КМО твели всіх 6-ти опитаних ТВЗ-W після кожного з перших трьох років експлуатації були визнані герметичними. Одна ТВЗ-W після четвертого року експлуатації визнана умовно негерметичною за критерієм По.
- величини зусиль затірки ПС СУЗ для всіх досліджених ТВЗ-W нижче регламентного значення 4 кгс;
- час падіння ОР СУЗ в ТВЗ-WR знаходиться в межах 1.68 - 1.80 секунд і задовольняє регламентним вимогам.

Для всіх енергоблоків АЕС України з ВВЕР-1000 повинні бути можливі паливні завантаження, як на базі резидентної палива типу ТВЗА, так і на базі альтернативного палива конструкції ТВЗ-W, виготовленого згідно ТУ, що включає зміни, внесені в конструкцію "пілотної" ЛТА, - ТВЗ-W, виготовленої по ТУ:

- використання в якості вигорить поглинач гадолінію замість напилюваного на паливні таблетки диборида цирконію;
- установка по довжині паливного стовпа тринадцятих дистанціонуючих решіток (ДР) з цирконієвого сплаву і 1-й ДР з нержавіючої сталі замість 2-х ДР з цирконієвого сплаву і 12-ї ДР з нержавіючої сталі;
- кріплення середніх ДР до напрямних каналів (НК) методом розвальцьовування втулок ДР і НК знизу і зверху ДР замість кріплення ДР тільки з одного боку, що значно підвищує згинальну жорсткість каркаса до величини, достатність якого підтверджено досвідом експлуатації модернізованих ТВЗ VVANTAGE після впровадження подвійного розвальцьовування на АЕС "Темелін".

Згідно з результатами випробувань бічна жорсткість каркаса ТВЗ-WR переважувальної партії в результаті використання подвійного розвальцьовування

втулок ДР приблизно в три рази перевищує бічну жорсткість каркаса пілотних LTA - ТВ3-W (в яких ДР кріпляться до напрямних каналів і центральної труби розвальцюванням втулки з одного боку - знизу), і її можна порівняти з бічною жорсткістю каркаса модернізованих ТВ3 VVANTAGE - 6.

Надійність конструкції ТВ3-WR з внесеними змінами в безпеку експлуатації підтверджуються відповідними обґрунтуваннями та додатковими розрахунковими дослідженнями експертів.

На енергоблоці №5 ВП ЗАЕС планувалося завантаження в активну зону реактора 42 ТВ3-WR виробництва компанії «Вестингауз». У двадцять четвертий паливну кампанію в активній зоні реактора енергоблоку №5 передбачалася експлуатація 42 ТВ3-WR і 121 ТВ3А виробництва корпорації "ТВЕЛ". Після проведення перехідних завантажень, вся активна зона може складатися з ТВ3-WR.

ТВ3-WR відрізняються від експлуатованих в даний час ТВ3А за такими параметрами:

- початкове збагачення по U235;
- наявність осьових Бланкет - паливних таблеток з природним збагаченням по U235, розташованих у верхній і нижній частинах паливного стовпа, довжиною близько 15 см з кожного боку;
- маса палива в касеті;
- відсутність центрального отвору в паливних таблетках;
- гідравлічний опір касети.

Перераховані особливості змішаних паливних завантажень з ТВ3-W/WR і ТВ3А пред'являють підвищені вимоги до розрахунку та контролю параметрів активної зони, що здійснюється СВРК-М, як з точки зору опису нейтронно-фізичних характеристик (НФХ) ядерного палива, так і з точки зору характеристик обробної апаратури СВРК-М.

Використання змішаних завантажень палива

Досвід останніх років показав, що за наявності абсолютно точного і вичерпного обґрунтування безпечної експлуатації якого-небудь виду палива, їх змішане використання обов'язково знайде некоректні точки зіткнення. Суть полягає в тому, що і "ТВЕЛ" і "Вестингауз", обґрунтовували безпечне використання власного палива документально, обов'язково вказують, що ці оптимальні характеристики досягаються за умови використання одного(свого) виду палива в а.з. І це правильно, хоч би з точки зору того, що розрахувати параметри поведінки складок в змішаній зоні, де можуть знаходитися два або три види палива, та ще і з різних конструкційних матеріалів, дуже складно в силу наявності нескінченно багато чого кількості варіантів і початкових даних.

Досвід показав, ці точки зіткнення мають місце бути і головне завдання - знайти причини оних подій, щоб уникнути їх повторення і розвитку в майбутньому. До головних базових причин конфлікту використання змішаного циклу можна імовірно віднести:

- різні конструкційні матеріали (матеріал складання)
- недостовірність обґрунтування безпечної експлуатації того або іншого виробник
- відсутність досвіду в достатньому об'ємі по експлуатації змішаного циклу
- фізичні і механічні погіршеності складок від того або іншого виробника.

Уставка безпечного зусилля затирання у ТВ3-WR - 150 кг, у ТВ3А - 300 кг. Конструкція ТВ3А посилена куточками, що припускає велику жорсткість і стійкість конструкції, яка і забезпечує велику уставку по зусиллю затирання, але, по зверненню до деяких джерел і спілкування з експертами, складається думка, що це не зовсім так, а, швидше, навіть навпаки.

Варто пам'ятати, що зусилля затирання практично нівелює міжкасетний проміжок. Саме це явище передбачає різні види взаємодії граней і інших елементів складання з суміжними. В результаті, можуть виникнути наступні види взаємодія:

- хвостовик - плита голівки
- хвостовик – ДР
- ДР - ДР

Розгляд взаємодії Хвостовик - Хвостовик не представляє цінності, тому як уставки по обмеженню зусилля затирання для цих елементів досить високі і досі не досягалися в процесі перевантажень в силу відсутності потреби.

В даному випадку найбезпечнішою може вважатися взаємодія ДР-ДР при ефекті «провисання».

Досвід експлуатації змішаних циклів показав свою дорожнечу і проблемність.

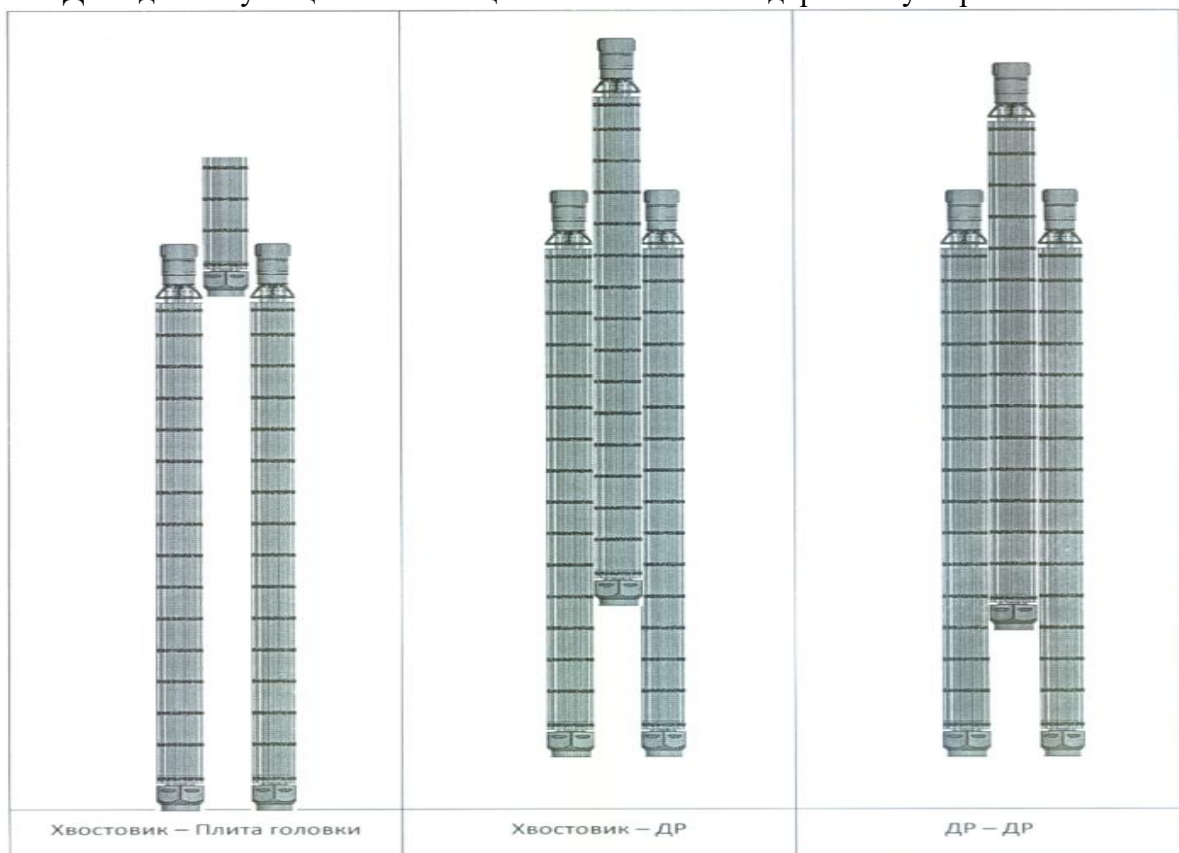


Рис. 2 Види взаємодії ТВЗ при завантаженні.

Прийнято вважати, що ТВЗ-WR програє своєму конкурентові з силу меншої надійності і надійності матеріалів, проте досвід показав, що саме ТВЗ-WR, з найпершого постачання пілотних 6-ти касет, на ЮУ АЕС не мала ні єдиної негерметичної касети по дослідженнях КГО, у відмінності від ТВЗА(1-2 в рік); "рівність" конструкції складання ТВЗ-WR, вище, ніж у конкурента і їх практично не «веде», чого не можна сказати про ТВЗА.

Проте, закладаючи ті або інші якості складок, виробники підкріплюють його конструкційно і матеріально, оцінюючи надійність і безпеку різних складок, окремо кожній, спираючись на технічну документацію, можна упевнено припускати їх безпечну експлуатацію.

Висновки

Змішана зона, як перехідний етап у процесі зміни виробника ядерного палива для проектів діючих РУ АЕС України, або ж як результат диверсифікації із постійним використанням змішаних активних зон є прийнятним процесом.

При умові проведення точних розрахунків, розробки програм, регламентів, норм і стандартів використання змішані зони виконують усі вимоги безпечної експлуатації, не порушують проектних умов роботи РУ у стаціонарних режимах і режимах порушення нормальної експлуатації.

Аналіз роботи змішаних зон показав надійність і прогнозованість їх експлуатації і відповідність усім діючим вимогам безпеки.

Список використаної літератури

1. Рижов С. Б., Кобелев С., Кушманов С. А. та ін. Попередній звіт по обґрунтуванню безпеки АЕС. Балаковская АЕС, 5 блок
2. Денисов В. П., Драгунов Ю. Г. Реакторні установки ВВЕР для атомних електростанцій. М.: Видавництво., 2002. - 480 с.
3. Попикін А. І., Бродкін Е. Б. та ін. Програма WIMS-D на ЕОМ ЄС-1040. - М.: Інститут атомної енергії ім. І.В. Курчатова, 1979.
4. Самойлов О. Б., Усинін Г. Б., Бахметьев А. М. Безпека ядерних енергетичних установок. - М.: Вища школа, 1989.
5. Ганев І. Х. Фізика і розрахунок реактора: Учеб.пособие для вузів / під заг. ред. Н.А.Долежала. - 2-е изд., Перераб. і доп. М.: Вища школа, 1992. 496 с., іл.
6. Кавун О. Ю. САПР галузі. Програми та програмні комплекси, що застосовуються при конструюванні ЯЕУ. Приклади кінцево-різницевих схем. Навчальний посібник. М.: Изд-во МГТУ, 2004. - 99 с., іл.
7. Звіт «Програма WIMS - D на ЕОМ ЄС-1040. Тема: 1-05-06-03 / 01-3 (Н5-721). М.: Російський науковий центр «Курчатівський інститут», 1979.
8. Конструювання ядерних реакторів: учб. посіб. для вузів / І. Я. Ємельянов, В. І. Михан, В. І. Солонін ; за заг. ред. акад. Н.А. Долежала. М.: Енергоіздат, 1982. - 400 с., іл.

Зотеев Олег Евгениевич,
Зотеев Олег Євгенович,
Zoteev Oleg,
Рябуха Иван Валериевич,
Рябуха Іван Валерійович,
Ryabukha Ivan.