

О. В. Григораш<sup>1</sup>, О. М. Дибач<sup>2</sup>,  
С. М. Кондратьев<sup>2</sup>, О. В. Горбаченко<sup>2</sup>,  
А. В. Панченко<sup>2</sup>, Ол-р П. Шугайло<sup>2</sup>,  
Ю. П. Ковбасенко<sup>2</sup>, М. П. Вишемирський<sup>2</sup>,  
В. І. Богорад<sup>2</sup>, Д. О. Белих<sup>2</sup>, В. Я. Шендерович<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Державна інспекція ядерного регулювання України,  
м. Київ, Україна

<sup>2</sup> Державний науково-технічний центр  
з ядерної та радіаційної безпеки, м. Київ, Україна

## Питання ядерної та радіаційної безпеки централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива АЕС України

Проведено аналіз забезпечення принципів безпеки ядерної та радіаційної безпеки у процесі поводження з відпрацьованим ядерним паливом на майданчику ЦСВЯП та запланованої діяльності на етапах життєвого циклу ЦСВЯП. Надано результати порівняння вимог нормативних документів (НД) США, які застосовувались компанією Holtec у проектуванні обладнання ЦСВЯП, з відповідними вимогами НД України, результати аналізу найбільш важливих факторів безпеки ЦСВЯП (міцності та надійності, ядерної безпеки, теплових режимів і біологічного захисту), а також перевірних експертних розрахунків ДНТЦ ЯРБ. Наведено питання, які мають бути розглянуті на етапах подальшої реалізації проекту ЦСВЯП.

Ключові слова: ЦСВЯП, БЦК, відпрацьоване ядерне паливо, HI-STORM, HI-STAR, ядерна безпека, радіаційна безпека.

**А. В. Григораш, А. М. Дибач, С. Н. Кондратьев, О. В. Горбаченко,  
А. В. Панченко, Ал-др П. Шугайло, Ю. П. Ковбасенко,  
М. П. Вишемирський, В. І. Богорад, Д. А. Белих, В. Я. Шендерович**

### Вопросы ядерной и радиационной безопасности централизованного хранилища отработанного ядерного топлива АЭС Украины

Проведен анализ обеспечения принципов безопасности ядерной и радиационной безопасности при обращении с отработанным ядерным топливом на площадке ЦХОЯТ и запланированной деятельности на этапах жизненного цикла ЦХОЯТ. Представлены результаты сравнения требований нормативных документов (НД) США, которые применялись компанией Holtec при проектировании оборудования ЦХОЯТ, с соответствующими требованиями НД Украины, результаты анализа наиболее важных факторов безопасности ЦХОЯТ (прочности и надежности, ядерной безопасности, тепловых режимов и биологической защиты), а также проверочных экспертных расчетов ГНТЦ ЯРБ. Приведены вопросы, которые должны быть рассмотрены на этапах дальнейшей реализации проекта ЦХОЯТ.

Ключевые слова: ЦХОЯТ, МЦК, отработанное ядерное топливо, HI-STORM, HI-STAR, ядерная безопасность, радиационная безопасность.

© О. В. Григораш, О. М. Дибач, С. М. Кондратьев та ін., 2017

Створення централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива АЕС України (ЦСВЯП) є одним з основних завдань Енергетичної стратегії України до 2030 року, затвердженої в 2006 році. На даний час ця стратегія переглядається, але питання створення ЦСВЯП залишається першочерговим.

Створення ЦСВЯП обґрунтовано необхідністю: підвищення енергетичної безпеки України шляхом унеможливлення залежності вітчизняної ядерної енергетики від монопольного постачальника послуг з тимчасового зберігання та переробки відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) (у даний час ВЯП АЕС України, за винятком ВЯП Запорізької АЕС, передається до Російської Федерації для зберігання й переробки);

реалізації варіанта зберігання ВЯП протягом до 100 років, що дасть змогу отримати достатній часовий запас для напрацювання стратегічного рішення щодо поводження з ВЯП з урахуванням перспективного ядерно-паливного циклу (ЯПЦ) України.

На всіх етапах створення ЦСВЯП цей об'єкт постійно перебуває в центрі уваги наукових і громадських організацій, засобів масової інформації. Зважаючи на високий суспільний інтерес, зростає значимість відповідності цього об'єкта вимогам ядерної та радіаційної безпеки. Мета статті — розглянути питання обґрунтування безпеки ЦСВЯП і, зокрема, роль Державного науково-технічного центру з ядерної та радіаційної безпеки (ДНТЦ ЯРБ) в обґрунтуванні безпеки ЦСВЯП.

### Загальна характеристика проекту

ЦСВЯП — це ядерна установка загальнодержавного значення, в якій передбачається сухе зберігання ВЯП енергоблоків АЕС України з реакторами ВВЕР (Рівненська, Южно-Українська, Хмельницька атомні електростанції) протягом 100 років. На даний момент для довготривалого зберігання ВЯП енергоблоків Запорізької АЕС використовується сухе сховище ВЯП (ССВЯП ЗАЕС), яке було введено в експлуатацію 2001 року, а на майданчику Чорнобильської АЕС експлуатується СВЯП-1 (сховище мокрового типу зберігання ВЯП, введено в експлуатацію 1986 року) та споруджується сухе сховище ВЯП модульного типу (СВЯП-2), що призначене для довготривалого зберігання ВЯП енергоблоків з реакторними установками РВПК.

Введення в експлуатацію ЦСВЯП і СВЯП-2 та продовження експлуатації ССВЯП ЗАЕС має забезпечити вирішення проблем поводження з ВЯП АЕС України на тривалий період. Зазначимо, що проект ЦСВЯП з урахуванням прийнятих рішень передбачає можливість зберігання ВЯП нових енергоблоків у разі їх спорудження відповідно до Енергетичної стратегії.

Рішення про будівництво ЦСВЯП прийнято Законом України від 09.02.2012 № 4383-VI «Про поводження з відпрацьованим ядерним паливом щодо розміщення, проектування та будівництва централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій».

Майданчик ЦСВЯП, вибраний в рамках розробки документа «Техніко-економічне обґрунтування інвестицій у будівництво ЦСВЯП реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій», який було затверджено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 04.02.2009 № 131-р, розміщується між селами Стара Красниця, Буряківка, Чистогалівка та Стечанка Київської області

в зоні відчуження території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи. На цей момент закінчено розробку проекту ЦСВЯП (проект “Будівництво централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій” затверджений розпорядженням Кабінету Міністрів України від 07.06.2017 № 380-р) та розробку обладнання для реалізації проекту, виготовлено проектну документацію для підготовчих робіт на майданчику будівництва.

Суше зберігання ВЯП вибрано після вивчення та порівняння різних технологій, які використовуються в світі для зберігання ВЯП, за показниками безпеки (ядерної та радіаційної), економічності, надійності експлуатації, з урахуванням екологічних факторів і наявності позитивного досвіду експлуатації СВЯП. Основними перевагами сухого зберігання є: пасивне відведення тепла від ВЯП за рахунок природної вентиляції повітрям контейнерів зберігання; надійна ізоляція ВЯП від довкілля; незначна кількість РАВ, що утворюються під час експлуатації; низькі експлуатаційні затрати; прийнятні початкові інвестиції в будівництво; можливість довготривалого зберігання ВЯП (до 100 років).

За результатами аналізу можливих технологій сухого зберігання ВЯП для реалізації на ЦСВЯП вибрано технологію, запропоновану компанією Holtec International (США) (далі — Holtec), яка полягає у зберіганні ВЯП у бетонних контейнерах на відкритому майданчику. Технологія Holtec була відліцензована в США і застосовується в цій та багатьох інших країнах для зберігання різних типів ядерного палива.

Технологічний процес поводження з ВЯП охоплює: підготовку відпрацьованих тепловидільних збірок (ВТВЗ) на енергоблоках АЕС для зберігання, зокрема розміщення ВТВЗ у багатоцільовому контейнері (БЦК) і його герметизацію;

розміщення БЦК у контейнері перевезення HI-STAR з використанням перевантажувального контейнера HI-TRAC і перевезення БЦК з майданчиків АЕС на майданчик ЦСВЯП;

перевантаження БЦК на майданчику ЦСВЯП в контейнери зберігання HI-STORM і зберігання в цих контейнерах протягом 100 років.

ВТВЗ зберігаються у БЦК в середовищі інертного газу — гелію. Надійність зберігання забезпечується організацією двох бар’єрів на шляху розповсюдження радіоактивних матеріалів у навколишнє середовище. Обладнання ЦСВЯП і прийняті технічні рішення повинні забезпечити в нормальних і аварійних умовах (охоплюючи такі екстремальні природні умови, як землетрус, смерч, повінь, вітер, сніг тощо, а також екстремальні техногенні явища, такі як пожежа, ударна хвиля, падіння літального апарату тощо) збереження локалізації радіоактивних матеріалів, ядерну безпеку, відведення залишкового енерговиділення від ВТВЗ, запобігання небезпечній деградації оболонок твєлів протягом усього періоду зберігання.

Таким чином, у нормальних і аварійних умовах забезпечується захист персоналу, населення і оточуючого середовища від радіаційного впливу з дотриманням вимог нормативно-правових актів (НПА) [1, 2].

Відповідно до вимог чинного законодавства експлуатуючою організацією були розроблені проект ЦСВЯП, який базувався на технології Holtec, та попередній звіт з аналізу безпеки (ПЗАБ) [3], в якому обґрунтовувалась ядерна та радіаційна безпека рішень, прийнятих у проекті.

Діяльність ДНТЦ ЯРБ в частині оцінки ядерної та радіаційної безпеки проекту, ПЗАБ та інших документів, що обґрунтовують безпеку ЦСВЯП, охоплювала такі напрямки:

порівняльний аналіз вимог нормативних документів (НД) США, які використовує Holtec у проектуванні обладнання та аналізі безпеки систем, важливих для безпеки (СВБ), з відповідними вимогами національних документів; експертизу матеріалів, що обґрунтовують безпеку (документи з обґрунтування безпеки обладнання Holtec, технічні специфікації на обладнання, матеріали ПЗАБ [3] тощо) для оцінки рівня безпеки проекту і відповідності вимогам ядерної та радіаційної безпеки;

виконання розрахункових перевірок і альтернативних оцінок з найбільш значущих факторів з метою підтвердження обґрунтованості рішень, прийнятих у проекті ЦСВЯП;

визначення питань (положень), які мають обґрунтовуватись і вивчатись додатково в процесі експлуатації, враховуючи відсутність досвіду 100-річного зберігання ВЯП.

### Порівняльний аналіз положень НД США з відповідними вимогами НД України

Виконання порівняльного аналізу було викликано необхідністю дотримання відповідності вимогам національних НД обладнання Holtec, що проектується відповідно до вимог НД США.

Під час виконання порівняльного аналізу розглядалися загалом 261 положення НД за всіма напрямками ядерної та радіаційної безпеки ЦСВЯП, які стосуються: а) проектних критеріїв і вимог до обладнання, важливого для безпеки, що використовується при сухому зберіганні ВЯП; б) забезпечення та обґрунтування ядерної та радіаційної безпеки.

За результатами аналізу (рис. 1, 2) встановлено, що:

- 1) 123 вимоги (47 %) НД США збігаються з вимогами НД України (категорія А);
- 2) 90 вимог (34 %) НД США є додатковими або більш жорсткими, ніж вимоги НД України, а тому використання цих вимог НД США в проекті ЦСВЯП порівняно з вимогами НД України забезпечує підвищення рівня безпеки ЦСВЯП (категорія Б3);

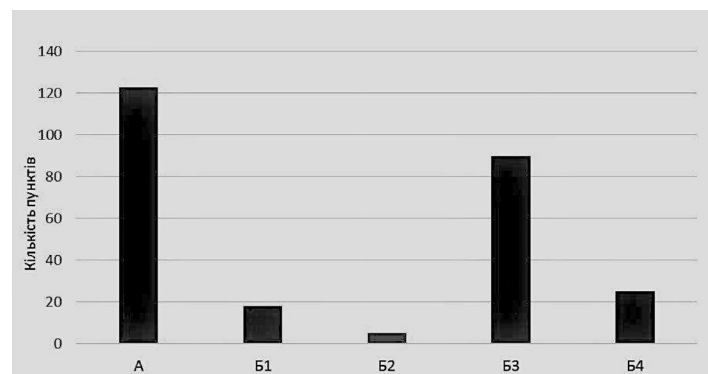


Рис. 1. Розподіл вимог НД США за основними категоріями: А — вимоги, які збігаються; Б1 — вимоги НД США, що не можуть бути застосовані до проекту ЦСВЯП; Б2 — вимоги НД США, що не можуть бути застосовані до обладнання ЦСВЯП; Б3 — вимоги НД США є додатковими або більш жорсткими, ніж вимоги НД України; Б4 — вимоги НД України, що доповнюють вимоги НД США або є більш жорсткими

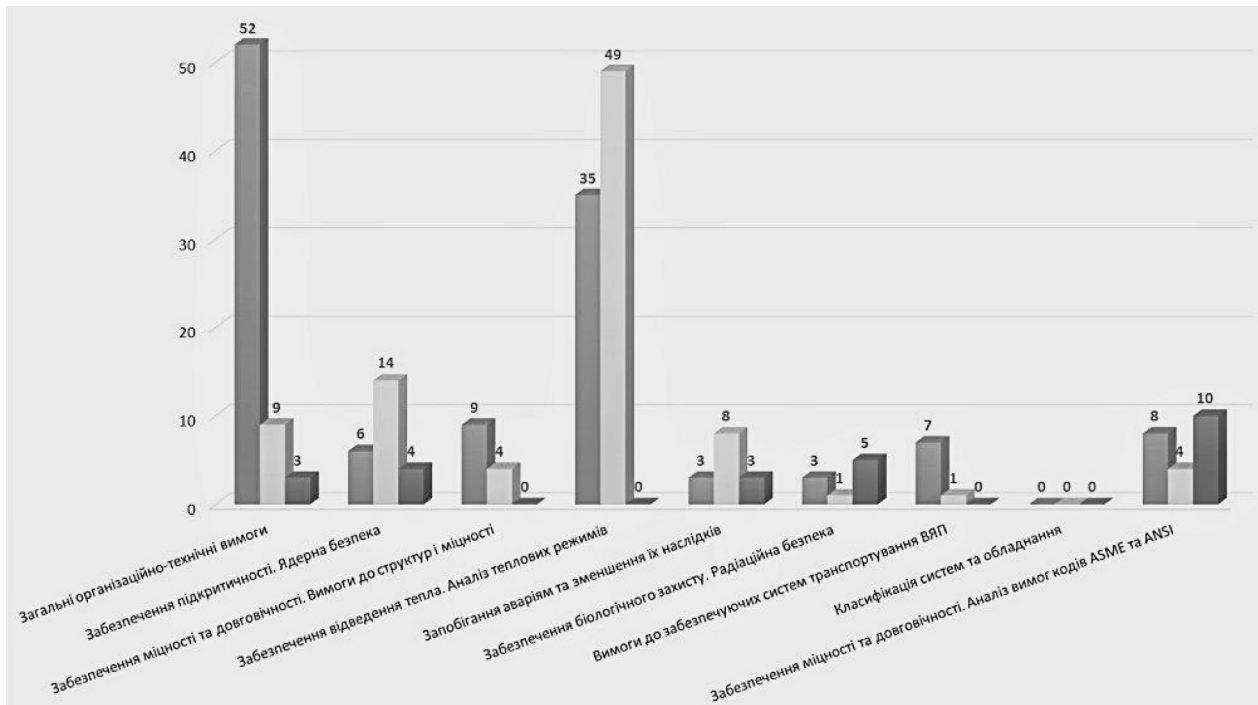


Рис. 2. Розподіл основних категорій вимог НД США і України за напрямом порівняльного аналізу: перший стовпчик — вимоги, що збігаються; другий стовпчик — вимоги НД США доповнюють вимоги НД України або є більш жорсткими; третій стовпчик — вимоги НД України доповнюють вимоги НД США або є більш жорсткими

3) 25 положень (10 %) НД України доповнюють або є більш жорсткими, ніж вимоги НД США, за напрямом (категорія Б4):

- загальні організаційно-технічні вимоги (3);
- забезпечення підкритичності (ядерна безпека) (4);
- запобігання аваріям та зменшення їх наслідків (3);
- забезпечення біологічного захисту (радіаційна безпека) (5);
- забезпечення міцності та довговічності (10);

4) 23 положення (9 %) НД США не можуть бути застосовані до проекту ЦСВЯП; це вимоги, що стосуються майданчика, питання ліцензування тощо (категорії Б1 і Б2).

Таким чином, переважна більшість вимог НД США, використаних Holtec у проектуванні обладнання СВБ ЦСВЯП та обґрунтуванні проектних рішень, відповідають або є більш жорсткими, ніж вимоги НД України. Зазначимо, що вимоги НД США є більш детальними, ніж вимоги НД України (зокрема в частині ядерної безпеки, теплового аналізу).

За категорією «вимоги НД України доповнюють або є більш жорсткими, ніж вимоги НД США» виконано детальний аналіз відмінностей з урахуванням наявної документації ЦСВЯП. За результатами аналізу встановлено:

загальні організаційно-технічні вимоги щодо наявності не менше двох бар'єрів на шляху розповсюдження радіоактивних матеріалів дотримані в проектних та обґрунтованих документах ЦСВЯП;

вимоги НД України щодо аналізу запроектованих аварій, зокрема аналізу підкритичності, мають бути враховані в обґрунтованих документах безпеки;

вимоги з радіаційної безпеки НД України [4, 5] враховані в проектних та обґрунтованих документах ЦСВЯП;

у частині обґрунтувань міцності, виконаних для обладнання ЦСВЯП, беручи до уваги досвід робіт по СВЯП-2, а також більший консерватизм вимог ASME щодо врахування комбінації навантажень, попередньо можна стверджувати,

що результати обґрунтувань міцності, виконані згідно з НД США [6], задовольнятимуть вимогам НД України [5].

Необхідно додатково виконати порівняння результатів розрахунків міцності на відповідність вимогам як НД США, так і України.

Під час цієї роботи також зроблено порівняльний аналіз основних положень міжнародних стандартів (МАГАТЕ, WENRA) з чинними національними вимогами, що стосуються сухого зберігання ВЯП, з урахуванням поточної діяльності щодо перегляду українських НД. Результати аналізу підтвердили загальну відповідність національних НД міжнародним стандартам.

Оскільки виконаний аналіз носив локальний характер, поширюючись на НД США, які визначають вимоги до проектування обладнання СВБ ЦСВЯП, було проаналізовано низку документів, які стосуються загальних вимог безпеки виведення з ВЯП при сухому зберіганні. З урахуванням викладеного, результати аналізу можуть використовуватися в інших видах діяльності, де виникає потреба в застосуванні обладнання, спроектованого відповідно до вимог НД США.

### Загальна оцінка безпеки проектних рішень ЦСВЯП і обґрунтованих документів обладнання Holtec

Для всебічної оцінки ядерної та радіаційної безпеки та прийняття попереднього регулюючого рішення, до початку виготовлення обладнання проведено експертизу технічних специфікацій (ТС) обладнання СВБ Holtec, зокрема транспортного контейнера HI-STAR, перевантажувального контейнера HI-TRAC, контейнера зберігання HI-STORM, БЦК-31 і БЦК-85 за тематичними звітами [7–13], в яких наведено обґрунтування безпеки цього обладнання. Підтвердження відповідності виготовленого обладнання Holtec вимогам ТС повинно бути

в подальшому підтверджено заводськими приймальними випробуваннями.

У рамках ліцензійного процесу також виконано експертизу ядерної та радіаційної безпеки матеріалів ПЗАБ [3] з урахуванням матеріалів проекту ЦСВЯП. Висновок експертизи ПЗАБ [3] схвалено постановою колегії Держатомрегулювання № 8 від 03.11.2016.

У тематичних звітах [7–13] та ПЗАБ [3] розглядалися оцінки міцності та надійності, ядерної безпеки, теплових режимів і радіаційного захисту.

Враховуючи технічну новизну запропонованих рішень для умов України та значний перелік створюваного обладнання закордонного виробництва, експертиза матеріалів з безпеки проводилась у такій послідовності:

розгляд попередніх документів з виявленням найважливіших питань, стосовно яких є зауваження чи коментарі та (або) існує необхідність надання додаткової інформації; проведення робочих нарад за участю спеціалістів ДНТЦ ЯРБ, відокремленого підрозділу НАЕК «Енергоатом» — ВП «Атомпроєктінжиніринг» (замовник) — та Holtec для обговорення й уточнення позицій сторін;

формування попередніх висновків по представлених документах;

повторна експертиза скоригованих замовником документів і формування кінцевої позиції експертизи на даній стадії розгляду.

З метою отримання сертифіката на затвердження конструкції пакувального комплексу HI-STAR для перевезення БЦК з ВЯП відповідно до вимог ПБПРМ-2006 розроблено звіт з аналізу його безпеки (ЗАБ) [7].

Обґрунтування безпеки технологічного процесу поводження з ВЯП на АЕС (тобто за межами ЦСВЯП) передбачається розробити в проєктах модифікацій енергоблоків АЕС.

Зупинимося далі на найбільш важливих проєктних рішеннях, які забезпечують безпеку прийнятої технології сухого зберігання ВЯП.

**Система зберігання HI-STORM.** Система зберігання HI-STORM є пасивною системою зберігання, яка має два бар'єри герметичності — оболонки БЦК, а також бар'єр біологічного захисту — бетонну оболонку контейнера зберігання HI-STORM. Пасивне відведення тепла від ВЯП забезпечується природною конвекцією повітря з надходженням його через впускні вентиляційні канали в нижній частині контейнера і виходом через випускні канали в кришці контейнера. Стальні та бетонні конструкції кришки і циліндричної обичайки контейнера HI-STORM забезпечують біологічний захист з мінімізацією дозових навантажень на персонал і потужності дози на межі майданчика ЦСВЯП.

**Багатоцільовий контейнер (БЦК).** БЦК є найбільш відповідальним елементом системи сухого зберігання ВЯП. Бар'єри герметичності БЦК складаються із зовнішньої та внутрішньої локалізуючих оболонок. Кожна оболонка є герметичною і виконує функцію локалізуючого бар'єра на шляху розповсюдження радіоактивних матеріалів та локалізуючих випромінювань у навколишнє середовище, зокрема в разі відмови одного бар'єра. Простір всередині

внутрішньої оболонки і між оболонками заповнюється інертним газом (гелієм) для запобігання деградації твєлів під час зберігання. БЦК містить корзину для ВТВЗ, яка є просторовою конструкцією, сформованою пластинами з матеріалу Metamic HT і алюмінієвими прокладками. Корзина забезпечує підкритичність конфігурації ВТВЗ у БЦК завдяки застосуванню матеріалу Metamic з вмістом бору, а також фіксоване просторове розміщення ВТВЗ у БЦК, вільне проходження й розподіл потоку газів під час зберігання ВТВЗ для ефективного тепловідведення.

**Транспортний контейнер HI-STAR.** Транспортний контейнер HI-STAR призначений для забезпечення перевезення БЦК і максимального радіаційного захисту персоналу, який бере участь в операціях транспортування й перевантаження БЦК. Транспортний контейнер обладнаний локалізуючою герметичною оболонкою, проміжною та зовнішньою обичайками.

Локалізуюча оболонка HI-STAR заповнюється гелієм для ефективного тепловідведення. Між локалізуючою оболонкою і проміжною обичайкою розташовано свинець для захисту від  $\gamma$ -випромінювання, між проміжною та зовнішньою обичайками — матеріал Holtite-V для захисту від нейтронного випромінювання.

#### Аналіз найбільш важливих факторів безпеки ЦСВЯП

**Аналіз міцності та сейсмостійкості.** У ПЗАБ [3] та в обґрунтованих звітах [8, 9] наведено розрахункові обґрунтування міцності БЦК за нормальних умов експлуатації та аварійних умов (зокрема при землетрусі) під час поводження з БЦК, завантаженими ВТВЗ, у перевантажувальному контейнері HI-TRAC, у транспортному контейнері HI-STAR та на майданчику ЦСВЯП при зберіганні у HI-STORM.

Коефіцієнти запасу комбінацій напружень для БЦК визначено відповідно до вимог стандартів США [6]. ДНТЦ ЯРБ у процесі проведення державних експертиз ЯРБ виконано порівняльний аналіз положень НД США, використаних Holtec у розробленні обладнання та систем ЦСВЯП, важливих для безпеки, а також в обґрунтуванні безпеки, із відповідними НД з ЯРБ України [14]. За результатами порівняльного аналізу сформовано нормативну основу з ЯРБ для проєктування та виконання обґрунтувань безпеки технології сухого зберігання ВЯП, що поєднується Holtec (більшість вимог НД США за напрямом «Забезпечення міцності та довговічності» можуть застосовуватися у проєктуванні ЦСВЯП як такі, що відповідають вимогам української нормативної бази; окремі вимоги НД США [15], які застосовні до обладнання та технології Holtec, доповнюють вимоги НД України). Для зовнішньої обичайки БЦК визначено розрахункові значення напружень (табл. 1), які порівнювались із допустимими значеннями напружень відповідно до [6] і [5], визначено коефіцієнти запасу за [6] і [5] та показано їх відповідність.

Розрахунок напружень зовнішньої обичайки БЦК показав, що дотримано всіх критеріїв прийнятності, всі отримані

Таблиця 1. Напруження в зовнішній обичайці БЦК

Комбінація напружень	Допустиме значення напруження для рівня А [6], МПа	Допустиме значення напруження [5], МПа	Розрахункове значення напруження, МПа	Коефіцієнт запасу за [6]	Коефіцієнт запасу за [5]
$(\sigma)_1 = P_m$	113,76	84,1 МПа	68,95	1,65	1,22
$P_m + P_b + Q$	341,29	Не регламент.	230	1,48	—

коефіцієнти запасу за [6] і [5] є більшими за одиницю. Отже, коефіцієнти запасу комбінацій напружень для БЦК, визначені відповідно до вимог стандартів США, в цілому задовольняють вимогам НД України. Аналогічні розрахункові обґрунтування, виконані за такою самою методологією, раніше застосовувались для обґрунтування міцності двох-стінного сухого екранованого пеналу нового сховища ВЯП сухого типу, що будується на Чорнобильській АЕС.

За результатами розрахункових обґрунтувань зроблено висновки щодо достатньої міцності БЦК.

У звіті [9] виконано міцнісний аналіз допоміжного обладнання та елементів СВБ систем HI-TRAC, HI-STAR і HI-STORM, наведено результати розрахунків у порівнянні з критеріями прийнятності міцності обладнання. Одночасно визначено необхідність надання Holtec більш детальної інформації щодо виконаних розрахункових обґрунтувань.

Додаткова інформація, зокрема критерії прийнятності, підстави для прийнятих припущень, опис моделей, а також обґрунтування сейсмостійкості «піраміди» (конструкція з контейнерів, яка формується в транспортному коридорі енергоблока АЕС для відправки ВЯП на ЦСВЯП) розглядатиметься спеціалістами ДНТЦ ЯРБ.

**Аналіз ядерної безпеки.** У ПЗАБ [3] та в обґрунтовуючому звіті [11] наведено аналіз нейтронно-фізичних процесів за нормальних умов експлуатації та аварійних умов, при поводженні з БЦК, завантаженими ВТВЗ, у HI-TRAC, HI-STAR, та на майданчику ЦСВЯП під час зберігання в HI-STORM. Обґрунтування ядерної безпеки [11] виконано без урахування вигорання ВЯП, тобто все ядерне паливо, що завантажуються в БЦК, консервативно розглядається як свіже. У розрахунках [11] використано розрахункові моделі, що коректно моделюють контейнери БЦК, HI-TRAC, HI-STAR та HI-STORM з консервативними припущеннями. В обґрунтуванні ядерної безпеки [11] застосовувалися програми MCNP та SCALE, які валідовані та апробовані для проведення розрахунків систем з паливом реакторів ВВЕР.

Представлені результати задовольняють нормативним вимогам щодо неперевищення ефективним коефіцієнтом розмноження нейтронів ( $k_{\text{еф}}$ ) значення 0,95 за нормальних умов експлуатації та в разі проектних аварій. Для випадку запланованої аварії з деградацією або зміною фізичних характеристик елементів Metamic-НТ слід виконати аналіз можливості виникнення критичності з оцінкою допустимого ступеня деградації або зміни фізичних характеристик цих елементів.

Для перевірки коректності результатів нейтронно-фізичних розрахунків виконано експертні перевірки розрахунки підкритичності контейнерів HI-STAR, HI-STORM, HI-TRAC з багатоцільовими контейнерами БЦК-31 та БЦК-85. Розрахунки підкритичності проводилися з використанням коду KENO-VI, який є частиною комплексу програм SCALE 6. Розрахунок нейтронно-фізичних констант для заданої геометрії комірки та, власне, розрахунок коефіцієнта розмноження нейтронів забезпечував керуючий модуль CSAS26.

Експертами проведено перевірки розрахунки максимальних значень  $k_{\text{еф}}$  для всіх контейнерів. Відповідні результати у порівнянні з даними [11] наведено в табл. 2.

Висновок Holtec, що для повністю затопленого БЦК густина води 1 г/см<sup>3</sup> відповідає максимальним розмножувальним властивостям системи, підтверджують дані на рис. 3.

Отже, результати незалежних розрахунків демонструють добрий збіг даних, що свідчить про коректність наданого розрахункового обґрунтування та дотримання умови  $k_{\text{еф}} < 0,95$ .

**Аналіз теплових режимів.** Розрахунковий аналіз теплових процесів у ПЗАБ [3] та в обґрунтовуючих звітах [7, 8, 12]

Таблиця 2. Порівняльні результати розрахунків підкритичності контейнерів

Розрахункові конфігурації	Максимальне значення $k_{\text{еф}}$ за розрахунками		Відхилення (SCALE – MCNP)
	Holtec (MCNP)	ДНТЦ ЯРБ (SCALE)	
Контейнер HI-STAR із БЦК-31	0,9449	0,9464	0,0015
Контейнер HI-STAR із БЦК-85	0,9007	0,9038	0,0031
Контейнер HI-STORM із БЦК-31	0,9448	0,9449	0,0001
Контейнер HI-STORM із БЦК-85	0,9007	0,9037	0,0030
Контейнер HI-TRAC із БЦК-31	0,9434	0,9461	0,0027
Контейнер HI-TRAC із БЦК-85	0,8998	0,9035	0,0037

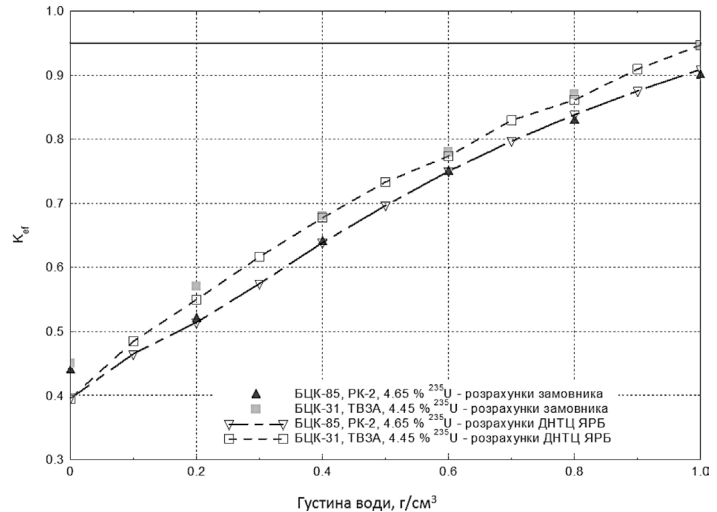


Рис. 3. Залежність  $k_{\text{еф}}$  від густини внутрішнього уповільнювача

виконано для умов нормальної експлуатації, аварійних ситуацій та аварій за допомогою розрахункового пакета ANSYS FLUENT. При цьому розглядався весь технологічний процес поводження з БЦК на енергоблоках АЕС, перевезення та зберігання БЦК. Результати розрахунків демонструють неперевищення допустимих значень температури оболонок твєлів і конструкційних матеріалів БЦК.

Для оцінки коректності результатів, ДНТЦ ЯРБ проведено вибіркові перевірки розрахунки теплового режиму контейнерів HI-STORM та HI-STAR за допомогою розрахункового пакета ANSYS CFX, тобто виконано оцінку результатів розрахунків [7, 12] з використанням іншого розрахункового коду. Метою розрахунків ДНТЦ ЯРБ було отримання розподілу температури в зоні палива. Результати розрахунків ДНТЦ ЯРБ узгоджуються з результатами розрахунків, наведеними в [7, 12].

За результатами розрахунку теплового режиму контейнерів HI-STORM, максимальне значення температури твєлів ВТВЗ становить 326,5 °С (рис. 4), дещо перевищуючи наведене в [12], — 325,0 °С. Максимальне значення температури твєлів, отримане за результатами аналізу теплового

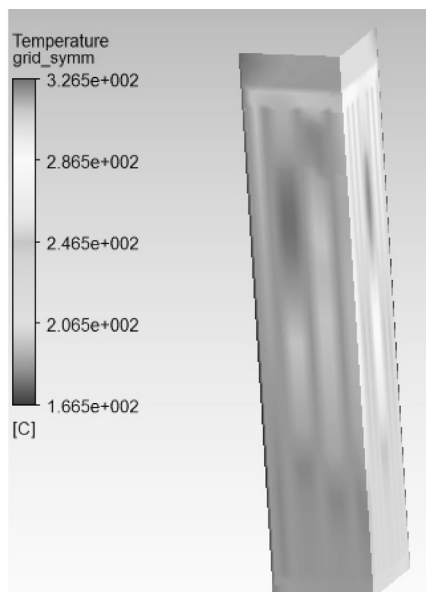


Рис. 4. Розподіл температури в БЦК-31 у HI-STORM на границі симетрії

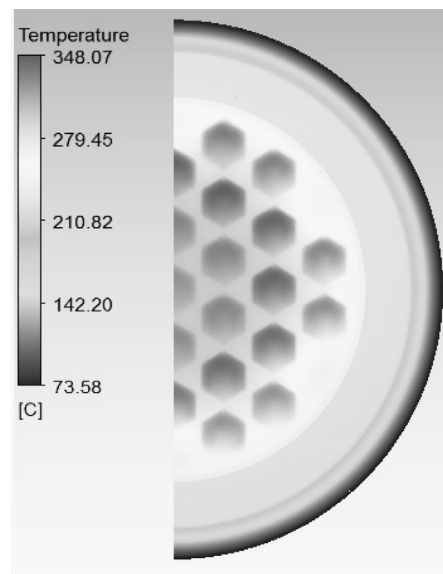


Рис. 5. Розподіл температури в поперечному перерізі контейнера HI-STAR (переріз у точці з максимальною температурою)

режиму контейнера HI-STAR, — 348,1 °С (рис. 5) — знаходиться на межі встановленого критерію прийнятності (350 °С), проте фактично не перевищує його. Згідно із ЗАБ [7], максимальне значення температури твелів ВТВЗ у HI-STAR становить 340 °С, що нижче за результат розрахунків ДНТЦ ЯРБ. Отримана різниця між значеннями температури твелів ВТВЗ у HI-STAR і HI-STORM пов'язана із введенням консервативних припущень, необхідність яких обумовлена неможливістю встановлення різних значень коефіцієнта теплопровідності в аксіальному та радіальному напрямках. Розрахунки виконано з урахуванням аксіального профілювання ВТВЗ та покосетного радіального профілювання енерговиділень у БЦК, що забезпечує отримання найбільш консервативних результатів аналізу.

**Аналіз біологічного захисту.** Результати аналізу радіаційного захисту контейнерів HI-STAR, HI-TRAC і HI-STORM наведено в ПЗАБ [3] та обґрунтовуючих звітах [7, 13].

За даними [3], колективна доза опромінення персоналу під час виконання технологічних операцій з установки одного

контейнера на місце зберігання становить 7 мЗв. До введення ЦСВЯП в експлуатацію доцільно розробити та обґрунтувати програму оптимізації доз опромінення персоналу.

ДНТЦ ЯРБ для оцінки коректності наведених у звітах [7, 13] результатів розрахунків радіаційного захисту HI-STORM проведено експертні вибіркові перевірки розрахунки. Перша частина виконаних за допомогою програмного коду MicroShield 5 (MS5) розрахунків показала, що наведені в звіті [13] показники потужності дози  $\gamma$ -випромінювання на різних відстанях від бокової поверхні HI-STORM, з урахуванням обмежених можливостей MS5, мають прийнятний збіг з результатами експертних розрахунків (табл. 3). Водночас експерти отримали значно нижчі потужності дози  $\gamma$ -випромінювання над поверхнею залізобетонної кришки контейнера HI-STORM, ніж наведені в [13]. Це спонукало до проведення серії додаткових перевірок розрахунків потужності дози над поверхнею залізобетонної кришки контейнера HI-STORM за допомогою модуля SAS4 коду SCALE 4.4a.

Таблиця 3. Розрахунки потужності дози  $\gamma$ -випромінювання від HI-STORM з БЦК-31 (31 ВТВЗ ВВЕР-1000, збагачення — 4,34 %, витримка — 7 років, вигорання — 55 МВт·доба/кг U)

№ розрахункової точки*	Відстань від поверхні, м	Потужність дози $\gamma$ -випромінювання, мЗв/год			
		За даними [13]		За результатами перевірного розрахунку кодом MS5	
		<sup>60</sup> Co	Продукти поділу	<sup>60</sup> Co	Продукти поділу
1	0	3.63E-01	2.65E-01	3.40E-02	2.29E-01
2	0	1.15E-01	2.63E-01	3.40E-02	1.14E+00
	1	5.20E-02	1.35E-01	2.10E-02	7.11E-01
	2	3.80E-02	8.40E-02	1.50E-02	4.95E-01
3	0	7.80E-02	6.00E-03	3.11E-04	9.23E-05
	1	1.40E-02	1.00E-03	2.58E-04	6.58E-05
	2	9.00E-03	1.00E-03	1.67E-04	4.28E-05

\*Розташування розрахункових точок: 1 — напроти нижніх вентиляційних отворів; 2 — середина паливної зони по висоті; 3 — напроти верхньої кришки HI-STORM.

Таблиця 4. Розрахунки потужності ефективної дози на кришці контейнера HI-STORM з БЦК-31 (31 ВТВЗ ВВЕР-1000, збагачення — 4,34 %, витримка — 7 років, вигорання — 55 МВт·доба/кг U)

Розрахунок потужності дози випромінювання	Потужність дози нейтронного випромінювання, мЗв/год	Потужність дози $\gamma$ -випромінювання, мЗв/год		Потужність дози $\gamma$ -випромінювання ( $n \rightarrow \gamma$ ), мЗв/год	Разом, мЗв/год	Похибка, %
		$^{60}\text{Co}$	Продукти поділу			
<i>На поверхні</i>						
Розрахунок [13]	2.80E-02	7.80E-02	6.00E-03	6.00E-03	1.18E-01	1.18E-01
Експертні розрахунки SCALE 4.4a	5.30E-02	9.46E-03	8.90E-04	2.60E-02	9.00E-02	<1
Експертні розрахунки MS5		3.11E-04	9.23E-05			
<i>На відстані 1 м</i>						
Розрахунок [13]	9.00E-03	1.40E-02	1.00E-03	3.00E-03	2.70E-02	1.40E+00
Експертні розрахунки SCALE 4.4a	1.70E-02	3.50E-02	3.00E-03	6.40E-03	6.20E-02	<1
Експертні розрахунки MS5		2.58E-04	6.58E-05			

Таблиця 5. Результати розрахунку потужності ефективної дози (ПЕД) від випромінювання паливної зони БЦК всередині паливної зони по висоті на відстані 2 м від бокової поверхні HI-STAR з БЦК-31 і БЦК-85

Тип випромінювання	Перевірні розрахунки ПЕД від HI-STAR з БЦК- 31, мЗв/год	ПЕД від HI-STAR з БЦК- 31 [7], мЗв/год	Перевірні розрахунки ПЕД від HI-STAR з БЦК-85, мЗв/год	ПЕД від HI-STAR з БЦК-85 [7], мЗв/год
n	0,031	0,045	0,016	0,04
n $\rightarrow$ $\gamma$	0,031	0,016	0,014	0,013
$\gamma$	0,085	0,018	0,078	0,032

Повторні експертні розрахунки показали задовільний збіг результатів на поверхні та на відстані 1 м від поверхні кришки контейнера HI-STORM за сумарною потужністю дози, але потужність дози  $\gamma$ -випромінювання продуктів поділу та  $^{60}\text{Co}$  на поверхні кришки контейнера в експертних розрахунках залишилась на порядок меншою (табл. 4). Цю розбіжність можна пояснити різними підходами до моделювання джерела іонізуючого випромінювання. В експертних розрахунках проводилося спрощення моделі гомогенізацією по всіх наявних у контейнері радіоактивних елементах, тоді як у [13] розглядалася потвельна гомогенізація, тобто гомогенізація в межах одної ВТВЗ. З огляду на те, що внесок  $\gamma$ -випромінювання продуктів поділу та  $^{60}\text{Co}$  у сумарну потужність дози становить приблизно 10 %, у цілому результати наведених у [13] розрахунків можна вважати прийнятними.

Виконані перевіріні розрахунки для HI-STAR (табл. 5) показують, що наведені у [7] потужності дози мають прийнятний збіг з результатами експертних розрахунків.

#### Питання, які мають бути розглянуті на етапах подальшої реалізації проекту ЦСВЯП

Експертиза аналізів безпеки показала необхідність представлення на подальших стадіях додаткових матеріалів і (або) рішень з окремих питань, які мають бути розглянуті регулюючим органом за участі спеціалістів ДНТЦ ЯРБ. Залежно від технічної суті питань та їхньої значимості подання матеріалів і (або) рішень передбачається або до введення в експлуатацію, або в процесі експлуатації ЦСВЯП.

1. Подання додаткової інформації до звіту [16] в частині аналізів, пов'язаних із зіткненням та падінням контейнерів в разі події, спричиненої впливом літака, — до введення ЦСВЯП в експлуатацію.

2. Виконання Holtec імовірнісної оцінки можливої зміни конфігурації ВЯП з просипанням ЯП в результаті за-проектної аварії та оцінка впливу цієї події на ядерну безпеку — до введення ЦСВЯП в експлуатацію.

3. Надання додаткових матеріалів щодо обґрунтування можливості реалізації сушіння різного ядерного палива з використанням системи примусової газової осушки (СПГО) і результатів випробувань цієї системи з урахуванням контролю ефективності системи — до введення ЦСВЯП в експлуатацію.

4. Надання додаткових матеріалів щодо обґрунтування безпеки зворотного вивантаження пошкоджених та (або) негерметичних БЦК на АЕС — до введення ЦСВЯП в експлуатацію.

З огляду на високі стандарти якості та контролю якості, які використовують у виготовленні БЦК і завантаженні ТВЗ у БЦК, забезпечується гарантовано герметичність БЦК строком не менше 20 років, у зв'язку з чим спеціальні засоби контролю герметичності БЦК не передбачаються. Ці положення приймаються для всіх проектів контейнерів Holtec і підтверджені ліцензіями NRC. На даний час, за участі відповідних наукових організацій США, провадиться діяльність з аналізу питань забезпечення герметичності на тривалій період (до 100 років). За результатами цієї діяльності будуть визначені, в разі потреби, заходи, зокрема з контролю герметичності БЦК.

З урахуванням викладеного, Holtec має передбачити розробку планів діяльності щодо експлуатації ЦСВЯП, до складу яких вводиться перспективні роботи, пов'язані з аналізами герметичності та вдосконаленням методів і способів контролю герметичності. У майбутньому Holtec доопрацює ТС HI-STORM, додаючи рекомендований метод контролю процесу старіння. Розробка планів

діяльності щодо експлуатації ЦСВЯП та надання методу контролю процесу старіння передбачається в процесі експлуатації системи зберігання HI-STORM.

## Висновки

1. Реалізація проекту ЦСВЯП дасть змогу: підвищити рівень енергетичної безпеки України; отримати економічну вигоду порівняно з існуючою ситуацією, за якої ВЯП вітчизняних АЕС відправляється на зберігання до РФ; створити значний резерв часу для прийняття обґрунтованого та економічно виправданого рішення щодо подальшого з ВЯП АЕС України, яке відповідатиме стратегії розвитку ядерного паливного циклу України та враховуватиме новітні наукові розробки та технології у цій сфері.
2. Запропоновані технологія зберігання ВЯП і відповідні технологічні рішення, зокрема обладнання, що застосовується, відповідають передовим підходам у даному виді діяльності й забезпечують дотримання всіх вимог чинних національних НПА з ядерної та радіаційної безпеки.
3. Діяльність ДНТЦ ЯРБ в рамках здійснення експертизи документів, що обґрунтовують безпеку створення ЦСВЯП, і виконання додаткових аналізів за різними напрямками забезпечення безпеки сприяє підтвердженню необхідного рівня безпеки важливого для ядерної галузі об'єкта.

## Список використаної літератури

1. Державні гігієнічні нормативи : Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). К. : Відділ поліграфії Укр. центру держсанепіднагляду МОЗ України, 1997. 121 с.
2. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки. *Офіційний вісник України* від 24.06.2005. № 23. С. 197. Ст. 1322, код акту 32646/2005.
3. Предварительный отчет по анализу безопасности ЦХОЯТ : GS-07/15-10-02. Ред. 2 / ГП «ГНИЦ СКАР». К., 2016. 1373 с.
4. НП 306.6.124-2006. Правила ядерної та радіаційної безпеки при перевезенні радіоактивних матеріалів (ПБПРМ-2006). К. : Державний комітет ядерного регулювання, 2006. 144 с.
5. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М. : Энергоатомиздат, 1989. 454 с.
6. Rules for Construction of Nuclear Facility Components (2010). Boiler and Pressure Vessel Code, III, Division 1 — Subsection NB, Class 1 Components. ASME, 26 p.
7. Отчет Holtec № HI-2166955 по анализу безопасности упаковки HI-STAR 190ML. Ред. 3. Проект Holtec № 1449. 664 с.
8. Отчет Holtec № HI-2083899 о результатах анализа аварий. Ред. 4. Проект Holtec № 1449. 117 с.
9. Отчет Holtec № HI-2084001 о результатах прочностного анализа систем HI-STAR 190ML и HI-STORM 190. Проект Holtec № 1449. Ред. 5. 304 с.
10. Отчет Holtec № HI-2073839 по оценке совместимости материалов для централизованного хранилища. Проект Holtec № 1449. Ред. 4. 188 с.
11. Отчет Holtec № HI-2083996 о результатах анализа подкритичности контейнерных систем HI-STAR 190 и HI-STORM 190. HI-2083996. Проект Holtec № 1449. Ред. 5. 71 с.
12. Отчет Holtec № HI-2083902 о результатах теплового анализа для HI-STAR 190ML, HI-STORM 190 и HI-TRAC 190. Проект Holtec International 1449. Ред. 4. 479 с.
13. Отчет Holtec № HI-2084031 о результатах анализа радиационной защиты HI-STAR 190, HI-TRAC 190 и HI-STORM 190. Проект Holtec № 1449. Ред. 5. 119 с.
14. Звіт про результати порівняльного аналізу використаних при розробленні обладнання та систем централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива вимог нормативних документів Сполучених Штатів Америки і відповідних вимог нормативних документів України : Звіт ДП «ДНТЦ ЯРБ». К., 2016.

15. NUREG-1536. Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility. Final Report. 2010.

16. Динамическая реакция контейнера HI-STORM 190 под воздействием импульсной нагрузки от удара двигателя летательного аппарата : Отчет Holtec № HI-2167334. Проект Holtec International № 1449. 51 с.

## References

1. State Health and Safety Standards: Radiation Safety Rules of Ukraine (NRBU-97) [Derzhavni hiiienichni normatyvy: Normy radiatsiinoi bezpeky Ukrainy (NRBU-97)], Kyiv, Printing Department of the State Sanitary and Epidemiological Center of Ukraine of the Ministry of Health of Ukraine, 1997, 121 p. (Ukr)
2. Basic Sanitary Rules of Radiation Safety [Osnovni sanitarni pravyla zabezpechennia radiatsiinoi bezpeky], *Official Journal of Ukraine* No. 23 dated 24 June 2005, p. 197, Art. 1322, Code 32646/2005. (Ukr)
3. Preliminary Safety Analysis Report for the Centralized SFSF [Predvaritenyi otchiot po analizu bezopasnosti TsKhOIaT], GS-07/15-10-02, Rev. 2, SE "HNITs SKAR", Kyiv, 2016, 1373 p. (Rus)
4. NP 306.6.124-2006. Nuclear and Radiation Safety Rules in Transport of Radioactive Materials (PBPRM-2006) [Pravyla yadernoi ta radiatsiinoi bezpeky pry perevezenni radioaktyvnykh materialiv (PBPRM-2006)], Kyiv, State Nuclear Regulatory Committee, 2006, 144 p. (Ukr)
5. PNAE G-7-002-86. Strength Calculation Standards for Equipment and Piping of Nuclear Power Plants [Normy raschiota na prochnost oborudovaniia i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok], Moscow, Energoatomizdat, 1989, 454 p. (Rus)
6. Rules for Construction of Nuclear Facility Components, 2010, Boiler and Pressure Vessel Code, III, Division 1, Subsection NB, Class 1 Components, ASME, 26 p.
7. Holtec Report No. HI-2166955 on Safety Analysis of HI-STAR 190ML Package [Otchiot Holtec No. HI-2166955 po analizu bezopasnosyi upakovki HI-STAR 190ML], Rev. 3, Holtec Project No. 1449, 664 p. (Rus)
8. Holtec Report No. HI-2083899 on Accident Analysis Results [Otchiot Holtec No. HI-2083899 o rezultatakh analiza avarii], Rev. 4, Holtec Project No. 1449, 117 p. (Rus)
9. Holtec Report No. HI-2084001 on Strength Analysis Results for HI-STAR 190ML and HI-STORM 190 Systems [Otchiot Holtec No. HI-2084001 o rezultatakh prochnostnogo analiza sistem HI-STAR 190ML i HI-STORM 190], Holtec Project No. 1449, Rev. 5, 304 p. (Rus)
10. Holtec Report No. HI-2073839 on Assessing Compatibility of Materials for the Centralized Storage Facility [Otchiot Holtec No. HI-2073839 po otsenke materialov dlia tsentralizovannogo khranilishchia], Holtec Project No. 1449, Rev. 4, 188 p. (Rus)
11. Holtec Report No. HI-2083996 on Subcriticality Analysis Results for HI-STAR 190 and HI-STORM 190 Container Systems, HI-2083996 [Otchiot Holtec No. HI-2083996 o rezultatakh analiza podkritichnosti konteinernykh sistem HI-STAR 190 and HI-STORM 190, HI-2083996], Holtec Project No. 1449, Rev. 5, 71 p. (Rus)
12. Holtec Report No. HI-2083902 on Thermal Analysis Results for HI-STAR 190ML, HI-STORM 190 and HI-TRAC 190 [Otchiot Holtec No. HI-2083902 o rezultatakh teplovogo analiza dlia HI-STAR 190ML, HI-STORM 190 i HI-TRAC 190], Holtec International Project No. 1449, Rev. 4, 479 p. (Rus)
13. Holtec Report No. HI-2084031 on Radiation Protection Analysis Results for HI-STAR 190, HI-TRAC 190 and HI-STORM 190 [Otchiot Holtec No. HI-2084031 o rezultatakh analiza radiatsionnoi zashchity HI-STAR 190, HI-TRAC 190 i HI-STORM 190], Holtec Project No. 1449, Rev. 5, 119 p. (Rus)
14. Report on Results of Comparative Analysis of U.S. Regulatory Requirements and Relevant Requirements of Ukrainian Regulations Used to Design Equipment and Systems of the Centralized Spent Fuel Storage Facility: SSTC NRS Report [Zvit pro rezultaty porivnialnoho analizu vykorystanykh pry rozroblenni obladnannia ta system tsentralizovanoho skhovyscha vidpratsiovanoho yadernoho palyva vymoh normatyvnykh dokumentiv Ukrainy: Zvit DP "DNTTs YaRB"], Kyiv, 2016. (Ukr)
15. NUREG-1536, Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility, Final Report. 2010.
16. Dynamic Reaction of HI-STORM Container 190 under Impact of Impulse Load from Aircraft Engine Strike [Dinamicheskaia reaktsiia konteinera HI-STORM 190 pod vozdеistviem impulsnoi nagruzki ot udara dvigatelja letatel'nogo apparata], Holtec Report No. HI-2167334, Holtec International Project No. 1449, 51 p. (Rus)

Отримано 07.07.2017.