

В. Б. Крицький¹, В. В. Муха¹, А. В. Носовський²,
Т. В. Підгаєцький¹, О. С. Погонєць¹

¹Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки, м. Київ, Україна

²Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ, Україна

Огляд загальних аспектів використання різних типів тепловидільних збірок у змішаних паливних завантаженнях ВВЕР-1000

Аналізується досвід застосування на енергоблоках АЕС України змішаних паливних завантажень (таких, що передбачають одночасне використання в активній зоні реакторних установок тепловидільних збірок, які відрізняються конструктивно та/або паливною складовою). Аналіз виконано за результатами реалізації першого етапу програми досліджень, у рамках якої передбачено поглиблений розгляд питань комплексного аналізу безпеки змішаних завантажень у частині теплогідрравлічних, нейтронно-фізичних і механіко-міцнісних аспектів експлуатації ядерного палива. Сформульовано завдання, виконання яких забезпечить досягнення мети зазначеної програми досліджень.

Ключові слова: змішане паливне завантаження, ядерне паливо, тепловидільна збірка, досвід експлуатації, теплогідрравлічний аналіз, нейтронно-фізичний аналіз, механіко-міцнісний аналіз.

В. Б. Крицький, В. В. Муха, А. В. Носовський, Т. В. Подгаецкий, А. С. Погонєць

Обзор общих аспектов использования разных типов тепловыделяющих сборок в смешанных топливных загрузках ВВЭР-1000

Анализируется опыт применения на энергоблоках АЭС Украины смешанных топливных загрузок (предусматривающих одновременное использование в активной зоне реакторных установок тепловыделяющих сборок, отличающихся конструктивно и/или топливной составляющей). Указанный анализ выполнен по результатам реализации первого этапа программы исследований, в рамках которой предусмотрено углубленное рассмотрение вопросов комплексного анализа безопасности смешанных топливных загрузок в части теплогидравлических, нейтронно-физических и механико-прочностных аспектов эксплуатации ядерного топлива. Сформулированы задачи, выполнение которых обеспечит достижение цели упомянутой программы исследований.

Ключевые слова: смешанная топливная нагрузка, ядерное топливо, тепловыделяющая сборка, опыт эксплуатации, теплогидравлический анализ, нейтронно-физический анализ, механико-прочностной анализ.

© В. Б. Крицький, В. В. Муха, А. В. Носовський, Т. В. Підгаєцький, О. С. Погонєць, 2016

Атомна енергетика посідає одне з провідних місць у забезпеченні людства енергією та є однією з найбільш екологічно чистих. Але в разі недотримання умов безпечної експлуатації атомних електростанцій можливе виникнення низки загроз з наслідками світового масштабу, прикладом чого є аварії на АЕС «Три-Майл-Айленд» [1], на Чорнобильській АЕС [2] і на АЕС «Фукусіма-Даїчі» [3]. Відповідно, державні органи, а також експлуатуючі організації (ЕО) АЕС країн з розвинутою атомною енергетикою вважають пріоритетним розгляд питань і впровадження заходів з оцінки, обґрунтування і забезпечення безпеки ядерних установок.

На поточному етапі розвитку атомної енергетики в Україні перед ЕО постала нова актуальна проблема — забезпечення безпеки використання змішаних паливних завантажень. Виникнення відповідного комплексу питань спричинено двома передумовами:

1) рішеннями Уряду країни щодо диверсифікації джерел постачання ядерного палива (ЯП) на АЕС України з 2000 року розпочато проект впровадження на АЕС України ЯП виробництва компанії Westinghouse (США);

2) традиційний постачальник ЯП для АЕС України — компанія «ТВЕЛ» (Росія) — з метою підвищення енергоефективності та конструкційної стійкості ЯП постійно вдосконалює проекти тепловидільних збірок (ТВЗ), що введені в експлуатацію, а також розробляє нові модифікації ТВЗ.

На поточний час на енергоблоках АЕС України застосовуються:

- ТВЗ типу *ТВЗА* виробництва компанії «ТВЕЛ» — у режимі промислової експлуатації;

- ТВЗ типів *ТВЗ-W* і *ТВЗ-WR* виробництва компанії Westinghouse — у режимі дослідно-промислової експлуатації;

заплановано застосування (впровадження) ТВЗ типу *ТВЗА-12* виробництва компанії «ТВЕЛ» — у режимі дослідно-промислової експлуатації.

Державні плани впровадження на АЕС України ядерного палива нових модифікацій, зокрема *ТВЗА-12* та *ТВЗ-WR*, обумовлені також необхідністю підвищення економічних показників АЕС і задекларовані документом «Енергетична стратегія України на період до 2030 року» (затверджено наказом Кабінету Міністрів України № 436-п від 27.07.06), наказом Президента України № 156/2008 та стратегією діяльності ДП НАЕК «Енергоатом».

Згідно з вимогами з безпеки [4], впровадження в експлуатацію нових модифікацій ТВЗ (існуючих або нових проектів) здійснюється протягом певного перехідного/адаптаційного періоду поступово, з використання обмеженої кількості модифікованих ТВЗ у складі перевантажувальних партій, тобто в складі проміжних змішаних завантажень.

Метою цієї статті є викладення основних результатів аналізу досвіду застосування на енергоблоках АЕС України змішаних паливних завантажень. Аналіз виконано в рамках першого етапу програми досліджень, яка передбачає поглиблений розгляд питань комплексного аналізу безпеки змішаних завантажень у частині теплогідрравлічних, нейтронно-фізичних і механіко-міцнісних аспектів експлуатації ядерного палива.

Огляд використання змішаних завантажень на АЕС країн з розвинутою атомною енергетикою. Є підстави стверджувати, що наразі найбільший досвід експлуатації змішаних паливних завантажень набутий в Росії. Еволюція палива відбувалася дуже стрімко: в рамках робіт з покращення техніко-економічних характеристик реакторних

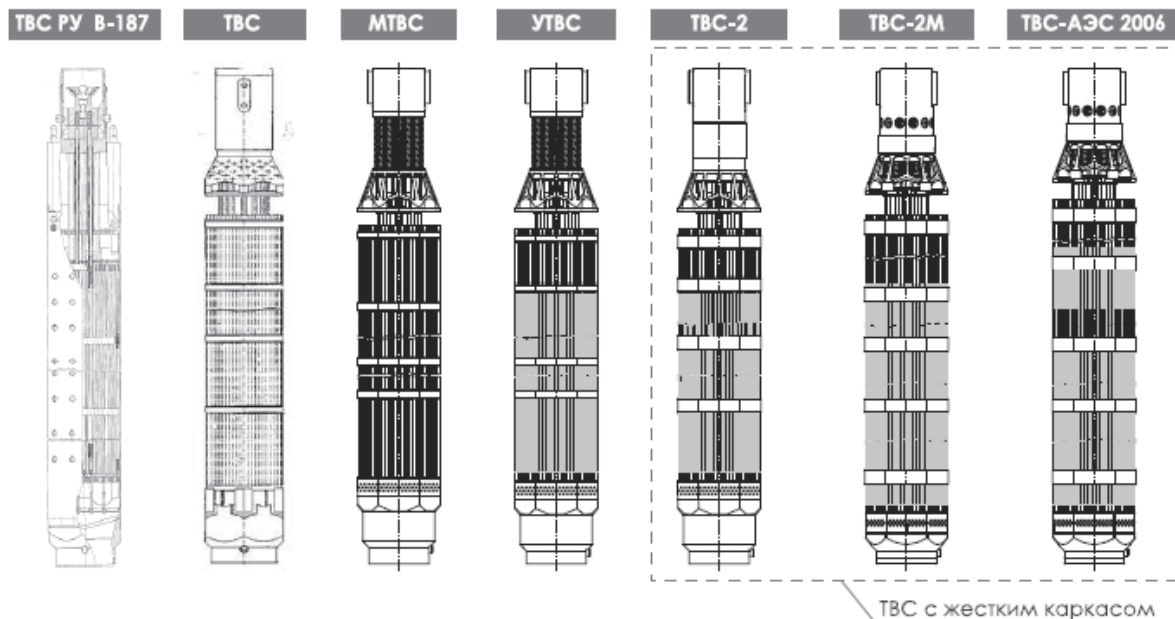


Рис. 1. Модифікації ТВЗ ВВЕР-1000 розробки компанії «ТВЕЛ» [5]

установок (РУ) протягом останніх років розроблено не менше 7 модифікацій ЯП (рис. 1). Усі згадані модифікації ЯП були поступово впроваджені в промислову експлуатацію. Реалізація перехідних паливних завантажень, зокрема, надала можливості для використання в повному обсязі наявних запасів «старого» ЯП (яке надійшло на АЕС до початку формування паливних завантажень з ТВЗ нових модифікацій).

Компанією «ТВЕЛ» були розроблені, зокрема, нові модифікації ЯП: ТВЗ-2 та ТВЗ-2М (для використання на АЕС покоління 3+), АЕС-2006 та ВВЕР-ТОІ [6]. Основні вдосконалення конструкції ТВЗ нових модифікацій (порівняно з попередніми моделями) стосуються використання нових матеріалів для оболонок твелів, дистанційних ґраток, напрямних каналів і центральної труби. Модифікації конструкції ТВЗ вплинули на:

змінення теплогідрравлічних характеристик ТВЗ і активної зони в цілому;

підвищення міцнісних характеристик ТВЗ та опору формозміні як складових елементів ТВЗ, так і ТВЗ у цілому.

Таким чином, основні проблеми впровадження нових модифікацій ТВЗ були пов'язані з теплогідрравлічними та термомеханічними аспектами, оскільки коригування геометричних розмірів ТВЗ обумовило змінення значень коефіцієнтів гідравлічного опору ТВЗ і, відповідно, перерозподіл потоку теплоносія в активних зонах (АкЗ) із змішаними паливними завантаженнями. Попри це, експлуатація російських АЕС довела відсутність негативно впливу реалізованих змішаних паливних завантажень на експлуатаційні показники РУ. При цьому обсяг високо-радіоактивних відходів, пов'язаних з експлуатацією РУ, суттєво зменшився.

Значний досвід експлуатації перехідних змішаних паливних завантажень набуто в Аргентині [7]. Так, АЕС Atucha-1 має важководневий реактор з постійним перезавантаженням ЯП. Для першого завантаження застосовувалося ЯП виробництва компанії SIEMENS-KWU,

але вже у 1983 році в цій країні були вироблені власні ТВЗ. Розробку, аналіз сумісності, кваліфікацію спеціальних технологічних процесів та розрахунки ЯП для змішаних завантажень здійснено науково-дослідними та проектно-конструкторськими організаціями Аргентини.

Зокрема, було розроблено та реалізовано дві пілотні програми, пов'язані з виробництвом палива та обґрунтуванням його безпечної експлуатації. Програми мали на меті забезпечити збільшення вигорання палива та збільшення вмісту урану для подовження терміну експлуатації ЯП в активній зоні. Очікуваним результатом реалізації програм стало зменшення кількості щорічного перевантаження ТВЗ.

На поточний час вже кілька років реактор АЕС Atucha-1 повністю завантажено новим модифікованим ЯП типу SEU. Впровадження змішаного паливного завантаження не супроводжувалась проблемами ні в процесі перезавантаження ЯП, ні в режимах експлуатації модифікованих ТВЗ в АкЗ.

Ще одна країна, яка напруцювала значний досвід експлуатації змішаних паливних завантажень, — Франція. Ця країна має один з найвищих у світі рівнів розвитку атомної енергетики: наразі атомні станції виробляють близько 80 % загального обсягу електроенергії.

На початковому етапі розвитку французької атомної енергетики ТВЗ постачалися лише компанією FRAMATOME (на даний час — компанія AREVA). Із 1993 року на французьких реакторах також використовувались ТВЗ типу НТР виробництва компанії SIEMENS (Німеччина). Після здійсненої компанією EDF реструктуризації діяльності атомних електростанцій ТВЗ типу НТР постачає компанія AREVA.

У 1996 році близько 90 % завантажених ТВЗ вироблялись FRAMATOME, інші 10 % надходили від компанії SIEMENS [8].

На даний час французька енергогенеруюча компанія EDF (Électricité de France) забезпечує свої АЕС ядерним паливом, співпрацюючи з двома постачальниками ТВЗ.

При цьому різноманітність конструктивних рішень ТВЗ збільшується, що певною мірою обумовлено конкуренцією між постачальниками. Водночас, наявність кількох постачальників ЯП надає можливість заміни постачальника в разі виникнення проблем, пов'язаних з надійністю та безпекою експлуатації ЯП.

Внаслідок реалізації зазначеної політики диверсифікації постачання ЯП відбулось збільшення кількості використовуваних типів ТВЗ, а також обсягу перехідних змішаних паливних завантажень. Змішані паливні завантаження стали фактично типовим явищем для АкЗ реакторів французьких АЕС.

Зокрема, в 2011 році змішані паливні завантаження мали місце на 70 % загальної кількості реакторів (58). Того року в реактори PWR-900, PWR-1300 і PWR-1450 були завантажені ТВЗ п'яти, шести і двох типів, відповідно. Більшість із змішаних паливних завантажень (81 %) мали у своєму складі лише два типи ТВЗ [9], 17 % завантажень склалися з трьох типів ТВЗ, а 2 % активних зон були утворені чотирма модифікаціями ТВЗ.

Співвідношення різних типів ТВЗ у складі одного змішаного паливного завантаження змінювалося: для АкЗ із двома типами ТВЗ — від 99:1 до 50:50, для АкЗ із трьома типами ТВЗ — від 50:25:25 до 98:1:1.

За останні 20 років у зв'язку з впровадженням компанією EDF політики диверсифікації постачальників ЯП практика застосування змішаних паливних завантажень на французьких реакторах PWR отримала стрімкий розвиток. Як наслідок, технологія експлуатації змішаних АкЗ, які вважалися перехідними два десятиріччя тому, набула статусу типової (штатної).

Особливо актуальним для України є досвід Чехії, пов'язаний з експлуатацією, починаючи з 2000 року, в реакторі ВВЕР-1000 АЕС «Темелін» ТВЗ VVANTAGE-6 виробництва компанії Westinghouse. Зокрема, у грудні 2004 року під час планових випробувань (вимірів часу падіння ОР СУЗ) було зафіксовано неповне введення ОР СУЗ у напрямні канали (НК). Таку подію, за результатами розслідування, спричинила певна формозміна конструкції ТВЗ внаслідок недостатньої її поперечної жорсткості, що обумовило надмірний вигин напрямних каналів ТВЗ. З метою усунення ефекту «зависання ПС СУЗ у НК» компанія Westinghouse вжила заходів з модифікації конструкції ТВЗ, які забезпечили підвищення стійкості ТВЗ до формозміни.

За результатами випробувань, викладеними в [10], поперечна жорсткість каркаса ТВЗ, підсиленого подвійним розвальцюванням втулок кріплення дистанційних ґраток (ДГ) до НК, збільшилася в 3,5 раза порівняно з поперечною жорсткістю каркаса дослідних ТВЗ-W і на 30 % порівняно з поперечною жорсткістю ТВЗ-W перевантажувальних партій.

Досвід впровадження змішаних паливних завантажень в Україні. В Україні ДП НАЕК «Енергоатом» послідовно реалізує комплекс заходів щодо диверсифікації джерел постачання ЯП. Відповідний проект було розпочато підписанням 05.06.2000 Виконавчої угоди між урядами України та США стосовно реалізації «Проекту кваліфікації ядерного палива для України», реалізація якого відбувалась за такими етапами:

- етап I (2000—2004) — розробка проекту, технічної документації, обґрунтування безпеки (зокрема, виконання розрахунків, випробувань, експериментів), виготовлення і постачання на енергоблок № 3 Южно-Української АЕС шести пілотних ТВЗ-W;

- етап II (2005—2009) — дослідно-промислова експлуатація на енергоблоці № 3 Южно-Української АЕС шести пілотних ТВЗ-W протягом чотирьох паливних кампаній;

- етап III (з березня 2010 року) — початок дослідно-промислової експлуатації на енергоблоці № 3 Южно-Української АЕС 42-х ТВЗ-W перевантажувальної партії.

У березні 2008 року між ДП «НАЕК «Енергоатом» та компанією Westinghouse Electric Sweden AB (м. Вестерос, Швеція), яка є партнером компанії Westinghouse, укладено контракт на постачання ЯП для щорічного перезавантаження АкЗ трьох енергоблоків АЕС України з РУ ВВЕР-1000. Ці ТВЗ почали використовуватися в 2011 році.

У 2010 році 42 ТВЗ компанії Westinghouse (перевантажувальна партія) були завантажені в АкЗ енергоблока № 3 Южно-Української АЕС. Підставою для такого рішення став позитивний досвід експлуатації шести тестових ТВЗ Westinghouse протягом чотирьох паливних кампаній (етап II «Проекту кваліфікації ...»). При цьому обсяг документів з обґрунтування безпечної експлуатації перевантажувальної партії ТВЗ-W, зважаючи на розвиток та впровадження нових методів дослідження та 3D комп'ютерних розрахункових кодів, значно перевищив обсяг документів з обґрунтування безпеки експлуатації пілотних ТВЗ-W.

У 2012 році під час перезавантаження палива на енергоблоках №№ 2, 3 Южно-Української АЕС були зареєстровані механічні пошкодження дистанційних ґраток (ДГ) ТВЗ-W. За результатами розслідування умов і наслідків цієї аварійної події зроблено висновки про проектні недоліки конструкції ТВЗ-W, зокрема про її недостатню згинальну (поперечну) жорсткість. Для збільшення жорсткості конструкції ТВЗ-W компанія Westinghouse здійснила певні модернізації ТВЗ. Модифіковані збірки (ТВЗ-WR) успішно пройшли випробування.

У 2012—2013 роках ТВЗ-W в активну зону реакторів енергоблоків АЕС України з РУ ВВЕР-1000 не завантажувались у зв'язку з реалізацією компанією Westinghouse (розробником проекту ТВЗ-W) заходів з удосконалення (підсилення) конструкції ТВЗ і створення нової модифікації ТВЗ — ТВЗ-WR.

У вересні 2014 року Держатомрегулювання України погодило Технічне рішення ДП НАЕК «Енергоатом» щодо дослідно-промислової експлуатації на енергоблоці № 3 Южно-Української АЕС ЯП типу ТВЗ-WR, конструкція якого має підвищену (порівняно з ТВЗ-W) згинальну жорсткість. Перші 42 ТВЗ-WR були завантажені в АкЗ енергоблока № 3 Южно-Української АЕС на початку 2015 року. Стосовно жодної із згаданих ТВЗ-WR за результатами післяексплуатаційного візуального обстеження/інспекції не виявлено будь-яких проблем.

Зважаючи на набутий досвід використання ТВЗ-WR, ДП «НАЕК «Енергоатом» заплановано в подальшому розповсюдити експлуатацію ТВЗ-WR на інші енергоблоки АЕС України з РУ ВВЕР-1000. З метою забезпечення виконання зазначених планів, ДП «НАЕК «Енергоатом» уклав з постачальником ЯП контракт, яким передбачено постачання ТВЗ-WR на АЕС України до 2020 року. На даний час Держатомрегулювання України розглядає Технічне рішення ДП «НАЕК «Енергоатом» щодо розширення експлуатації ТВЗ-WR на інших (окрім енергоблока № 3 Южно-Української АЕС) енергоблоках АЕС України з РУ ВВЕР-1000.

ТВЗ типу ТВЗА-12 розроблена компанією «ТВЕЛ» для експлуатації в активній зоні ВВЕР-1000 в двох варіантах паливного циклу: тривалістю 5 років в АкЗ (5 паливних

кампаній по 12 місяців) та тривалістю 4,5 рока в АкЗ (3 паливні кампанії по 18 місяців). ТВЗА-12 порівняно з «класичними» ТВЗА мають зменшену кількість ДГ, покрашену конструкцію твелів та збільшену кількість урану. Згідно з концептуальним технічним рішенням, узгодженим Держатомрегулювання України, перше на АЕС України завантаження ТВЗА-12 для дослідно-промислової експлуатації планувалось здійснити в 2014 році на енергоблоці № 4 Рівненської АЕС. Проте через відсутність результатів дослідної експлуатації ТВЗА-12 на Калінінській АЕС (Росія), які мала надати компанія «ТВЕЛ», прийнято рішення щодо відтермінування початку впровадження ТВЗА-12.

Беручи до уваги те, що: а) на даний час в Україні є енергоблоки, на яких використовуються ТВЗ трьох різних типів (ТВЗА, ТВЗ-W, ТВЗ-WR) і теоретично можлива експлуатація ще й четвертого типу ТВЗ (ТВЗА-12); б) 2012 року мали місце проблеми в контактній взаємодії ТВЗ-W і більш жорстких ТВЗА, — на даний момент є підстави вважати за необхідне виконати комплексний аналіз безпеки експлуатації перспективних змішаних паливних завантажень енергоблоків АЕС України з РУ ВВЕР-1000. Хоча конструкція ТВЗ кожного виробника на етапі розробки й проходить низку профільних проектних випробувань, лише комплексний аналіз дасть змогу обґрунтувати безпеку спільної роботи ТВЗ різних типів з урахуванням їх взаємного впливу та різниці параметрів — теплогідравлічних, нейтронно-фізичних і конструкційних.

Критерії прийнятності в комплексному аналізі безпеки. Обґрунтування безпеки в частині теплогідравлічного та нейтронно-фізичного аналізу передбачає перевірку дотримання таких критеріїв надійності охолодження АкЗ:

- максимальна температура палива не повинна перевищувати температуру плавлення UO_2 (2840 °C для свіжого і 2570 °C для вигорілого палива) [11];
- температура оболонки твелів не повинна перевищувати проектну межу пошкодження оболонки — 1200 °C;
- локальна глибина окиснення має бути не більшою за 18 % мінімальної товщини оболонки;
- частка цирконію, що прореагував, у аварійних умовах не повинна перевищувати 1 % його маси в оболонках твелів [12];
- значення коефіцієнта запасу до кризи теплообміну має бути не меншим за 1,0 (критерій теплотехнічної надійності АкЗ).

Наведені критерії є достатніми умовами неперевіщення проектною межею пошкодження твелів відповідно до РГ-Б.0.03.179—13 «Типовой технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000».

За результатами теплогідравлічного та нейтронно-фізичного аналізу здійснюється механіко-міцнісний аналіз окремих ТВЗ, а також змішаного завантаження АкЗ в цілому. Основні механіко-міцнісні критерії безпечної експлуатації ТВЗ для АкЗ є такими:

формозміна (скручування та/або вигин ТВЗ) не повинна перешкоджати вільному переміщенню стрижнів управління та захисту (поглинаючих елементів) по напрямних каналах ТВЗ (оскільки такі перешкоди потенційно можуть стати чинником ядерної аварії);

мають бути унеможливлені термомеханічні пошкодження твелів, що призводять до негерметичності оболонок твелів та пов'язаного з цим виходу радіоактивних елементів з твелів у теплоносій і до радіоактивного забруднення першого контуру РУ.

Висновки

За результатами виконаного аналізу досвіду експлуатації змішаних паливних завантажень можна сформулювати мету поглибленого розгляду питань комплексного аналізу безпеки перспективних змішаних завантажень — підтвердження за результатами теплогідравлічного, нейтронно-фізичного і механіко-міцнісного аналізу дотримання меж безпечної експлуатації в разі спільної експлуатації в АкЗ різних типів ТВЗ.

Для досягнення поставленої мети потрібні:

створення засобами розрахункового коду DYN3D моделі АкЗ ядерного реактора з ТВЗ різних типів та визначення теплогідравлічних та нейтронно-фізичних параметрів окремих ТВЗ і АкЗ в цілому;

розрахунки експлуатаційних параметрів, притаманних змішаним паливним завантаженням, зокрема для можливих сценаріїв реактивнісних аварій; порівняння результатів розрахунків з проектними межами;

огляд існуючих і розробка альтернативних підходів та аналітичних інструментів для дослідження з використанням теплогідравлічних кодів параметрів змішаних паливних завантажень в АкЗ ядерного реактора;

моделювання перехідних процесів в АкЗ за допомогою розрахункового коду RELAP5 MOD3.2 для різних конфігурацій паливних завантажень;

розрахунки перехідних процесів і зіставлення отриманих результатів з проектними межами;

розробка підходів та вибір методології оцінки механіко-міцнісних параметрів АкЗ для умов експлуатації ТВЗ різних типів;

розробка засобами розрахункового коду ANSYS 15.0 скінченно-елементних моделей конструкцій ТВЗ і АкЗ в цілому;

розрахунки параметрів формозміни конструкцій ТВЗ і АкЗ у цілому, зіставлення розрахункових значень параметрів з допустимими межами залишкового вигину, деформації ТВЗ і АкЗ у цілому.

Описаний комплексний аналіз безпеки використання змішаних паливних завантажень для українських АЕС дасть змогу обґрунтувати безпеку подальшого впровадження нових типів збірок, а отже, сприятиме виконанню «Енергетичної стратегії України на період до 2030 року».

Список використаної літератури

1. Rambo S. H. Three Mile Island: The Judge's Ruling // Front Line. — 1996. — June 7 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.pbs.org/wgbh/pages/frontline/shows/reaction/readings/tmi.html>
2. Патон Б. Е. Проблеми і уроки Чорнобиля / Б. Е. Патон // Вісник Академії наук України. — 2011. — № 5. — С. 3.
3. Арутюнян Р. В. Оперативный анализ аварии на АЭС «Фукусима-1» (Япония) и прогнозирование ее последствий / Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, А. Е. Киселев // Атом. энергия. — 2012. — Т. 112, № 3. — С. 151—159.
4. Підходи до регулювання ядерної та радіаційної безпеки в рамках впровадження в Україні нових модифікацій ядерного палива. — Затверджено Наказом ДКЯРУ від 16.05.02 № 65.
5. Топливная сборка второго поколения ТВС-2М / ОКБ «Гидропресс». — М., 2012. — 8 с.
6. Vasilchenko I. Recent advances and achievements in WWER-1000 fuel design, performance and operation. WWER Fuel Performance, Modelling and Support / I. Vasilchenko, V. Molchanov. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/081/41081131.pdf

7. Operation and licencing of mixed cores in water cooled reactors / V. Baydulin, H. Druenne, V. Gann, J. Killeen, A. Miasnikov // IAEA TECDOC series. TECDOC # 1720. — Vienna, 2013. — P. 17–19.

8. *Dietmar Mertens H.* (2011), Fuel Assembly Design and Licensing Aspects of Mixed Cores in PWRs // IAEA Technical Meeting on Fuel Design and Licensing of Mixed Cores for Water Cooled Reactors, Vienna. [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/meetings/2011-Dec-12-14-TM/papers/2.Maertens-FA-Design.pdf>

9. *Lombard S.*, (2011), «Safety Analysis of Mixed Cores in Pressurized Water Reactors in France» IAEA Technical Meeting on Fuel Design and Licensing of Mixed Cores for Water Cooled Reactors Vienna. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/meetings/2011-Dec-12-14-TM/Abstracts.pdf>

10. WEC-RWFA-003, «Westinghouse Robust Assembly Mechanical Test Report» Revision 0, May 2014.

11. Реакторная установка В-320 : Техническое описание и информация по безопасности. 320.00.00.00.000.Д61. — Гл. 31 : Обоснование безопасной эксплуатации реакторной установки В-320 с активной зоной с тепловыделяющими сборками альтернативными на энергоблоках АЭС Украины и Болгарии» (с извещением об изменении №320.3590). — М. : ОКБ «Гидропресс», 2003.

12. Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском : НП 306.2.145–2008. — К. : Державний комітет ядерного регулювання України, 2008. — 27 с.

References

1. *Rambo, S.H.* (1996), “Three Mile Island: The Judge’s Ruling, Front Line”, June 7, available at: <http://www.pbs.org/wgbh/pages/frontline/shows/reaction/readings/tmi.html>

2. *Paton, B.E.* (2011), “Problems and Lessons of Chernobyl” [Problemy i uroky Chornobylia], Bulletin of the Academy of Sciences of Ukraine, No. 5, p. 3. (Ukr)

3. *Arutiunian, R.V., Bolshov, L.A., Kiseliyov, A.E.* (2012), “Immediate Analysis of the Accident at Fukushima-1 NPP (Japan) and Prediction of its Consequences” [Operativnyi analiz avarii na AES Fukushima-1 (Yaponiia) i prognozirovaniie icio posledstviiv], Nuclear Energy, V. 112, No. 3, pp. 151–159. (Rus)

4. Approaches to Nuclear and Radiation Safety Regulation within Implementation of New Nuclear Fuel Modifications [Pidkhody do rehuliuвання yadernoi ta radiatsiinoi bezpeky v ramkakh vprovadzhennia v Ukraini novykh modyfikatsii yadernoho palyva], Approved by SNRIU Order No. 65 Dated 16 May 2002. (Ukr)

5. Fuel Assembly of Second Generation TVS-2M / OKB “Hydropress” [Toplivnaia sborka vtorogo pokoleniia TVS-2M], Moscow, 2012, 8 p. (Rus)

6. *Vasilchenko, I., Molchanov, V.*, “Recent Advances and Achievements in VVER-1000 Fuel Design, Performance and Operation. VVER Fuel Performance, Modelling and Support”, available at: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/081/41081131.pdf

7. *Baydulin, V., Druenne, H., Gann, V., Killeen, J., Miasnikov, A.* (2013), “Operation and Licencing of Mixed Cores in Water Cooled Reactors”, IAEA TECDOC Series TECDOC # 1720, Vienna, 2013, pp. 17–19.

8. *Dietmar Mertens H.* (2011), “Fuel Assembly Design and Licensing Aspects of Mixed Cores in PWRs”, IAEA Technical Meeting on Fuel Design and Licensing of Mixed Cores for Water Cooled Reactors, Vienna, available at: <https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/meetings/2011-Dec-12-14-TM/papers/2.Maertens-FA-Design.pdf>

9. *Lombard S.*, (2011), “Safety Analysis of Mixed Cores in Pressurized Water Reactors in France” IAEA Technical Meeting on Fuel Design and Licensing of Mixed Cores for Water Cooled Reactors Vienna”, available at: <https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/meetings/2011-Dec-12-14-TM/Abstracts.pdf>

10. WEC-RWFA-003, “Westinghouse Robust Assembly Mechanical Test Report”, Revision 0, May 2014.

11. Reactor Facility V-320: Technical Description and Safety Information, 320.00.00.00.000.D61, Chapter 31, Justification of Safe Operation of V-320 with the Core with Alternative Fuel Assemblies at Ukrainian and Bulgarian NPPs” (with Notification on Amendment No. 320.3590) [Reaktornaia ustanovka V-320: Tekhnicheskoe opisaniiie i informatsiia po bezopasnosti. 320.00.00.00.000.D61. Glava 31: Obosnovaniie bezopasnoi ekspluatatsii reaktornoi ustanovki V-320 s aktivnoi zonoii s teplovydeliaiushchimi sborkami alternativnymi na energoblokakh AES Ukrainy i Bolgarii. S izveshcheniie ob izmenenii No. 320.3590], Moscow, OKB “Hydropress”, 2003. (Rus)

12. Nuclear Safety Rules for NPPs with Pressurized Water Reactors [Pravyla yadernoi bezpeky reaktornykh ustanovok atomnykh stantsii z reaktoramy z vodoiu pid tyskom], NP 306.2.145–2008, Kyiv, State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, 2008, 27 p. (Ukr)

Отримано 27.04.2016.