

Аналіз досвіду США і України з використання методологічних та розрахункових підходів до обґрунтування ядерної безпеки систем поводження з ядерним паливом

Проведено аналіз нормативних вимог США щодо обґрунтувань ядерної безпеки систем поводження з ядерним паливом та їх порівняння з відповідними вимогами України з метою виявлення відмінностей у використанні методологічних та розрахункових підходів, які зменшують консерватизм оцінок критичності цих систем без зниження досягнутого рівня ядерної безпеки.

Ключові слова: системи поводження з ядерним паливом, ядерна безпека, критичність.

Ю. П. Ковбасенко, Е. А. Дудка, Я. В. Костюшко

Анализ опыта США и Украины по использованию методологических и расчетных подходов к обоснованию ядерной безопасности систем обращения с ядерным топливом

Проведен анализ нормативных требований США к обоснованию ядерной безопасности систем обращения с ядерным топливом, а также их сравнение с соответствующими требованиями Украины с целью обнаружения расхождений в использовании методологических и расчетных подходов, позволяющих снизить консерватизм оценок критичности этих систем без снижения достигнутого уровня безопасности.

Ключевые слова: системы обращения с ядерным топливом, ядерная безопасность, критичность.

© Ю. П. Ковбасенко, О. О. Дудка, Я. В. Костюшко, 2017

Ядерну безпеку деяких систем поводження з ядерним паливом АЕС України неможливо на даний час обґрунтувати без впровадження додаткових організаційно-технічних заходів, які дають змогу компенсувати наявні дефіцити безпеки. Прикладами таких систем є басейни витримки зі стелажками для неуцільненого збереження палива на енергоблоках АЕС з реакторами ВВЕР-440 та ВВЕР-1000, сухе сховище відпрацьованого ядерного палива (ССВЯП) на Запорізькій АЕС (ЗАЕС), транспортні контейнери ТК-6 для відпрацьованого палива реакторів ВВЕР-440. Обґрунтування безпеки таких систем ускладнюється сучасними тенденціями в атомній енергетиці — поступовим підвищенням початкового збагачення та маси палива, що пов'язано з розвитком нових паливних циклів. Зазначимо, що в деяких випадках дефіцити безпеки — це наслідок не недоліків систем поводження з ядерним паливом (ЯП), а наслідок надмірного консерватизму, що був закладений в оцінки безпеки з самого початку розвитку атомної енергетики за умов обмеженого рівня знань та технічних можливостей.

У світовій практиці спостерігається тенденція до поступового зниження надмірного консерватизму розрахункових оцінок в обґрунтуванні ядерної безпеки (ЯБ) систем зберігання та транспортування свіжого і відпрацьованого палива за обов'язкової умови збереження досягнутого рівня ЯБ. Рівень надмірного консерватизму може бути знижений насамперед використанням таких підходів, як «burnup credit», «boron credit», «moderator exclusion».

Станом на грудень 2015 року в світі працював 441 ядерний енергетичний реактор, 99 з них (найбільша кількість реакторів серед усіх країн) — у Сполучених Штатах Америки [1]. За роки експлуатації АЕС в США накопичився значний досвід з нормотворчої діяльності в галузі атомної енергії, зокрема й щодо зниження надмірного консерватизму в обґрунтуванні ЯБ систем поводження з ЯП. Саме тому для подальшого детального розгляду взято нормативні вимоги США.

Мета статті — аналіз нормативних вимог США щодо використання методологічних та розрахункових підходів до обґрунтування ЯБ систем поводження з ЯП та їх порівняння з відповідними вимогами, чинними в Україні (роботу виконано в рамках проекту технічної підтримки уряду України з боку уряду США).

Нормативні вимоги, чинні у Сполучених Штатах Америки

У системі нормативних документів США документом верхнього рівня є Code of Federal Regulations (CFR) [2], який встановлює вимоги, обов'язкові до виконання всіма особами та організаціями для отримання або збереження ліцензії чи сертифіката на використання ядерних матеріалів або експлуатацію ядерної установки. Всі інші документи жодним чином не повинні суперечити CFR, вони є допоміжними, уточнюють і конкретизують положення CFR.

Забезпечення ЯБ в CFR розглядається окремо для кожного з трьох напрямів:

поводження з паливом на АЕС;

поводження з паливом в автономних сховищах відпрацьованого ядерного палива (ВЯП);

поводження з паливом під час транспортування.

По всіх трьох напрямках є спільні вимоги до аналізу ЯБ, а саме:

система повинна мати геометрично безпечну конфігурацію, що запобігає виникненню критичності. Аварія,

пов'язана з критичністю, може виникнути тільки в разі збігу, принаймні, двох незалежних малоймовірних одночасних чи послідовних змін у технологічних умовах (так званий принцип подвійного збігу);

у процесі аналізу критичності систем треба враховувати наявність відбивача, оптимальну густину уповільнювача, для якої ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів (K_{eff}) максимальний, і вплив технологічних допусків на виготовлення палива та систем зберігання.

Оскільки умови поводження з ЯП у кожній із систем різні, для кожної з систем розроблено окремі рекомендації та використовуються різні підходи, що впливають на зменшення надмірного консерватизму, закладеного у вимогах до аналізу.

Підхід «burnup credit». Виконуючи аналіз безпеки щодо критичності систем зберігання та транспортування ВЯП, традиційно передбачають, що паливо в системі є свіжим (тобто вигорання палива не враховується). Це призводить до значного консерватизму розрахункової величини K_{eff} системи. Зараз покращені методи розрахунків дають змогу без погіршення точності та достовірності оцінок брати до уваги зниження реактивності внаслідок вигорання палива, а отже, дозволяють значно зменшити консерватизм в аналізі ЯБ із збереженням достатнього запасу по критичності.

Підхід «burnup credit» полягає у визначенні нуклідного складу ВЯП як функції вигорання, а потім — у розрахунку K_{eff} . Залежно від можливостей програмного забезпечення та потрібної точності розрахунків (наявності валідаційного матеріалу) може розглядатися зміна концентрацій різних наборів нуклідів: а) тільки актинідів; б) актинідів і продуктів поділу.

Головним чинником застосування підходу «burnup credit» було досягнення значного економічного ефекту. Але є й інші переваги: зменшення радіаційного впливу на населення та довкілля за рахунок збільшення кількості палива, що перевозиться і, як наслідок, скорочення кількості перевезень ВЯП, збереження розмірів та конфігурації існуючих сховищ незважаючи на підвищення розмножувальних властивостей свіжого палива, тощо.

Для застосування підходу «burnup credit» у США розроблено внутрішньовідомчий документ ISG-8 [3], в якому надаються практичні рекомендації щодо врахування в аналізі критичності систем зберігання та транспортування ВЯП реакторів PWR зниження реактивності палива внаслідок його вигорання. Дотримуючись цих рекомендацій, Комісія ядерного регулювання (КЯР) США визначає, чи надав Заявник на отримання ліцензії щодо поводження з ВЯП обґрунтовані гарантії, що його система зберігання або транспортування ВЯП відповідає вимогам CFR. Якщо Заявником використана якась альтернативна методологія, вона розглядається в окремому порядку з використанням рекомендацій [3] у максимально можливому обсязі.

Як один з перших прикладів застосування підходу «burnup credit» в США можна навести обґрунтування ЯБ системи зберігання відпрацьованих тепловидільних збірок (ТВЗ) на основі контейнерів VSC-24 [4]. Система VSC-24 була розроблена для сухого зберігання опромінених ТВЗ реакторів PWR у вертикальному положенні (до речі, за цією системою проектувалися контейнери ССВЯП, які використовують на Запорізькій АЕС).

Підхід «burnup credit» реалізується завантаженням у контейнер тільки такого палива, розмножувальні властивості якого еквівалентні властивостям (або менш виражені) свіжої ТВЗ із збагаченням 1,35 % ^{235}U . Залежність початкового збагачення та вигорання ТВЗ, які задовольняють цим

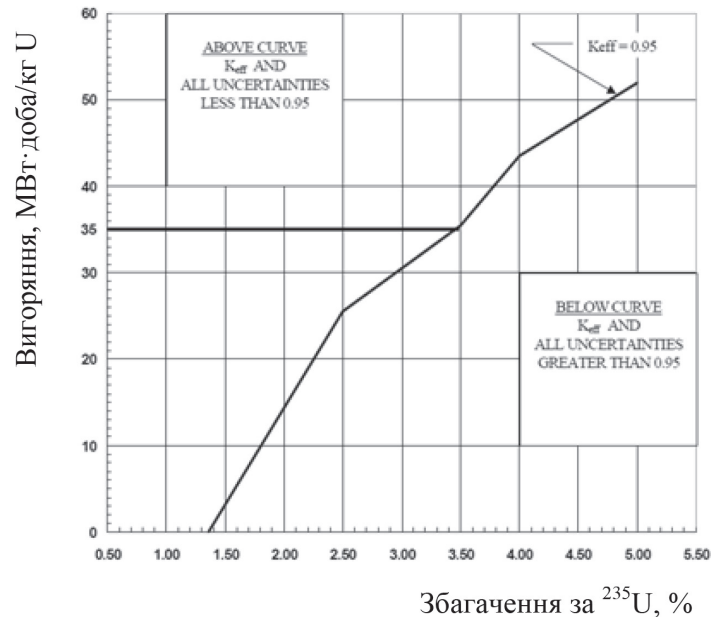


Рис. 1. Завантажувальна крива для системи VSC-24

вимогам, наведено на рис. 1. Крива, зображена на рис. 1, встановлює мінімальне значення вигорання для збірок різного початкового збагачення, за якого їхні розмножувальні властивості не перевищуватимуть розмножувальних властивостей свіжої ТВЗ із збагаченням 1,35 % ^{235}U .

Таким чином, у контейнер дозволялось завантажувати ТВЗ, характеристики яких відповідали верхній частині графіка (над кривою): у цьому разі за оптимальних умов уповільнення нейтронів значення K_{eff} залишалося меншим, ніж 0,95. Завантаження в контейнер відпрацьованих ТВЗ, характеристики яких відповідали нижній частині графіка (під кривою), не дозволялося.

В якості характерних прикладів практичного застосування підходу «burnup credit» можна навести:

обґрунтування компанією General Atomics (GA) можливості перевезення в контейнері GA-4 чотирьох відпрацьованих ТВЗ реакторів PWR з початковим збагаченням 3,2 % ^{235}U та вище [5];

транспортування та зберігання 32 відпрацьованих ТВЗ реакторів PWR з початковим збагаченням ^{235}U до 5 % і глибиною вигорання до 45 ГВт-добу/т U у контейнерах подвійного призначення CASTOR X/32 S компанії GNB [6]. Якщо не застосовувати підхід «burnup credit», то, з міркувань безпеки, ТВЗ треба завантажувати в контейнер з додатково встановленими в них поглинаючими стрижнями (в разі реалізації підходу «burnup credit» потреби в таких стрижнях немає).

Підхід «boron credit». Зазвичай в обґрунтуванні безпеки систем «мокрого» зберігання палива розчинені у воді поглиначі в розрахунках критичності не беруть до уваги. В обґрунтуванні ЯБ басейнів витримки (БВ) АЕС це може призводити до певних труднощів, що обумовлені такими чинниками, як зростання початкового збагачення ТВЗ або деградація з часом зафіксованого у складі стелажів поглинача нейтронів. Через це виникає потреба в частковому заповненні стелажів (шахове розташування ТВЗ). Підхід «boron credit», тобто врахування в аналізі деякої мінімально можливої (обґрунтованої) концентрації розчиненої у воді борної кислоти, допомагає вирішити ці проблеми.

Щодо підходу «boron credit», CFR [2] наголошує: якщо борована вода використовується як фактор

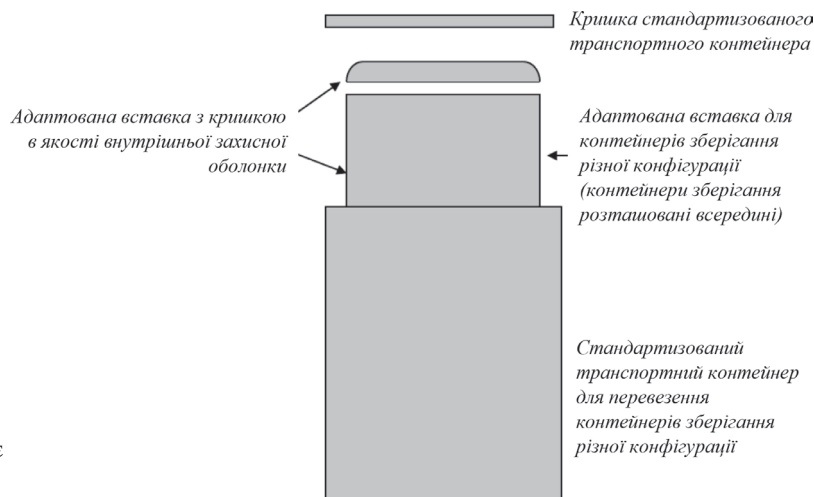


Рис. 2. Запропонована схема конструкції, що дозволяє використання підходу «moderator exclusion»

контролю критичності, $K_{\text{эф}}$ не повинен перевищувати 0,95 за умови, що стелажі заповнені паливом з максимальними розмножувальними властивостями, а в разі заповнення стелажів неборованою водою $K_{\text{эф}}$ має залишатися меншим за 1,0.

Якщо ЯБ обґрунтовується з урахуванням розчиненого у воді бору, в технічних специфікаціях та (або) в експлуатаційній документації АЕС потрібно навести мінімально допустиму концентрацію бору в балансі витримки. Щоб переконатися в достатності часу для виявлення та компенсації вихідної події, яка спричинює зниження концентрації бору від мінімально допустимої, зазначеної в технічних специфікаціях, до концентрації, яка забезпечує значення $K_{\text{эф}}$ на рівні 0,95, треба провести аналіз процесів зниження концентрації бору. У цьому разі мають розглядатися всі вихідні події, що призводять до зниження концентрації бору. Результати аналізу мають обґрунтовувати періодичність контролю мінімальної концентрації бору, що визначена в технічних специфікаціях [7].

Прикладом використання підходу «boron credit» є обґрунтування безпеки БВ другого енергоблока АЕС Indian Point (США, штат Нью-Йорк) [8] при компенсації збільшення реактивності в БВ внаслідок деградації поглинач нейтронів Bofaflex, який є складовою частиною стелажів для ушліщеного зберігання палива. В обґрунтуванні ЯБ різних відсіків БВ показано, що для виконання умови $K_{\text{эф}} < 0,95$ концентрація борної кислоти має дорівнювати 7,86 г/кг за нормальних умов експлуатації та 14,95 г/кг — під час проектної аварії. У зв'язку з цим стоянкова концентрація борної кислоти була підвищена з 15,00 до 20,00 г/кг, частота контролю концентрації борної кислоти змінена від одного разу на місяць до одного разу на тиждень.

Аналіз вихідних подій, що можуть спричинити потрапляння до БВ чистої (неборованої) води, показав, що до того моменту, коли концентрація борної кислоти у БВ зменшиться до рівня 7,86 г/кг, необхідного для підтримання $K_{\text{эф}} < 0,95$ за нормальних умов експлуатації, персонал має достатньо часу, щоб виявити та усунути причини і наслідки цих подій (згідно з принципом подвійного збігу, за умови використання підходу «boron credit» в разі втрати бору інші вихідні події, що можуть призвести до порушень нормальної експлуатації або до проектних аварій, не розглядаються).

Підхід «moderator exclusion». Вимоги щодо обов'язкового врахування в процесі аналізу критичності наявності води з оптимальними умовами уповільнення нейтронів усередині транспортних контейнерів (ТК) визначили потребу в наявності у складі більшості контейнерів для перевезення ВЯП поглиначів нейтронів та (або) нейтронних пасток. Якщо вимогу щодо потрапляння води усередину контейнера зняти, ґрунтуючись на низькій імовірності такої події (за результатами аналізу гіпотетичних аварій), то зі складу контейнера можна буде вилучити матеріали, що містять бор та (або) нейтронні пастки, а це дасть більше простору для розміщення відпрацьованих ТВЗ та зменшить вартість транспортування.

CFR [2] наголошує: якщо конструкція контейнера має особливості, що гарантують неможливість потрапляння води всередину контейнера за умови виникнення будь-якої одиначної помилки, КЯР США може узгодити виняток із вимог щодо аналізу підкритичності у разі потрапляння води усередину системи, тобто застосувати підхід «moderator exclusion».

Одним із запропонованих рішень щодо застосування підходу «moderator exclusion» є використання кількох бар'єрів. Якщо конструкція та (або) стан контейнера для зберігання ВЯП не унеможливають потрапляння води усередину під час нормальної експлуатації та гіпотетичних аварій, водонепроникність можуть гарантувати додаткові внутрішні захисні оболонки всередині ТК. Для реалізації цього рішення була розроблена так звана концепція стандартизованої системи перевезення [9]. Згідно з цією концепцією, наявність у конструкції ТК адаптованої вставки, яка належним чином фіксує контейнер зберігання, дасть змогу перевозити більшість наявних типів контейнерів зберігання. Додана до цієї вставки кришка може служити додатковою внутрішньою захисною оболонкою від потрапляння води усередину, що забезпечить транспортування палива після довгострокового зберігання навіть за умов його деградації (рис. 2).

Зауважимо, що на цей час авторам статті невідомо про узгоджені КЯР США випадки використання підходу «moderator exclusion».

Підсумовуючи викладені в цій рубриці відомості про підходи до обґрунтування ядерної безпеки систем поводження з ядерним паливом у США, зазначимо:

1. Для всіх систем зберігання та транспортування ВЯП у процесі аналізу критичності допускається враховувати

вигорання палива за умови незалежного контролю вигорання адміністративними чи експериментальними методами до початку операцій з паливом — підхід «burnup credit». Вибір нуклідів має бути обґрунтованим. У США розроблено документи, які містять рекомендації з використання підходу «burnup credit» до систем зберігання та транспортування ВЯП.

2. Для систем, у яких зберігання та поводження з відпрацьованим паливом відбуваються під водою (БВ та різноманітні контейнери під час завантаження та розвантаження у БВ), допускається враховувати в процесі аналізу боровану воду як засіб контролю критичності — підхід «boron credit». Для цього потрібно передбачити адміністративні та (або) технічні засоби для запобігання аварійному надходженню неборованої води, у протилежному разі аналіз критичності треба проводити у традиційний спосіб на випадок затоплення системи неборованою водою.

3. Якщо доведено, що ТК має особливості конструкції, які гарантують неможливість потрапляння води всередину контейнера за умови виникнення будь-якої одиничної помилки, можна не проводити аналіз заповнення контейнера водою — підхід «moderator exclusion».

Нормативні вимоги, чинні в Україні

Основним українським нормативним документом, що містить вимоги до забезпечення ЯБ стосовно систем поводження з ЯП, є «Правила безпеки під час зберігання і транспортування ядерного палива на об'єктах атомної енергетики» (ПНАЭ-Г-14-029 [10]). Дія документа [10] поширюється: на системи поводження із свіжим та відпрацьованим паливом АЕС; на автономні СВЯП, тобто сховища, розташовані поза реакторною будівлею; на поводження з ЯП на інших ядерних установках.

Основним принципом ядерної безпеки згідно з [10] є неперевищення $K_{\text{эф}}$ значення 0,95 в умовах нормальної експлуатації та в разі проектних аварій. Конструкція обладнання систем зберігання і поводження з ядерним паливом повинна забезпечувати ЯБ технічними засобами за рахунок розміщення ТВЗ з певним шагом ґратки.

У процесі аналізу критичності систем поводження з ЯП треба передбачити наявність відбивача, оптимальну густину уповільнювача, для якої $K_{\text{эф}}$ є максимальним, і вплив технологічних допусків на виготовлення палива та елементів цих систем.

Підхід «burnup credit». В обґрунтуванні ЯБ усіх систем зберігання та транспортування ВЯП з метою зниження консерватизму в оцінках критичності допускається використовувати вигорання як параметр ЯБ. На сьогодні цей підхід застосовують, зокрема, в обґрунтуванні завантажень вентильованих контейнерів зберігання ССВЯП Запорізької АЕС та СВЯП-1 Чорнобильської АЕС. Для обох установок розроблено окремі методики [11, 12] на основі вітчизняного досвіду, досвіду США та рекомендацій МАГАТЕ. Оскільки обсяг валідаційного матеріалу щодо палива реакторів ВВЕР і РВПК незначний, у цих методиках для врахування вигорання палива рекомендується розглядати набір з п'яти нуклідів: ^{235}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu — та зменшення концентрації ^{238}U . Єдиного документа, який регламентував би вимоги з використання підходу «burnup credit» до поводження з ВЯП, в Україні немає.

Підхід «boron credit». Згідно з [10], аналізуючи ЯБ для сховищ з гомогенними поглиначами (наприклад, борованою водою), треба вважати, що поглинач відсутній. Отже, в Україні заборонено використання розчиненого у воді бору як засобу контролю критичності в обґрунтуванні ЯБ «мокрих» систем зберігання ЯП (на відміну від США, така заборона діє також в переважній більшості європейських країн щодо обґрунтування безпеки поводження та збереження ЯП під водою).

Підхід «moderator exclusion». Відповідно до НП 306.6.124-2006 [13], допускається не враховувати потрапляння води всередину ТК за умови, що конструкція упаковки містить спеціальні засоби для запобігання такому проникненню води, а їх надійність підтверджується відповідними випробуваннями. Проте зауважимо, що в Україні транспортні контейнери для перевезення ЯП до цього часу не виробляли і не випробували. До того ж, ядерну безпеку поводження з ТК на АЕС регулюють правила [10], якими використання підходу «moderator exclusion» для ТК не допускається.

Висновки

Проведено аналіз нормативних вимог США щодо обґрунтувань ЯБ систем зберігання та транспортування свіжого і відпрацьованого ЯП та їх порівняння з відповідними вимогами України з метою виявлення відмінностей у використанні методологічних і розрахункових підходів, які зменшують консерватизм оцінок критичності цих систем без зниження досягнутого рівня ЯБ.

За результатами аналізу можна зазначити, що нормативні вимоги України характеризуються більшим ступенем консерватизму в оцінці ЯБ порівняно з вимогами США внаслідок меншої кількості підходів, що допускаються до використання в обґрунтуванні ЯБ.

Список використаної літератури

1. GC(60)/INF/2. Nuclear Technology Review 2016 — Report by the Director General, Vienna, 2016. URL: https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC60/GC60InfDocuments/English/gc60inf2_en.pdf
2. NRC Regulations. Title 10, Code of Federal Regulations, 2017. URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/>
3. Division of Spent Fuel Storage and Transportation Interim Staff Guidance — 8 Revision Issue: Burnup Credit in the Criticality Safety Analyses of PWR Spent Fuel in Transportation and Storage Casks. URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/isg/isg-8R3.pdf>
4. Conditions for cask use and technical specifications DOCKET NO. 72-1007 certificate of compliance no. 1007. Amendment 1, 2000. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML0037/ML003719677.pdf>
5. Zimmer, A., Razvi, J., Johnson, L., Welch, B. (2004). “Expansion of the capabilities of the ga-4 legal weight truck spent fuel shipping cask”, 14th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2004). URL: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/088/37088683.pdf
6. Jobson, G., Spilker, H., Methling, D. (2000). “Castor® X/32 s — a new dual-purpose cask for the storage and transport of spent nuclear fuel”, WM'00 Conference, February 27 — March 2, 2000, Tucson, AZ. URL: <http://www.wmsym.org/archives/2000/pdf/39/39-7.pdf>
7. NEI 12-16. Guidance on the regulatory requirements for criticality analysis of the fuel storage at light-water reactor power plants, 2013. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1308/ML13084A048.pdf>
8. Indian Point Nuclear Generating, Unit no. 2 — Amendment Re: Credit for soluble boron and burnup in spent fuel pit (Tac no. MB2989). URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML0212/ML021230367.pdf>

9. Morton, K. (2012). FY 2012 used fuel disposition campaign transportation task report on INL efforts supporting the moderator exclusion concept and standardized transportation. URL: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc831106/m2/1/high_res_d/1055991.pdf

10. ПНАЭ Г 14-029-91. Правила безопасности при хранении и транспортировке ядерного топлива на объектах атомной энергетике. М. : Госпроатомнадзор СССР, 1992. 27 с.

11. 00.ОБ.УУ.МУ.09-15. Методические указания по выполнению обоснования ядерной безопасности топливной загрузки ВКХ СХОЯТ с учетом глубины выгорания отработавшего ядерного топлива. Энергодар, 2015.

12. 32-ТО. Методика учета выгорания при обосновании ядерной безопасности обращения с отработавшим топливом на ЧАЭС / ГСП ЧАЭС. 2009. 18 с.

13. НП 306.6.124-2006. Правила ядерної та радіаційної безпеки при перевезенні радіоактивних матеріалів (ПБПРМ-2006). К. : Державний комітет ядерного регулювання України, 2006, 168 с.

References

1. GC(60)/INF/2, Nuclear Technology Review 2016, Report by the Director General, Vienna, 2016, URL: https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC60/GC60InfDocuments/English/gc60inf-2_en.pdf

2. “NRC Regulations, Title 10, Code of Federal Regulations”, 2017, URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/>

3. “Division of Spent Fuel Storage and Transportation Interim Staff Guidance — 8 Revision 3 Issue: Burnup Credit in the Criticality Safety Analyses of PWR Spent Fuel in Transportation and Storage Casks”, URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/isg/isg-8R3.pdf>

4. “Conditions for Cask Use and Technical Specifications DOCKET No. 72-1007 Certificate of Compliance No. 1007, Amendment 1”, 2000, URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML0037/ML003719677.pdf>

5. Zimmer, A., Razyi, J., Johnson, L., Welch, B. (2004), “Expansion of the Capabilities of the GA-4 Legal Weight Truck Spent Fuel Shipping Cask”, 14th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM 2004), URL: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/088/37088683.pdf

6. Jobson, G., Spilker, H., Methling, D. (2000), “Castor® X/32 s — a New Dual-Purpose Cask for the Storage and Transport of Spent Nuclear Fuel”, WM’00 Conference, February 27 — March 2, 2000, Tucson, AZ, URL: <http://www.wmsym.org/archives/2000/pdf/39/39-7.pdf>

7. NEI 12-16. Guidance on the Regulatory Requirements for Criticality Analysis of the Fuel Storage at Light-Water Reactor Power Plants, 2013, URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1308/ML13084A048.pdf>

8. “Indian Point Nuclear Generating, Unit No. 2, Amendment Re: Credit for Soluble Boron and Burnup in Spent Fuel Pit (Tac No. MB2989)”, URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML0212/ML021230367.pdf>

9. Morton, K. (2012), “FY 2012 Used Fuel Disposition Campaign Transportation Task Report on INL Efforts Supporting the Moderator Exclusion Concept and Standardized Transportation”, URL: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc831106/m2/1/high_res_d/1055991.pdf

10. PNAE G 14-029-91. Safety Rules for the Storage and Transport of Nuclear Fuel at Nuclear Installations [PNAE G 14-029-91. Pravila bezopasnosti pri khraneni i transportirovke yadernogo topliva na ob'ektakh atomnoi energetiki], Moscow, Committee for State Supervision of Safe Activities in Industry and Nuclear Power, 1992, 27 p. (Rus)

11. 00.ОБ.УУ.МУ.09-15. Methodological Instructions for the Nuclear Safety Justification of Fuel Loading of Ventilated Storage Containers in SFSF Taking into Account Spent Nuclear Fuel Burnup Depth [00.ОБ.УУ.МУ.09-15. Metodicheskiye ukazaniia po vypolneniiu obosnovaniia yadernoi bezopasnosti toplivnoi zagruzki VKKh SKhOYaT s uchiotom glubiny vygoraniia otrabotavshego yadernogo topliva], Enerhodar, 2015. (Rus)

12. 32-ТО. Burnup Accounting Methodology in Nuclear Safety Justification of Spent Fuel Management at Chornobyl NPP [32-ТО. Metodika uchiota vygoraniia pri obosnovanii yadernoi bezopasnosti obrashcheniia s otrabotavshym toplivom na ChAES], Chornobyl Nuclear Power Plant, 2009, 18 p. (Rus)

13. NP 306.6.124-2006. Rules for Nuclear and Radiation Safety in Transport of Radioactive Materials (PBPRM-2006) [NP 306.6.124-2006. Pravyla yadernoi ta radiatsiinoi bezpeky pry perevezenni radioaktyvnykh materialiv (PBPRM-2006)], Regulations and Rules of Nuclear and Radiation Safety, Kyiv, State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, 2006. (Ukr)

Отримано 07.07.2017.