

**МІНІСТЕРСТВО ЕКОЛОГІЇ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНА ЕКОЛОГІЧНА АКАДЕМІЯ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ  
ТА УПРАВЛІННЯ**

**ЗАДУНАЙ ОЛЕКСІЙ СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 621.039.4

**НАУКОВІ ЗАСАДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ  
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МОКРИХ СХОВИЩ  
ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛЬНОГО**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Київ – 2019**

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано в Державному науково-дослідному інституті спеціального зв'язку та захисту інформації.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Азаров Сергій Іванович,**  
Інститут ядерних досліджень НАН України, провідний науковий співробітник відділу дослідницького ядерного реактора

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки  
**Ващенко Володимир Миколайович,**  
Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, професор кафедри екологічного моніторингу, геоінформаційних та аерокосмічних технологій

кандидат технічних наук, доцент  
**Маджд Світлана Михайлівна,**  
Науково-навчальний інститут екологічної безпеки Національного авіаційного університету, доцент кафедри екології

Захист дисертації відбудеться 07 березня 2019 р. об 11-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.880.01 у Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління Мінприроди України за адресою: 03035, м. Київ, вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління Мінприроди України за адресою: 03035, м. Київ, вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2 та на сайті [www.dea.edu.ua](http://www.dea.edu.ua).

Автореферат розіслано «\_\_\_» лютого 2019 року.

Вчений секретер  
спеціалізованої вченої ради Д 26.880.01

Т.Г. Іващенко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП), що розташовані на території атомних електростанцій (АЕС) є джерелами підвищеної екологічної небезпеки як у регіональному, так і у національному масштабах.

Зокрема, на Чорнобильській атомній станції (ЧАЕС) зберігання відпрацьованих тепловиділяючих збірок (ТВЗ) здійснюється в проміжному сховищі мокрого типу СВЯП-1, існуюча проектна потужність якого не дозволяє розмістити на довгострокове зберігання відпрацьоване ядерне паливо (ВЯП) в повному обсязі, слід зазначити, що проектний термін експлуатації цього сховища закінчився в 2016 році.

Під час створення систем забезпечення екологічної безпеки мокрих сховищ відпрацьованого ядерного палива у колишньому СРСР не достатньо враховувались можливості виникнення надзвичайних ситуацій з погіршенням їх екологічного стану та прилеглих до них територій внаслідок прояву небезпечних чинників землетрусів, вибухів, пожеж, тощо. Про можливість виникнення таких аварій свідчить світовий досвід, зокрема: короткочасна (близько доби) втрата охолодження басейнів з відпрацьованим ядерним паливом на підприємстві з переробки палива в Селлафілді (Великобританія), потрапляння води з баку басейну витримки (БВ) ВЯП до реакторного відділення (помилка оперативного персоналу) на Хмельницькій АЕС, а також недавня тривала втрата охолодження приреакторних басейнів на енергоблоках АЕС «Фукусіма-1», що призвело до вкрай важких радіаційно-екологічних наслідків.

У роботах О.О. Ключникова, А.В. Носовського, В.І. Скалозубова, В.М. Ващенко, С.І. Азарова, Ю.Л. Забулонова, С.М. Маджд, Б.І. Огороднікова, М.М. Талерко та інших вивчалися питання, що стосуються негативного впливу на довкілля наслідків аварій на території Чорнобильської зони, але процес формування техногенно-екологічної небезпеки та її проявів в процесі експлуатації мокрих сховищ відпрацьованого ядерного палива в їх роботах досліджено не повною мірою.

Науково-технічний прогрес у сфері забезпечення екологічної безпеки мокрих сховищ відпрацьованого ядерного палива може бути досягнутий лише на підставі розкриття особливостей виникнення та розвитку можливих аварій різного генезису на таких об'єктах, а також удосконалення методології прогнозування шкідливого впливу на довкілля їх наслідків, що і обумовило актуальність роботи.

**Зв'язок з науковими програмами і темами.** Дослідження за темою дисертації виконано відповідно до: Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 року № 605-р; Закону України від 15 січня 2009 року № 886-VI «Загальнодержавна програма зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта "Укриття" на екологічно безпечну систему», Закону України від 9 лютого 2012 року № 4384-VI «Про поводження з відпрацьованим ядерним паливом при розміщенні, проектуванні та будівництві централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій»; «Комплексної (зведеної) програми підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних електростанцій» з урахуванням уроків великої аварії на АЕС Фукусіма-1, затвердженої постановою Кабінету міністрів України від 7 грудня 2011 р. № 1270,

під час виконання НДР в Інституті державного управління у сфері цивільного захисту (ІДУЦЗ) Державної служби України з надзвичайних ситуацій «Наукові засади створення системи захисту функціонування критичної інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій» (Державний реєстраційний № 0118U003078), у якій здобувач є виконавцем.

**Ідея роботи** полягає у підвищенні ефективності забезпечення екологічної безпеки мокрих сховищ відпрацьованого ядерного пального та прилеглих територій шляхом удосконалення методології прогнозування шкідливого впливу на довкілля наслідків техногенних аварій на них.

**Мета і завдання досліджень.** Метою роботи є розкриття особливостей виникнення і розвитку техногенних аварій на мокрих сховищах відпрацьованого ядерного пального як чинників впливу на екологічну безпеку довкілля.

Для досягнення визначеної мети поставлено до розв'язання наступні задачі досліджень:

- провести аналіз світового та національного досвіду щодо систем забезпечення екологічної безпеки мокрих сховищ відпрацьованого ядерного пального та виявити шляхи підвищення їх ефективності;

- провести аналіз методики оцінювання рівня потенційної екологічної небезпеки існуючих сховищ відпрацьованого ядерного пального, основних критеріїв забезпечення техногенно-екологічної безпеки та ефективності їх застосування, а також аналіз стану і режимів роботи об'єкта СВЯП-1 ЧАЕС в аварійних ситуаціях для визначення імовірності подій запроектованих аварій на об'єкті досліджень;

- здійснити оцінювання невизначеностей в імовірнісних і детерміністських моделях технологічних систем та аварійних процесів в мокрих сховищах відпрацьованого ядерного пального;

- удосконалити методику прогнозування небезпечних ситуацій та моделювання наслідків їх впливу на довкілля в процесі розвитку аварії на мокрому сховищі відпрацьованого ядерного пального на прикладі об'єкту СВЯП-1;

- науково обґрунтувати та розробити удосконалену систему контролю вибухота пожежонебезпечних ситуацій в приміщеннях мокрого сховища відпрацьованого ядерного пального;

- на основі результатів прогностичного моделювання розробити науково-практичні рекомендації і пропозиції щодо підвищення ефективності забезпечення екологічної безпеки об'єкта СВЯП-1.

**Об'єкт дослідження** - процес формування техногенно-екологічної небезпечності під час експлуатації мокрого сховища відпрацьованого ядерного пального.

**Предмет дослідження** - вплив чинників на процес формування техногенно-екологічної небезпечності під час експлуатації мокрого сховища відпрацьованого ядерного пального.

**Методи дослідження.** Для досягнення визначеної мети та розв'язання поставлених завдань використано теоретичні та експериментальні методи. Методи аналізу і синтезу використовувались для узагальнення літературних джерел та виявлення основних напрямків досліджень. Методом моделювання було створено аналітичну модель визначення стану аварійних процесів в басейні витримки та теплофізичну модель для визначення локальних значень температур

тепловиділяючих збірок за аварійної ситуації, також проведено математичне моделювання можливих аварій на мокрих сховищах відпрацьованого ядерного пального. З використанням імовірнісного та детерміністського методів було здійснено оцінку рівня потенційної небезпеки об'єкту СВЯП-1.

**Наукова новизна** полягає у розкритті особливостей виникнення і розвитку техногенних аварій на мокрих сховищах відпрацьованого ядерного пального як передумови науково-технічного прогресу у сфері забезпечення їх екологічної безпеки та прилеглих територій.

Основні наукові результати такі.

*Уперше:*

- розроблена аналітична модель виникнення та розвитку аварійних процесів в басейні витримки мокрого сховища, сутність якої полягає у застосуванні теорії надійності та поетапного комплексного використання методів: імовірнісного – для ранжування небезпечних подій і детерміністського – для моделювання аварійних процесів та їх екологічних наслідків, що на відміну від вже відомих, дає змогу уникати помилкових управлінських рішень у разі виникнення надзвичайних ситуацій різного генезису;

- із застосуванням комп'ютерної програми «Best-T» розроблено теплофізичну модель і визначено локальні значення температур тепловиділяючих збірок в аварійній ситуації, пов'язаній з припиненням циркуляції води через басейн витримки, що дозволило оптимізувати обсяг обчислювальних робіт у частині розрахунків теплогідравлічних процесів у рамках комплексного обґрунтування екологічної безпеки мокрих сховищ відпрацьованого ядерного пального.

*Набула подальшого розвитку* методика визначення якісного стану конструкції басейну витримки, що дало можливість розраховувати теплотехнічні параметри мокрих сховищ відпрацьованого ядерного пального для різного впливу навантажень, наприклад, при зміні температури теплоносія або енерговиділенні у відпрацьованому ядерному паливі. Цю методику можливо застосовувати для оцінювання ресурсу конструкцій існуючих басейнів витримки на діючих АЕС України.

*Удосконалено* систему контролю вибухо- та пожежонебезпечних ситуацій в приміщеннях мокрих сховищ відпрацьованого ядерного пального, яка на відміну від існуючої, передбачає використання науково обґрунтованого та розробленого нового способу визначення параметрів концентрації водню в повітрі інтегрально-оптичним хімічним абсорбційним сенсором.

**Практичне значення отриманих результатів:** Практична цінність дисертаційної роботи визначається тим, що запропоновані методи та моделі були використані в ході виконання наступних завдань:

- аналіз вимог нормативно-правових актів України з питань радіаційної безпеки з метою їх гармонізації до вимог міжнародних організацій (МАГАТЕ, МКРЗ), законодавства ЄС, що сприяє забезпеченню дотримання і виконання зобов'язань, узятих за міжнародними договорами України з питань ядерної та радіаційної безпеки;

- підготовка та організація науково-технічних досліджень і програм у сфері безпеки використання ядерної енергії.

Основні результати досліджень використані в навчальному процесі в ІДУЦЗ

Державної служби України з надзвичайних ситуацій для проведення лекційних та практичних занять при викладанні дисципліни «Пожежна безпека промислових об'єктів» (заочна форма, спеціальність 261 «Пожежна безпека», галузь знань 26 «Цивільна безпека», магістратура) та при проведенні курсів підвищення кваліфікації викладачів навчальної дисципліни «Безпека життєдіяльності» (цикл фахової підготовки, теми «Техногенні небезпеки та їх наслідки», «Типологія аварій на потенційно-небезпечних об'єктах»), що підтверджується отриманим актом про впровадження; в ході виконання дослідно-конструкторської роботи, шифр «Платформа-1» в Державному науково-дослідному інституті спеціального зв'язку та захисту інформації. Впровадження результатів дослідження дозволило забезпечити підвищення ефективності функціонування систем спеціального зв'язку в Україні, про що зазначено в акті впровадження.

Матеріали дисертаційних досліджень використано в звіті з науково-дослідної роботи «Наукові засади створення системи захисту функціонування критичної інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій» (Державний реєстраційний № 0118U003078), яка виконувалась в ІДУЦЗ.

Розроблено новий спосіб визначення параметрів концентрації водню в повітрі інтегрально-оптичним хімічним абсорбційним сенсором (подано заявку на отримання патенту на корисну модель).

**Особистий внесок здобувача** полягає у безпосередній участі в спільних роботах, узагальненні та критичному аналізі наукової та нормативної літератури і документів за темою дисертаційної роботи, проведенні теоретичних досліджень, апробуванні результатів досліджень, формулюванні основних положень та висновків. Програмна реалізація комп'ютерних розрахунків виконана за співавторства.

**Апробація результатів дисертації.** Результати теоретичних та експериментальних дисертаційних досліджень доповідались, обговорювались та отримали схвалення на міжнародних та національних наукових конференціях, форумах, круглих столах, тощо, а саме: «Екологічна безпека держави» (Київ, 2017); VI Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (Вінниця, 2017); «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення» (Харків, 2017); «Проблеми екологічної безпеки» (Кременчук, 2017); «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (Львів, 2017); «Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України» (Київ, 2017); «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика» (Херсон, 2017); «XXIV Щорічна наукова конференція інституту ядерних досліджень НАН України» (Київ, 2017); «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (Черкаси, 2018); «Актуальные вопросы совершенствования надзорной и правоприменительной деятельности МЧС» (Минск, 2018); «Пожежна безпека: проблеми та перспективи» (Харків, 2018); «Актуальні проблеми сучасної хімії» (Миколаїв, 2018); «Финансово-экономическое развитие Украины в условиях трансформационных преобразований» (Львів, 2018); Науково-практичний семінар «Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація» (Харків, 2018).

**Публікації.** Результати дисертації викладено в 23-х наукових роботах у фахових наукових виданнях (13 статей у наукових фахових виданнях з переліку

МОН України, 9 опубліковані у закордонних наукових журналах) та 19-и тезах і матеріалах наукових конференцій.

Дисертація складається з анотації, вступу, 5-ти розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 152 посилання та 4-х додатків. Загальний обсяг роботи складає 146 сторінок, вона містить 23 рисунки і 29 таблиць.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано ідею, мету і завдання досліджень, наведено головні наукові положення та результати, винесені на захист, а також відомості про практичне значення та впровадження результатів роботи.

**У першому розділі** на основі наукових літературних джерел досліджено світовий досвід екологічно-безпечного поводження з ВЯП. Не дивлячись на те, що на підприємствах атомної галузі надходження в навколишнє середовище техногенних радіонуклідів строго контролюється, все ще залишається невирішеною проблема забезпечення екологічної безпеки тимчасових сховищ ВЯП, створених у другій половині минулого століття без належного врахування природних особливостей території і забезпечення необхідного рівня захисту.

В окремих випадках спостерігається викид або витік радіонуклідів з ємностей сховищ, надходження їх в навколишнє середовище і залучення в біологічний круговорот. Оцінки ризику радіоактивного забруднення, розробка захисних технологій вимагають розуміння механізмів, процесів і факторів, що регулюють рухливність радіонуклідів в ґрунтових, поверхневих водах, надходження радіонуклідів у ґрунт, рослини і в організм тварин і людини.

Проведено аналіз аварій на існуючих сховищах ВЯП, який включає питання порушення нормальних умов експлуатації, постульовані і гіпотетичні аварії, а також оцінки радіологічних наслідків для визначальних вихідних подій.

Велика техногенна радіаційна аварія на японській АЕС «Фукусіма-1» поставила під сумнів концепцію глибокоешелонованого захисту як способу запобігання експлуатаційних ризиків.

Отже, дослідження причин виникнення аварій на АЕС, послідовності подій від вихідного до кінцевого стану дає можливість вироблення заходів, спрямованих на запобігання і недопущення повторення широкого класу аналогічних аварійних ситуацій за рахунок своєчасно прийнятих технічних і організаційних заходів. Задіяти всі зворотні зв'язки аналізу досвіду експлуатації таких складних комплексів, якими є АЕС, вкрай важливо і необхідно.

Сьогодні на ЧАЕС основною спорудою загально станційної системи зберігання ВЯП є СВЯП-1 «мокрого типу», яке призначене для прийому і зберігання ВТВЗ після попередньої, не менше ніж 1,5-річної витримки їх в БВК або реакторах енергоблоків 1,2,3, а також для операцій вивантаження ВТВЗ зі СВЯП-1 з подальшим переміщенням його в СВЯП-2 «сухого типу».

У 2016 році на ЧАЕС завершилось переміщення ВЯП з трьох енергоблоків до СВЯП-1. На цей процес пішло близько 10 років, проте зараз 1-й, 2-й і 3-й енергоблоки повністю звільнені від «відходів», що накопичилися за весь період роботи станції. Вивантаження палива з зазначених блоків позбавило їх статусу ядерних установок, а відповідно - позбавило Чорнобильську АЕС статусу атомної станції. Втім, СВЯП-1 свій потенціал вже практично відпрацювало - сховище було споруджено в 1986 році вже після аварії на ЧАЕС. Його проектний ресурс

розрахований на 30 років експлуатації, але завдяки проведеним ремонтним роботам цей термін вдалося продовжити ще на 10 років. Термін експлуатації сховища з урахуванням оновленого звіту оцінки безпеки подовжено до 31 грудня 2025 року.

Для забезпечення можливості продовження терміну експлуатації СВЯП-1 необхідно виконати реконструкцію сховища.

На основі проведеного аналізу сучасного рівня безпеки СВЯП-1 можна зробити висновки про те, що завдання дослідження, присвяченого оцінці ядерної, радіаційної та екологічної безпеки, для досягнення мети роботи поставлені вперше в практиці забезпечення безпеки сховища, що дозволяє провести аналіз не тільки безпеки функціонування СВЯП-1, але обґрунтовано продовжити термін його експлуатації на основі принципів і загальних критеріїв безпеки в процесі зберігання ВЯП, які задовольняють вимогам чинних міжнародних та національних норм і правил.

**У другому розділі** з використанням імовірнісного та детерміністського методів було здійснено оцінку рівня потенційної небезпеки СВЯП-1.

Сучасний підхід до аналізу безпеки об'єктів атомної енергетики (атомних електричних станцій), сховищ зберігання ВЯП, сховищ радіоактивних відходів), як об'єктів підвищеної радіоекологічної небезпеки, ґрунтується на комбінації детерміністичних та імовірнісних методів (НП 306.2.141-2008, INSAG-25).

Методологія імовірнісного аналізу безпеки об'єктів атомної енергетики сформована і розвинена в роботах Н. Расмусена (проект WASH-1400), Ф. Фармера, С. Каплана, Г. Апостолакиса, Ю. Швирияєва, А. Букринського, Ю. Комарова та інших вчених. Проте наявна методологія імовірнісного аналізу безпеки не приділяє належної уваги проявам, яким властиві недостатній обсяг знань щодо аварійних феноменів, неповнота проаналізованих станів об'єкта, вихідних подій і змодельованих елементів, що інтерпретуються загалом як невизначеності.

Принциповою складністю та джерелом невизначеностей є статистична база для розробки імовірнісних моделей об'єктів атомної енергетики. Ця обставина обумовлена проблемами організації збору та обробки статистичної інформації з надійності обладнання та коректності її використання. Зважаючи на це, адекватність оцінок ризику об'єктів атомної енергетики, що розраховується за результатами імовірнісного аналізу безпеки, в окремих випадках може обґрунтовано братися під сумнів.

Метою імовірнісного аналізу була оцінка рівня безпеки СВЯП-1 та вироблення рекомендацій щодо підвищення цього рівня за рахунок впровадження технічних рішень і організаційних заходів.

Імовірнісний аналіз охоплював наступні типи ініціюючих подій (ІП): внутрішні ІП, внутрішні впливи, пов'язані з пожежами та затопленнями, зовнішні впливи.

Детерміністський аналіз безпеки СВЯП-1 дозволив провести:

- моделювання виникнення та розвитку пожеж (програми FIRST, COMPF2, SOFIE, BERRY та ін.);

- аналіз запроектованих аварій зі зневодненням відсіків сховища, виконаний на основі тривимірних моделей відсіку сховища з використанням спеціалізованих програмних комплексів для виконання теплогідравлічних розрахунків (ANSYS, VIBROS2.1, CILINDR-KOMPLE, СОКПАТ/ВЗ та ін.).

У розрахунково-аналітичних дослідженнях були задіяні програми обчислювальної гідродинаміки (CFD-коди), а також коди в зосереджених



параметрах GOTHIC, TONUS, COCOSYS, ASTEC, КУПОЛ-М, КУПОЛ-МТ, що широко використовуються в поточній практиці обґрунтування безпеки АЕС.

На основі детерміністського аналізу безпеки були розроблені заходи з керування запроектованими аваріями мокрого сховища з оцінкою радіаційних наслідків.

У роботі, основними елементами рівня потенційної небезпеки для СВЯП-1, що входять в систему аналізу, були обрані: ідентифікація джерел небезпеки, небезпечне явище, шкідливі фактори та фактори ураження, об'єкт впливу, збиток, витрати на заходи захисту та відвернений збиток.

Завдання аналізу та оцінювання рівня потенційної небезпеки СВЯП-1 вирішувалося як послідовне виконання етапів розробленого алгоритму (рис.1).

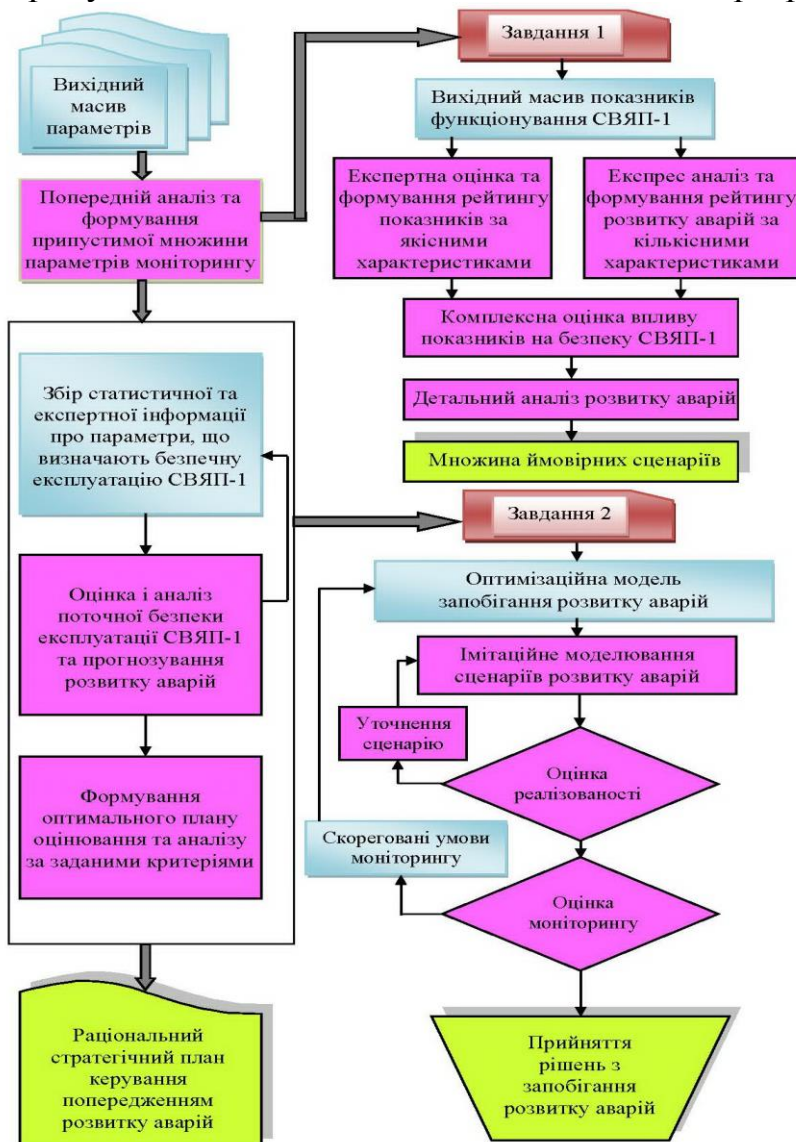


Рис.1. Алгоритм аналізу та оцінювання рівня потенційної небезпеки СВЯП-1

Під час підготовки матеріалів оцінки впливів СВЯП-1 на навколишнє середовище використовувалися фондові та архівні дані, доповнені натурними обстеженнями з подальшими розрахунками, аналізами та узагальненнями на основі спеціалізованих методик відповідної спрямованості.

Прогнозні розрахункові оцінки виконані з використанням сучасних (застосовуваних в західних країнах з розвинутою атомною технологією) комп'ютерних кодів, програм, розрахункових методів і критеріїв, рекомендованих НАНУ, УААН, Мінекології і ресурсів, Міністерством охорони здоров'я та іншими провідними організаціями України, а також такими міжнародними організаціями, як МАГАТЕ, МКРЗ, НКДАР ООН та іншими.

У третьому розділі наведено стислий опис СВЯП-1 та його призначення, а також було здійснено класифікацію джерел небезпеки на СВЯП-1.

Сьогодні на Чорнобильській АЕС зберігання опромінених ТВЗ здійснюється в сховищі мокрого типу (СВЯП-1). Під СВЯП мокрого типу розуміється таке сховище, в якому ВЯП зберігається в басейні під товщею води.

Сховище ВЯП складається з 5-ти басейнів витримки: 4-х робочих і 1-го резервного (рис.2). Зберігання відпрацьованих збірок передбачено поштучно в спеціальних трубчастих пеналах, залитих водою, з розстановкою пеналів в басейні з кроком 23x11 см. Кожний відсік БВ являє собою приміщення з такими основними характеристиками: довжина – 26600 мм; ширина – 5600 мм; глибина – 11300 мм; об'єм води – 1600 м<sup>3</sup>; об'єм надводного простору – 90 м<sup>3</sup> та розрахований на зберігання 4380 відпрацьованих ТВЗ.

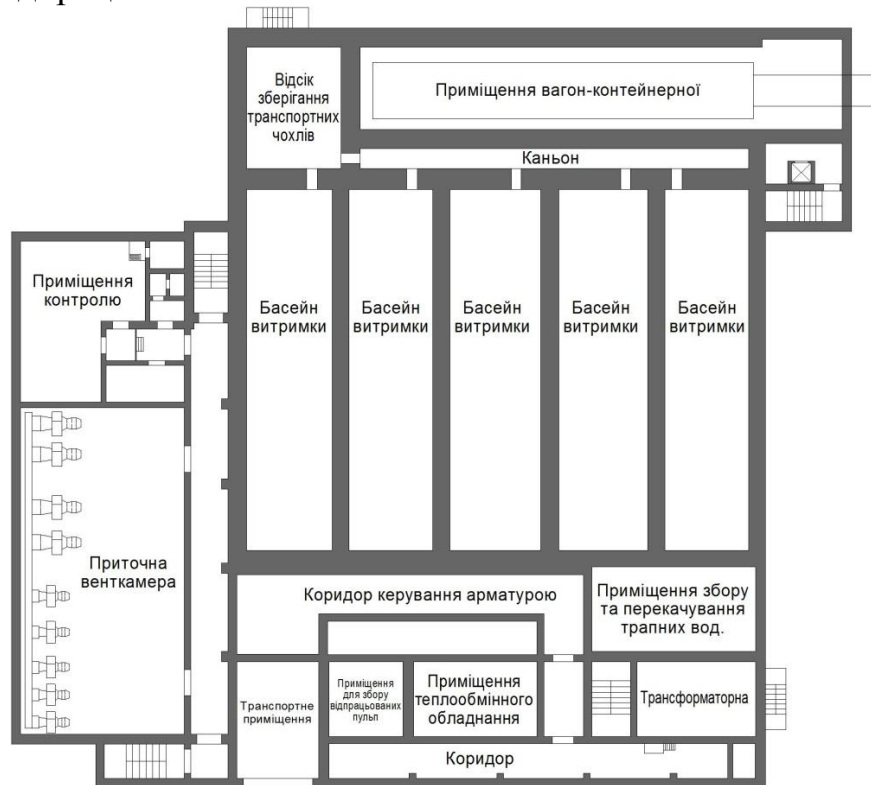


Рис.2. Схематичне зображення комплексу «мокрого» зберігання СВЯП-1

Споруди СВЯП-1 за умовами їх відповідності щодо ядерної, радіаційної і екологічної безпеки та забезпечення функціонування систем та обладнання, що розміщуються в цих спорудах, поділяються на такі категорії:

- категорія I, до якої відносяться споруди, в яких безпосередньо виконується поводження з ВЯП, до завершення упакування ВЯП в герметичні каністри;
- категорія II, до якої відносяться споруди, що не ввійшли в категорію I, та відмови яких (або їх конструкцій) можуть привести до погіршення радіаційного стану з перевищенням встановлених в проекті допустимих рівнів;
- категорія III, до якої відносяться всі інші споруди, які не ввійшли до категорії I та II.

При експлуатації споруд враховуються впливи та навантаження і їх сполучення відповідно до державних будівельних норм, зокрема, такі особливі впливи:

- для споруд категорії I впливи екстремальних природніх та техногенних подій з імовірністю  $10^{-4}$  рік та вище;
- для споруд категорії II впливи екстремальних природніх та техногенних подій з імовірністю  $10^{-2}$  рік та вище.

В ході дисертаційних досліджень було визначено Перелік вихідних подій, що можуть призвести до порушення нормальних умов експлуатації СВЯП-1, аварійних ситуацій або аварій (табл. 1).

Таблиця 1. Перелік вихідних подій, в результаті яких виникають порушення нормальної експлуатації та проектні аварії, для аналізу безпеки СВЯП-1

Вихідна подія		
Зовнішня (внутрішня) подія. Одинична відмова. Помилка персоналу.	Залежна відмова	Незалежна відмова
Сейсмічні явища та інші природні явища, що властиві майданчику ЧАЕС	1. Відмова елементів обладнання системи охолодження, трубопроводів	Відмова одного локалізуючого елемента локалізуючої системи безпеки
	2. * Відмова витяжки системи вентиляції БВ	_*_
	3. Припинення енергопостачання системи нормальної експлуатації	Незапуск дизель-генератора
	4. Пожежа в приміщенні насосів системи розхолодження БВ	Помилка оператора (не підключення підживлення БВ)
Знеструмлення СВЯП-1	1. Відмова всіх механізмів, які живляться від секції власних потреб нормальної експлуатації: - відмова системи розхолодження БВ	Відмова одного елемента локалізуючої системи безпеки
	2. Відмова в системі контролю температури і рівня води в БВ	-
Пожежа в приміщеннях: - насосів системи розхолодження БВ; - кабельних тунелів.	1. Відмова системи розхолодження БВ	Помилка оператора (не підключення підживлення БВ)
	2. Відмова в системі контролю температури і рівня води в БВ	
Аварії в системах, які пов'язані зі зберіганням або поводженням з ВЯП, що призводять до пошкодження обладнання для зберігання і транспортування ВЯП	1. Відмова системи вентиляції	Відмова одного елемента локалізуючої системи безпеки
Протікання басейну витримки або розрив трубопроводів БВ, що приводить до зниження рівня води	-	Помилка оператора (не підключення підживлення БВ)
Падіння предметів, які можуть змінити розташування і цілісність ТВЗ (гідрозатор, окремі ТВЗ, гермопенали, плити перекриття, контейнер, чохол для свіжих ТВЗ, знімний стелаж)	1. Порушення тепловідведення від опромінених ТВЗ	Відмова одного елемента локалізуючої системи безпеки
	2. Зміна розташування опромінених ТВЗ	
	3. Порушення цілісності опромінених ТВЗ	
	4. Протікання басейну витримки	
Помилка персоналу (оператора), пов'язана зі зняттям блокування устаткування і виконання ручних операцій при управлінні схемою розхолодження БВ	Зменшення концентрації поглиначів у воді БВ	Відмова одного елемента локалізуючої системи безпеки
	Відключення насоса (засувки)	
Виникнення СПЛР для системи зберігання та поводження з ВЯП	-	-
Зневоднення сховища ВЯП	-	-

При експлуатації споруд категорії I також потрібно розглянути екстремальні природні та техногенні події з імовірністю в діапазоні  $10^{-4}$ ÷ $10^{-6}$  рік (смерч, землетрус, падіння літака тощо) та врахувати їх в певному обґрунтованому обсязі або обґрунтувати можливість відмови від їх врахування.

Безпека СВЯП-1 забезпечується за рахунок послідовної реалізації стратегії глибокоешелонованого захисту, що базується на застосуванні системи фізичних бар'єрів на шляху розповсюдження в навколишнє середовище іонізуючого випромінювання та радіоактивних речовин і системи технічних та організаційних заходів щодо захисту фізичних бар'єрів і збереження їх ефективності. Основною метою реалізації стратегії глибокоешелонованого захисту є своєчасне виявлення і усунення факторів, які призводять до порушень нормальної експлуатації, виникнення аварійних ситуацій, а також запобігання їх переростанню в аварії, обмеження і ліквідація наслідків аварій.

У четвертому розділі проведено імовірнісний аналіз можливих аварій на СВЯП-1 та оцінка їх наслідків, а також представлено розроблену системи контролю вибухопожежонебезпечних ситуацій в приміщеннях СВЯП-1.

СВЯП-1 вважається безпечним, коли його радіаційний вплив на персонал, населення й навколишнє середовище в процесі нормальної експлуатації і під час проектних аварій не призводить до перевищення встановлених доз опромінення персоналу та населення і нормативів за викидами і скидами радіоактивної речовини в довкілля і навіть обмежує цей вплив у разі виникнення запроектованих аварій.

СВЯП-1 може функціонувати у таких режимах і станах: режим нормальної експлуатації; режим відхилення від нормальної експлуатації; режим проектної аварії; режим запроектованої аварії; стан ліквідації наслідків аварії; режим виведення з експлуатації.

У табл.2 наведено деякі дані з оцінки ймовірності окремих можливих подій, результатами впливу яких може бути виникнення запроектованих аварій на СВЯП-1, які отримані за допомогою проведеного ІАБ.

Таблиця 2. Імовірність подій запроектованих аварій на СВЯП-1.

Зовнішні впливи	$4,5 \cdot 10^{-7}$
Внутрішні вихідні події, пов'язані з падінням крана і ТПК	$1,9 \cdot 10^{-7}$
Внутрішні впливи, пов'язані з пожежами	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Внутрішні впливи, пов'язані з затопленням	$5,4 \cdot 10^{-8}$
Внутрішні вихідні події, пов'язані з відмовами систем	$4,5 \cdot 10^{-8}$
<b>РАЗОМ</b>	<b><math>0,9 \cdot 10^{-6}</math></b>

З табл. 2 видно, що сумарне значення ймовірності виникнення запроектованих аварій з тяжкими радіаційними наслідками на СВЯП-1 перевищує рівні, встановлені нормами радіаційної безпеки для прийняття невідкладних рішень щодо обов'язкової евакуації населення, становить  $0,9 \cdot 10^{-6}$  на рік.

За попередніми результатами виконаного ІАБ, значимість окремих подій в загальній ймовірності запроектованих аварій розподілилась таким чином: зовнішні впливи – 51%; внутрішні впливи, пов'язані з пожежами – 21%; внутрішні події, пов'язані з падіннями крана і ТПК – 17%; внутрішні події, пов'язані з затопленням – 6%; внутрішні події, пов'язані з відмовами систем – 5%.

У роботі було проведено моделювання можливих аварій на СВЯП-1 та оцінка їх наслідків:

1. Вибухопожежна небезпека в процесі зберігання ВЯП.

Основними факторами, що визначають умови для утворення вибухонебезпечної газової суміші на основі водню є: кількість ВЯП у приміщенні та сховищі в цілому, об'єм води і об'єм повітря в просторі де зберігається ВЯП.

Швидкість утворення радіолітичного водню в басейні дорівнює:

$$W(H_2) = \frac{G(H_2) \cdot I \cdot V \cdot 0.0224}{100 \cdot N_A}, \text{ Нм}^3/\text{год} \quad (1)$$

де  $G(H_2) = 0,45$  молекул/100 еВ – початковий вихід радіолітичного утворення водню;  $I$  – середня потужність поглиненої водою дози за обсягом сховища, еВ/(м<sup>3</sup>·год.);  $N_A$  – число Авогадро;  $V$  – об'єм води в басейні, що піддається дії випромінювання, м<sup>3</sup>.

Для випадку розміщення всього ВЯП (21284 од.) у відсіках БВ 1÷5,  $W(H_2)=1,34$  Нм<sup>3</sup>/год. Визначено, що припустимий обґрунтований час бездіяльності системи вентиляції складає не більше 7 діб.

## 2. Виникнення та розвиток пожежі в приміщеннях СВЯП-1.

У табл. 3 наведені параметри можливих пожеж у залі басейну витримки.

Таблиця 3. Параметри можливих пожеж у залі басейну витримки.

Категорія пожежі	Причина і місце пожежі	$P$ , рік <sup>-1</sup>	$N$ , кВт	$T_c$ , К	$F_{П}$ , м <sup>2</sup>	$d_{П}$ , м	$h_{П}$ , м	$r_{Г.М}$ , г/с	$t_{П}$ , год	$H_{Д}$ , м	$V_{Г^P}$ , м/с
Локальна	Займання горючих матеріалів в залі БВ	$2 \cdot 10^{-2}$	800	1273	<50	10,2	19	4,1	<1,0	100	0,09
Місцева	Займання в залі БВ з руйнуванням	$10^{-4}$	900	1373	>50	19,8	22	4,8	>1,5	150	0,65

*Примітка:*  $P$  – частота або імовірність виникнення пожежі;  $N$  – потужність, яка виділяється під час горіння;  $T_c$  – середньо об'ємна максимальна температура газів;  $F_{П}$  – площа пожежі;  $d_{П}$  – еквівалентний діаметр осередку пожежі;  $h_{П}$  – висота полум'я;  $r_{Г.М}$  – швидкість вигорання горючих матеріалів;  $t_{П}$  – тривалість пожежі;  $H_{Д}$  – висота підіймання стовпа диму;  $V_{Г^P}$  – швидкість висхідного потоку повітря.

У результаті пожежі на СВЯП-1 можливі викиди радіоактивних продуктів в навколишнє середовище. Особливо небезпечні аварії з вибухом, коли руйнування може привести не тільки до утворення ударної хвилі, а й до радіоактивного забруднення великих площ.

## 3. Тяжка аварія в басейні витримки.

Вихідною подією такої аварії є утворення течі через металеве облицювання днища БВ зі швидкістю більше ніж 120 м<sup>3</sup>/год.

У розрахунках, виконаних в рамках даної роботи, досліджувалася динаміка розігріву і википання води з БВ, динаміка розігріву і плавлення ТВЗ в БВ і генерація водню за рахунок окислення цирконію ТВЗ і металевих конструкцій БВ.

На рис. 3 представлені результати розрахунку зміни рівня води в відсіку БВ, на рис. 4 наведена зміна температури оболонки твелів.

Темп зростання середньооб'ємної температури води в басейні на початковому етапі розвитку аварії склав 0,6°C/год.

Найбільш швидко тяжкоаварійна стадія аварії характеризується такими результатами: час зниження рівня води до верхньої частини ТВЗ становить 51800 с (~14,4 год), а повне осушення БВ відбувається приблизно через 64800 с (~18 год) після початку аварії.

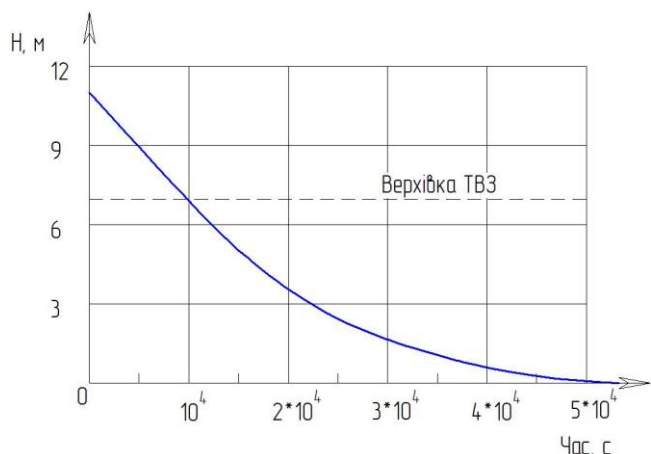


Рис. 3. Зміна рівня теплоносія в відсіку БВ в результаті утворення течі

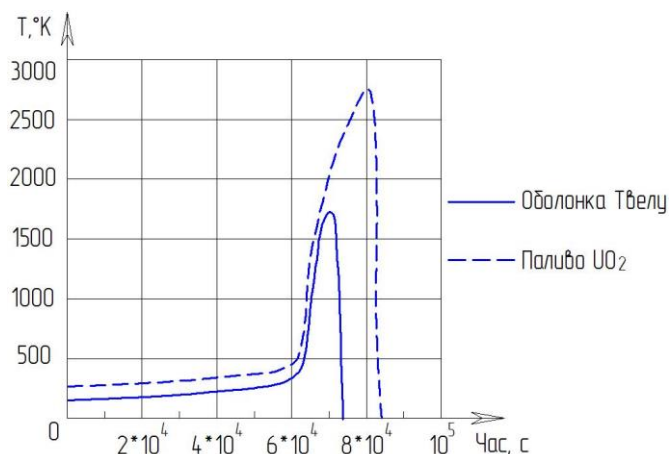


Рис. 4. Зміна температури оболонки твела і палива в залежності від зміни рівня теплоносія в БВ

З рис.4 видно, що температура твела досягає значення 1473 К через 66500 с (~18,5 год), а температура палива значення 2813 К через 77400 с (21,5 год).

В процесі підвищення температури оболонок твелів вище 1100 К починається їх окислення водяною парою з інтенсивним утворенням водню і виділенням тепла.

#### 4. Запроєктна аварія в результаті утворення течі теплоносія.

При аналізі даної аварії розглядався сценарій з трьома різними течями води через облицювання БВ: мала течя теплоносія – 10 м<sup>3</sup>/год.; середня течя теплоносія – 50 м<sup>3</sup>/год.; велика течя теплоносія – 100 м<sup>3</sup>/год.

Результати розрахунків зміни рівня води в БВ для трьох теч теплоносія наведені на рис.5.

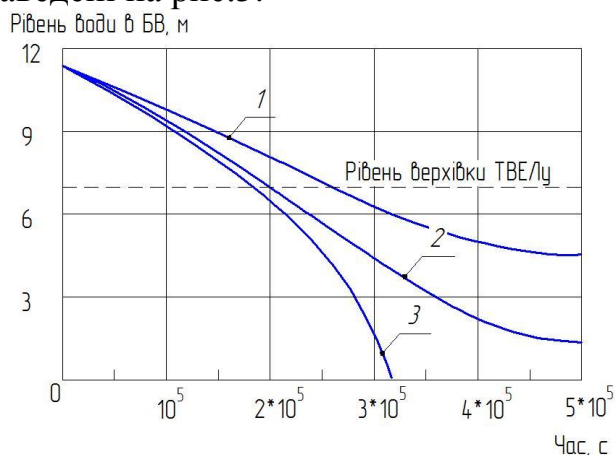


Рис.5. Зміна рівня води в БВ внаслідок утворення течі теплоносія. 1 – 10 м<sup>3</sup>/год.; 2 – 50 м<sup>3</sup>/год.; 3 – 100 м<sup>3</sup>/год

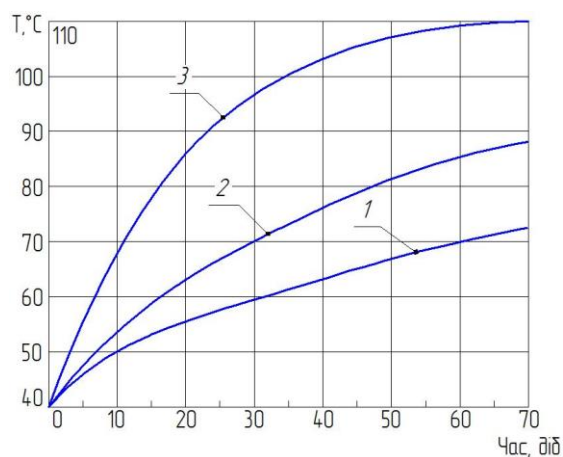


Рис.6. Залежність температури води в відсіку басейну СВЯП-1 від часу, внаслідок утворення течі теплоносія. 1 – 10 м<sup>3</sup>/год.; 2 – 50 м<sup>3</sup>/год.; 3 – 100 м<sup>3</sup>/год

У дослідженому діапазоні  $q_{ВЯП} = (200 \div 500)$  кВт/відсік час досягнення сталого теплового режиму склав в умовах великої течі теплоносія від 36 до 40 діб, а максимальна температура води в БВ – перевищила температуру кипіння (рис.6).

Час виходу аварійного відсіку СВЯП-1 на квазістаціонарний тепловий режим і температура води в такому режимі буде залежати від сумарної потужності залишкових тепловиділень ВЯП. Темп зростання середньооб'ємної температури

води в басейні на початковому етапі розвитку аварії склав  $273,75^{\circ}\text{K}/\text{год}$ . Розрахунковий час повного випаровування води з басейну складає не менше 32 діб. У разі відсутності води в БВ температура оболонок твел (природне повітряне охолодження) перевищить 573,15 K через 40 діб в центральній частині БВ.

Система контролю вибухо- та пожежонебезпечних ситуацій, є складовим елементом комплексної системи безпеки СВЯП-1 та повинна виконувати такі функції: контроль зміни температури повітря, поверхні обладнання та систем; контроль газового складу та радіаційного стану за нормальних умов експлуатації та в аварійних ситуаціях.

До складу системи входять: пожежні сповіщувачі; апаратура вимірювання первинних сигналів; апаратура аналого-цифрового перетворення сигналів; спеціалізовані засоби обчислювальної техніки; апаратура впуску-випуску цифрових та релейних сигналів.

База даних містить програми обробки та управління, архів даних та картотеки факторів пожежної небезпеки і управління пожежною небезпекою.

Локальна структура будується на базі 1-Wire інтерфейсу.

Головною особливістю інтерфейсу 1-Wire є те, що для обміну даними використовується лише два дроти (сигнальний та дріт заземлення). Якщо 1-Wire магістраль довга, використовують додатковий зовнішній дріт *EXT\_POWER*.

Типова система 1-Wire складається з контролера керування та декількох пристроїв, що підключені до загальної шини. Рівень сигналу у шині – від 3 до 5 В. У пасивному стані в лінії підтримується високий рівень напруги (логічна «1»). Всі інформаційні сигнали формуються шляхом замкнення сигнальної шини на «землю» (логічний «0»). Весь обмін у шині проходить за спеціальними командами. Їх кількість для кожного типу пристроїв різна, але є стандартний набір ROM-команд.

Перелік пристроїв, що підтримують 1-Wire, та варіантів їх застосування надто великий, тому в даній роботі наведено лише приклад базової конфігурації локальної структури та її складових (рис. 7).

Локальна структура являє собою сукупність визначеної кількості датчиків перевищення температури та обмеженої кількості малогабаритних газочутливих датчиків, які контролюють концентрацію таких вибухонебезпечних газів як CO, H<sub>2</sub> та CH<sub>4</sub>. Датчики розміщуються в потенційно вибухонебезпечних місцях приміщення. Конструкція датчиків достатньо мініатюрна та має дуже високу чутливість та швидкодію і зберігає працездатність при впливі радіації, підвищеної температури та вологості. Основна задача датчиків з піроелектричним чутливим елементом ЦТС-19 є оперативне реагування на різні зміни температури середовища, що контролюється, та сигналізувати про це. Чутливий сенсорний елемент датчиків розташовується зверху в кожному приміщенні, а електронні блоки поза приміщенням. При виникненні пожежі, кожний засіб контролю дозволяє незалежно виявляти джерело займання, передавати інформацію на верхній рівень – оператору пульта оперативного контролю, де проводиться аналіз отриманих даних з урахуванням точного місця пожежі.

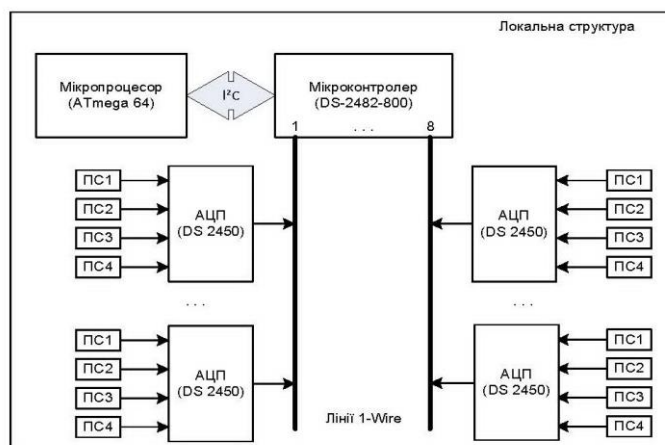


Рис. 7. Локальна структура системи контролю вибухопожежонебезпечних ситуацій в приміщеннях СВЯП-1. ПС – пожежний сповіщувач, АЦП – аналого-цифровий перетворювач

Для протипожежного захисту приміщень СВЯП-1 був розроблений новий спосіб визначення параметрів концентрації водню в повітрі інтегрально-оптичним хімічним абсорбційним сенсором (подано заявку на отримання патенту на корисну модель). Було розроблено прикладне програмне забезпечення (ПЗ), методи створення програмних компонентів, які реалізують режими реального часу та конструювання циклограм. Для управління локальною обчислювальною сіткою використовувався протокол обміну інформацією 1-WIRE. Для ПЗ типу ІВМ/РС застосовувалася операційна система MS/DOC.

У п'ятому розділі проведено оцінку радіаційного навантаження та ризику під час можливих аварій на СВЯП-1 та здійснено порівняльний аналіз впливу наслідків проектних и запротних аварії на довкілля. Згідно з рекомендаціями МАГАТЕ, для моделювання та розрахунків розсіювання радіонуклідів в атмосфері застосовувалася модель дифузії Пасквілла, заснована на статистичному (гауссовому) розподілі домішок.

Об'ємна активність радіонуклідів у повітрі для миттєвого викиду є функція часу:

$$C(t) = Q_0 \cdot G_0(t), \quad (2)$$

де  $Q_0$  – інтегральна величина миттєвого викиду, Бк;  $G_0(t)$  – фактор, що залежить від часу, метеорологічного розбавлення для миттєвого викинутого об'єму домішки,  $\text{м}^{-3}$ .

Фактор розбавлення  $G_0[\text{м}^{-3}]$  хмари викиду задається формулою:

$$G_0(x, y, z, t) = \frac{F(x)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x(t) \sigma_y(t) \sigma_z(t)} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{(x - V \cdot t)^2}{\sigma_x^2(t)} + \frac{y^2}{\sigma_y^2(t)} \right) \right] \times \left\{ \exp \left( -\frac{(z - H)^2}{2\sigma_z^2(t)} \right) + \exp \left( -\frac{(z + H)^2}{2\sigma_z^2(t)} \right) \right\}, \quad (3)$$

де  $x, y, z$  – координати точки у просторі;  $V$  – швидкість вітру,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $t$  – час, який минув після викиду,  $\text{с}$ ;  $H$  – висота хмари викиду над землею на відстані  $x$ ,  $\text{м}$ ;  $F(x)$  – функція



виснаження хмари;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  – стандартні відхилення розподілу домішки в хмарі димового викиду у напрямку відповідних координатних осей, м.

Блок-схема організації розрахунків характеристик забруднення довкілля при аварійному викиді радіонуклідів наведена на рис.8.

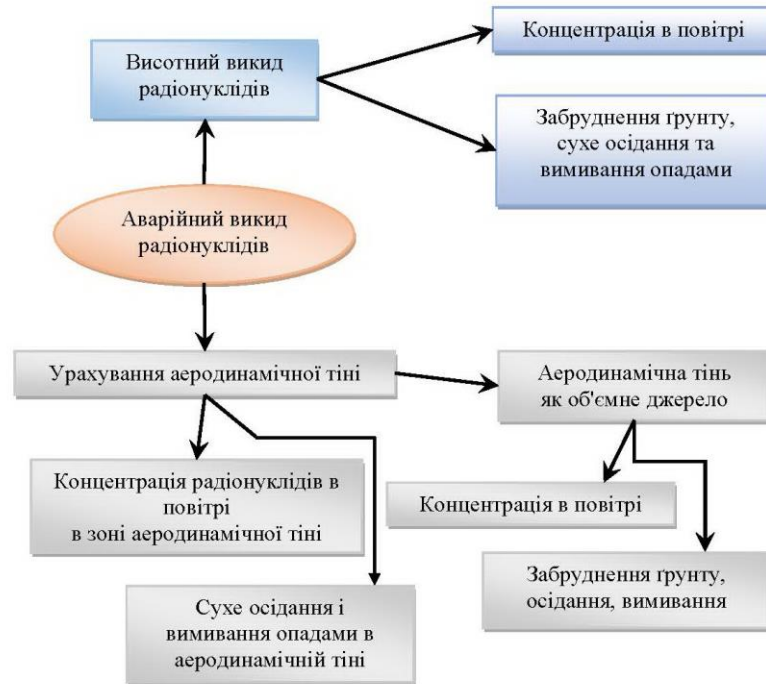


Рис. 8. Блок-схема організації розрахунків характеристик забруднення повітря і ґрунту при аварійному викиді

Аналіз радіаційного впливу при ЗПА показав (рис.9), що максимальне додаткове поверхневе забруднення ґрунтового покриву  $^{137}\text{Cs}$  досягне величини  $500 \text{ кБк/м}^2$  і буде спостерігатися вже на відстані  $\sim 3000 \text{ м}$  від об'єкта; тобто в разі розміщення СВЯП-1 не на території Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ), а в іншому районі України, такий розвиток подій призвів би до радіоактивного забруднення призначених для забудови територій і значного матеріального та морального збитку.

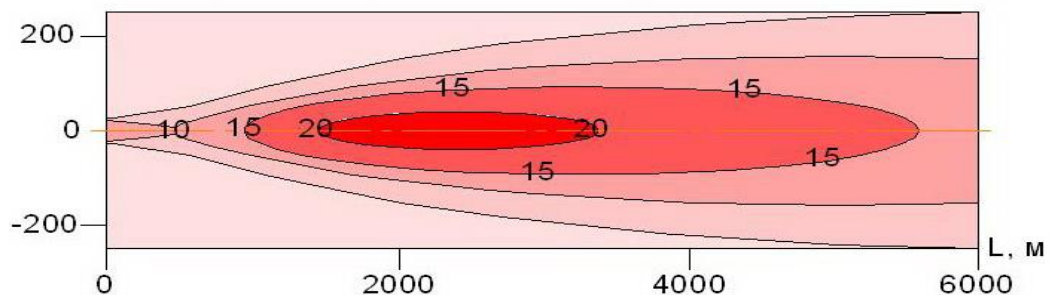


Рис.9. Лінії рівнів щільності поверхневого забруднення ( $\text{Бк/м}^2$ ).

Аналіз радіаційного впливу на поверхневі води показав, що при такому розвитку подій, на території затоплюваної заплави р. Прип'ять осяде близько  $7,5 \cdot 10^9 \text{ Бк}$  ізоотопів цезію, що значно менше величини її сумарного виносу з річним стоком –  $10^{13} \text{ Бк}$ .

В ході аналізу безпеки СВЯП-1 розглядається достатність закладених в проєкті заходів щодо попередження порушень режимів нормальної експлуатації, а також досліджуються потенційно можливі аварійні ситуації при різних початкових подіях.

Проектна аварія на СВЯП-1 характеризується початковою подією, варіантами її протікання і наслідками. Під час моделювання проектної аварії (ПА) було розглянуто падіння (в момент перевантаження) однієї ВТВЗ з розгерметизацією всіх твелів при одночасній відмові системи спецвентиляції.

Висота викиду радіонуклідів склала 40 м. Вихід активності при аваріях з однієї ВТВЗ (паливо РВПК-1000) був прийнятий наступний (Бк):  $^{103}\text{Ru} = 8,62 \cdot 10^{11}$ ,  $^{106}\text{Ru} = 1,33 \cdot 10^{11}$ ,  $^{134}\text{Cs} = 47,73 \cdot 10^{11}$ ,  $^{144}\text{Ce} = 18,61 \cdot 10^{11}$ ,  $^{140}\text{La} = 16,13 \cdot 10^{11}$ ,  $^{90}\text{Sr} = 0,74 \cdot 10^{11}$ ,  $^{137}\text{Cs} = 36,3 \cdot 10^{11}$ ,  $^{85}\text{Kr} = 18,91 \cdot 10^{11}$ . При консервативному підході (постійний напрямок вітру, природний розпад і міграція радіонуклідів не враховуються) максимальне додаткове радіоактивне забруднення прилеглих територій ізотопами цезію за 30-річний період експлуатації СВЯП-1 не перевищить  $12 \text{ Бк}/\text{м}^2$ , що є нехтовно малою величиною. Необхідно враховувати те, що підвищення концентрації радіонуклідів в повітрі буде короточасним і не призведе до небезпечних впливів на навколишнє середовище. На найближчому кордоні ЧЗВ (12 км в південно-західному напрямку) в залежності від метеорологічних умов поверхневе забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  складе від 10 до  $90 \text{ Бк}/\text{м}^2$ , що відповідає 30÷50% від сучасного фонового рівня забруднення ґрунтового покриву і не призведе до зміни статусу цих територій.

На рис. 10 приведено розрахункову дозу опромінення персоналу радіоактивними продуктами згорання при виникненні ЗПА.

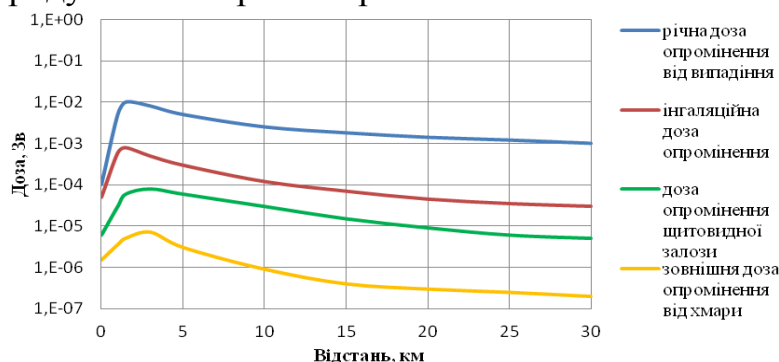


Рис.10. Розрахункова доза опромінення персоналу РПЗ при ЗПА.

Розрахунок радіаційних впливів на повітряне середовище при ПА показує, що об'ємна активність ізотопів цезію на найближчому кордоні ЧЗВ досягне величини (10÷50)  $\text{Бк}/\text{м}^3$ .

Також були розраховані діаграми соціального ризику (F/N) при аваріях на СВЯП-1 (рис. 11) та діаграма ризику матеріальних втрат (F/G) (рис. 12).

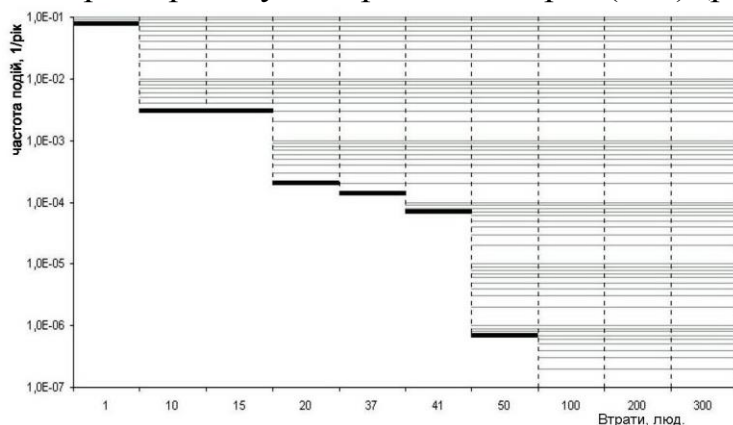


Рис.11. Діаграма соціального ризику (F/N) при аваріях на СВЯП-1

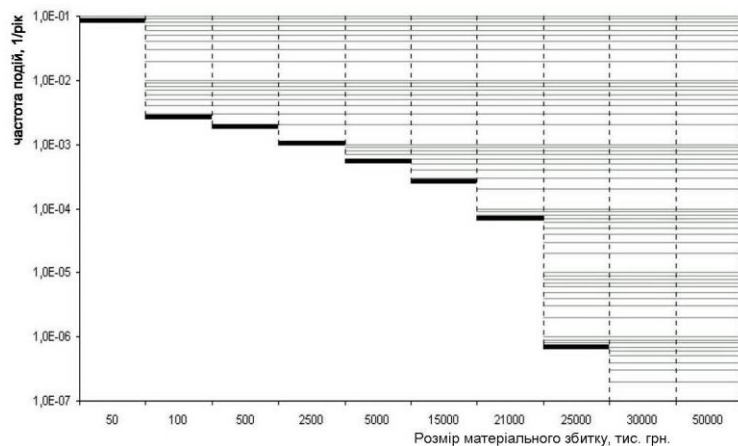


Рис.12. Діаграма ризику матеріальних втрат (F/G) при аваріях на СВЯП-1

Рівень індивідуального ризику для персоналу при аварії на СВЯП-1 становить  $1 \cdot 10^{-5}$  1/рік. Рівень соціального ризику з кількістю загиблих при аварії 10 осіб становить  $4 \cdot 10^{-5}$  1/рік.

## ВИСНОВКИ

За результатами дисертаційних досліджень наведено розв'язання актуальної наукової задачі розкриття особливостей виникнення і розвитку техногенних аварій на мокрих сховищах відпрацьованого ядерного пального як підґрунтя наукових засад підвищення ефективності забезпечення їх екологічної безпеки.

Наукові і практичні результати дисертаційної роботи такі.

1. За результатами аналізу світового та національного досвіду щодо систем забезпечення екологічної безпеки мокрих сховищ відпрацьованого ядерного пального виявлено, що під час створення систем забезпечення екологічної безпеки мокрих сховищ відпрацьованого ядерного палива у колишньому СРСР не достатньо враховувались можливості виникнення надзвичайних ситуацій з погіршенням їх екологічного стану та прилеглих до них територій внаслідок прояву небезпечних чинників землетрусів, вибухів, пожеж, тощо. Про можливість виникнення таких аварій свідчить світовий досвід, зокрема: короточасна (близько доби) втрата охолодження басейнів з відпрацьованим ядерним паливом на підприємстві з переробки палива в Селлафілді (Великобританія), потрапляння води з баку басейну витримки ВЯП до реакторного відділення (помилка оперативного персоналу) на Хмельницькій АЕС, а також недавня тривала втрата охолодження приреакторних басейнів на енергоблоках АЕС «Фукусіма-1», що призвело до вкрай важких радіаційно-екологічних наслідків.

2. Висунуто ідею, що науково-технічний прогрес у сфері забезпечення екологічної безпеки мокрих сховищ відпрацьованого ядерного пального може бути досягнутий лише на підставі розкриття особливостей виникнення та розвитку можливих аварій різного генезису на таких об'єктах, а також удосконаленні методології прогнозування шкідливого впливу на довкілля їх наслідків.

3. Розроблено методологію досліджень імовірності виникнення аварійних ситуацій із застосуванням комплексу імовірнісних і детерміністських методів. Розрахована в ході роботи імовірність виникнення запроектованої аварії на СВЯП-1 складає  $0,9 \cdot 10^{-6}$  на рік.

4. На підставі результатів оцінювання невизначеностей в імовірнісних і детерміністських моделях технологічних систем та аварійних процесів в мокрих

сховищах відпрацьованого ядерного пального проведено ранжування можливих аварійних ситуацій імовірнісним методом, визначено найбільш імовірні ініціюючі події: зовнішні впливи - 51%; внутрішні впливи, пов'язані з пожежами - 21%; внутрішні події, пов'язані з падіннями крана і ТПК - 17%; внутрішні події, пов'язані з затопленням сховища - 6%; внутрішні події, пов'язані з відмовами внутрішніх систем безпеки - 5%.

5. Проведено детерміністський аналіз можливих аварійних процесів при виникненні малої, середньої та великої теч в басейні витримки. Розрахунковим методом встановлено що темп зростання середньої об'ємної температури води в басейні витримки на початковому етапі розвитку аварії складає 273,75 К/год, а час повного випаровування води з басейну - не менше 32 діб.

6. Науково обґрунтовано і запропоновано удосконалену методику прогнозування радіаційно-небезпечних ситуацій та моделювання наслідків їх впливу на довкілля в процесі розвитку аварії на прикладі об'єкту СВЯП-1, із застосуванням якої проведено оцінку дозових навантажень на персонал і населення у разі виникнення аварійної ситуації в його басейні витримки. Розрахована сумарна індивідуальна доза опромінення на критичні органи людини склала 1,71 мкЗв/рік, колективна доза - 4,27 мкЗв/рік, а індивідуальний ризик онкологічних захворювань -  $3,12 \cdot 10^{-9}$  люд./рік, колективний -  $5,74 \cdot 10^{-6}$  люд./рік, що не перевищує встановлені припустимі норми. Розрахунковим методом встановлено що рівень соціального ризику з загиблими при аварії 10 особами становить  $4 \cdot 10^{-5}$  1/рік.

7. Науково обґрунтовано та розроблено новий спосіб визначення параметрів концентрації водню в повітрі інтегрально-оптичним хімічним абсорбційним сенсором, із застосуванням якого удосконалено систему контролю вибухо- та пожежонебезпечних ситуацій в приміщеннях мокрого сховища відпрацьованого ядерного пального.

8. Розроблені науково-практичні рекомендації і пропозиції щодо підвищення ефективності забезпечення екологічної безпеки об'єкта СВЯП-1 та прогностичне моделювання дають змогу попередити виникнення аварійних ситуацій та упередити і пом'якшити вплив небезпечних чинників на довкілля.

9. Розроблено заходи з керування запроектованими аваріями на мокрому сховищі з оцінкою радіаційних наслідків та представлено методику прийняття рішень за можливих аварійних ситуацій. Також в ході досліджень вироблено рекомендації щодо підвищення рівня безпеки СВЯП-1 за рахунок впровадження технічних рішень і організаційних заходів.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### ***Публікації в наукових фахових виданнях, затверджених МОН України***

1. Задунай О.С. Принципи створення системи оперативного моніторингу екологічної безпеки потенційно небезпечних об'єктів на основі мінімізації ризиків / Задунай О.С., Азаров С.І. // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2016. – Вип. 4(40). – С. 125—128. *Здобувач провів аналіз причин виникнення аварійних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах.*

2. Задунай О.С. Розробка методології аналізу системних ризиків під час експлуатації об'єктів підвищеної екологічної безпеки/ Задунай О.С., Азаров С.І. // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2017. – Вип. 1(41). – С. 132—134.

*Дисертант здійснив підготовку вихідних даних та виконання розрахунків, інтерпретація результатів.*

3. Азаров С.І. Аналіз безпеки потенційно небезпечних об'єктів / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // Техногенно-екологічна безпека. – 2017. – №1(1/2017). – С. 3—7. *Здобувач провів аналітичний огляд літератури, підготовку та опрацювання статистичних даних для аналізу екологічного ризику потенційно небезпечних об'єктів.*

4. Азаров С.І. Визначення надійності екосистем до чинника антропогенного тиску / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // Екологічна безпека та природокористування. – 2017. – № 3–4 (24). – С. 50—57. *Автором роботи проведено огляд наукової літератури, визначено методи оцінки надійності екосистем.*

5. Азаров С.І. Аналіз характеристик існуючих екосистем / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // Екологічні науки. – 2017. – № 3/4 2017 (18—19). – С. 77—85. *Дисертант забезпечив збір та систематизацію вихідної інформації для аналізу характеристик сучасних екосистем.*

6. Азаров С.І. Щодо оцінки безпеки атомних станцій України / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // Техногенно-екологічна безпека. – 2018. – № 3 (1/2018). – С. 58—63. *Здійснено огляд літератури, аналіз і систематизація основних причин, екологічних наслідків і уроків важких техногенних аварій на АЕС.*

7. Задунай О.С. Прогнозування ризику виникнення надзвичайних ситуацій / Задунай О.С., Азаров С.І. // Новітні технології. – 2018.– Вип. 1(5). – С. 13—22. *Здобувач здійснив аналіз сучасних методів прогнозування ризиків пов'язаних з виникненням надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру.*

8. Азаров С.І. Аналіз сценарію важкої аварії в басейні витримки відпрацьованого ядерного палива СВЯП-1 / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // Техногенно-екологічна безпека. – 2018. – №4 (2/2018). – С. 33—40. *Здобувач виконав розрахунок частоти виникнення аварій, що характеризуються втратою функції тепловідведення від БВ та течєю.*

9. Azarov S.I. Analysis of the stability of water bodies to the action of destabilizing factors. / Azarov S.I., Задунай О.С. // Екологічна безпека та природокористування. – 2018. – Вип. 2 (26). – С. 34—42. *Дисертант виконав огляд літератури, аналіз і систематизацію основних процесів, що визначають властивості екосистем.*

10. Азаров С.І. Моделювання процесу тепломасообміну в сховищі відпрацьованого ядерного палива / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2018. – Том 29 (68) № 3. – С. 11—16. *Виконав підготовку вихідних даних та здійснив розрахунки, інтерпретація результатів.*

11. Азаров С.І. Аналіз факторів техногенного впливу АЕС на довкілля / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // Екологічні науки. – 2018. – Вип. 1(20), том 1, – С. 57—65. *Дисертант виконав огляд літератури, підготовку та опрацювання даних для визначення стану та сценаріїв розвитку ядерної енергетики України.*

12. Азаров С.І. Застосування системного аналізу в сфері поводження з радіоактивними відходами / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // Проблеми

загальної енергетики. – 2018. – № 2(53). – С. 28—35. *Визначив параметри для проведення моделювання, виконав підбір даних для їх обчислення.*

13. Задунай О.С. Аналіз системних ризиків під час виникнення надзвичайних і кризових ситуацій / Задунай О.С., Азаров С.І. // Новітні технології. – 2018. – Вип. 2(6). – С. 6—15. *Автором опрацьовано основні положення і обґрунтування сучасних принципів побудови концептуальних засад методології аналізу системних ризиків*

#### **Публікації в зарубіжних виданнях:**

14. Задунай О.С. Система контролю вибухопожежонебезпечних ситуацій в приміщеннях сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП-1) / Задунай О.С. // The scientific heritage (Budapest, Hungary). – 2018. – № 23. – Р. 38—45.

15. Азаров С.І. Методика оцінки надійності конструкції басейну витримки СВЯП-1 Чорнобильської АЕС / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // Magyar Tudomány Journal (Budapest, Hungary). – 2018. – № 18. – Р. 43—49. *Здобувач виконав аналіз матеріалів зарубіжних видань щодо визначення основних тенденцій підвищення рівня безпеки БВ СВЯП.*

16. Азаров С.І. Розробка методу оцінки безпеки басейну витримки в умовах невизначеності / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // Magyar Tudomány Journal (Budapest, Hungary). – 2018. – № 19. – Р. 44—51. *Дисертант здійснив огляд літератури, аналіз і систематизацію основних вихідних даних та виконання розрахунків.*

17. Азаров С.І. Порівняльний аналіз результатів моделювання тяжкої аварії в системі охолодження басейну витримки з відпрацьованим ядерним паливом / Азаров С.І., Задунай О.С. // The scientific heritage (Budapest, Hungary). – 2018. – № 25. – Р. 51—58. *Здобувач забезпечив підготовку вихідних даних для моделювання аварійної ситуації та виконання розрахунків, порівняння результатів.*

18. Азаров С.І. Оцінка екологічних наслідків під час експлуатації мокрого сховища відпрацьованого ядерного палива / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // East European Scientific Journal (Warsaw, Poland). – 2018. – № 8(36). – С. 45—52. *Здобувач підготував вихідні дані для аналізу радіаційних впливів на компоненти навколишнього середовища.*

19. Азаров С.І. Аналіз аварії на АЕС Fukushima-Daiichi / Азаров С.І., Задунай О.С., Євланов В. М. // The scientific heritage (Budapest, Hungary). – 2018. – № 27. – Р. 41—49. *Дисертант виконав огляд літератури, звітів фахових організацій, зарубіжних видань, підбір матеріалів для аналізу аварії, що сталася на АЕС Fukushima-Daiichi.*

20. Азаров С.І. Моделювання важкої аварії на енергоблоках №№ 1-3 АЕС «ФУКУСИМА-1» / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // The scientific heritage (Budapest, Hungary). – 2018. – № 28. – Р. 51—59. *Дисертант виконав підбір даних для аналізу ходу аварії та виконання розрахунків.*

21. Азаров С.І. Порівняльний аналіз радіаційно-екологічних наслідків важких аварій на ЧАЕС та ФУКУСИМА-1 / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // East European Scientific Journal (Warsaw, Poland). – 2018. – №10(38). – С. 59—67. *Здобувач виконав огляд літератури, звітів фахових організацій, зарубіжних видань*

та підготував вихідні дані для аналізу радіаційних впливів на компоненти навколишнього середовища.

22. Азаров С.І. Моделювання тяжкої аварії в системі охолодження басейну витримки четвертого блока АЕС «Фукусіма-1» / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // The scientific heritage (Budapest, Hungary). – 2018. – № 29. – Р. 37—45. *Дисертант виконав огляд літератури, звітів фахових організацій, зарубіжних видань та виконав підбір даних для виконання розрахунків.*

**Матеріали дисертації додатково висвітлено у наступних роботах:**

23. Азаров С.І. Методичні основи екологічного аудиту АЕС / Азаров С.І., Задунай О.С., Євланов В.М. // Ядерна енергетика та довкілля = Nuclear power and the environment. – 2017. – № 2(10)/2017. – С. 48—59. *Дисертант провів аналіз матеріалів (вимог українського екологічного законодавства, природоохоронних нормативів та ін.) з метою визначення основних завдань та принципів екологічного аудиту АЕС.*

**Матеріали і тези доповідей на науково-практичних конференціях:**

24. Удосконалення інформаційної системи моніторингу стану довкілля для управління безпекою життєдіяльності населення / Задунай О.С., Азаров І.С. // матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності», 23—24 березня 2017р. — Львів, 2017. – 25 с.

25. Аналіз екологічного стану під час пожежі в Чорнобильській зоні за результатами дешифрування космічних знімків / Задунай О.С., Азаров І.С. // тези доп. XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення», 11—15 вересня 2017 р.—Харків, 2017. – 207—213 с.

26. Методи радіаційного контролю радіоактивного забруднення навколишнього середовища за допомогою безпілотного радіокерованого засобу / Задунай О.С., Азаров І.С. // тези доп. XV Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми екологічної безпеки», 11—16 жовтня 2017р.—Кременчук, 2017. – 36 с.

27. Розробка пожежних сповіщувачів для захисту АЕС / Сидоренко В.Л. Азаров С.І., Задунай О.С. // тези доп. IX Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій», 18—19 травня 2018 р.—Черкаси, 2018. – 123—125 с.

28. Методические основы пожарного аудита взрывопожароопасных объектов / Сидоренко В.Л., Задунай О.С., Азаров С.І. // материалы IV международной заочной научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования надзорной и правоприменительной деятельности МЧС», 24 мая 2018 г. – Минск, 2018. – 51—53 с.

29. Аналіз радіологічних показників в процесі екологічної паспортизації території чорнобильської зони відчуження / Азаров І.С., Задунай О.С. // тези доп. 5-го Міжнародного конгресу сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування, 26—29 вересня 2018 р. – Львів, 2018. —18 с.

30. Аналіз екологічної безпеки сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП-1) / Азаров С.І., Задунай О.С. // тези доп. XIV Міжнародної науково-

практичної конференції “Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення”, 10—14 вересня 2018р. —Харків, 2018. – 9—15 с.

31. Система контролю вибухопожежонебезпечних ситуацій в приміщеннях сховища відпрацьованого ядерного палива / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика», 13-15 вересня 2018 р. – Херсон, 2018. –127—132 с.

32. Системний підхід до управління радіаційними ризиками / Задунай О.С., Кохічко К.В. // матеріали XXIV Щорічної наукової конференція інституту ядерних досліджень НАН України, 10—13 квітня 2017 р.– Київ, 2017. – 119 с.

33. Екологічна безпека об’єктів критичної інфраструктури в умовах гібридної технології ведення війни / Задунай О.С., Азаров І.С. // тези доп. XI Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Екологічна безпека держави», 20 квітня 2017 р. – Київ, 2017. – 3 с.

34. До вибору моделі ситуаційного керування критичною інфраструктурою / Задунай О.С., Азаров І.С. // тези доп. VI Всеукраїнського з’їзду екологів з міжнародною участю, 20—22 вересня 2017 р. — Вінниця, 2017. – 105 с.

35. Супутникова система дистанційного моніторингу Землі для рішення завдань попередження надзвичайних ситуацій / Сидоренко В.Л., Азаров І.С., Задунай О.С., Єременко С.А., Бикова О.В. // тези доп. 19 Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку», 10—11 жовтня 2017 р. —Київ, 2017. – 393—396 с.

36. Комплексний аналіз техногенної безпеки сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП-1) на ЧАЕС / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // матеріали Науково-практичного семінару «Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація», 07 лютого 2018 р. – Харків, 2018. – 6—8 с.

37. Пожежна безпека сховища відпрацьованого ядерного палива / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // тези доп. Всеукраїнської науково-практичної конференції «Пожежна безпека: проблеми та перспективи», 01—02 березня 2018 р. – Харків, 2018. – 153—155 с.

38. Аналіз фізичних факторів впливу на довкілля / Задунай О.С., Азаров І.С. // тези доп. IV Всеукраїнської заочної науково-практичної конференції «Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України», 20 квітня 2018 р. – Київ, 2018. – 52 с.

39. Актуальні питання екологічного нормування / Задунай О.С., Азаров І.С. // тези доп. XII всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів присвяченої пам’яті проф. Мовчана Я.І. «Екологічна безпека держави», 19 квітня 2018 р. – Київ, 2018. – 155—156 с.

40. Щодо безпеки експлуатації мокрого сховища відпрацьованого ядерного палива / Задунай О.С., Азаров І.С. // тези доп. XXV щорічної наукової конференції інституту ядерних досліджень НАН України, 16—20 квітня 2018 р. – Київ, 2018. – 96—97 с.

41. Вдосконалення системи спостереження і оцінки екологічного стану довкілля в державі / Задунай О.С. // тези доп. VII Всеукраїнської науково-практичної



конференції «Финансово-экономическое развитие Украины в условиях трансформационных преобразований», 26 квітня 2018 р. – Львів, 2018. – 56 с.

42. АЕС як головні цілі терористичних атак в Україні / Азаров С.І., Євланов В.М., Задунай О.С. // тези доп. Всеукраїнської наукової конференції «Актуальні питання техногенної та цивільної безпеки України», 21—22 вересня 2018 р. — Миколаїв, 2018. — 76—79 с.

### АНОТАЦІЯ

*Задунай О.С., Наукові засади підвищення ефективності забезпечення екологічної безпеки мокрих сховищ відпрацьованого ядерного пального.* – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. – Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління Міністерства екології та природних ресурсів України, Київ, 2019.

Розкрито особливості виникнення і розвитку техногенних аварій на мокрих сховищах відпрацьованого ядерного пального як передумови науково-технічного прогресу у сфері забезпечення їх екологічної безпеки та прилеглих територій.

Розроблена аналітична модель виникнення та розвитку аварійних процесів в басейні витримки мокрого сховища, сутність якої полягає у застосуванні теорії надійності та поетапного комплексного використання методів: імовірнісного – для ранжування небезпечних подій і детерміністського – для моделювання аварійних процесів та їх екологічних наслідків, що на відміну від вже відомих, дає змогу уникати помилкових управлінських рішень у разі виникнення надзвичайних ситуаціях різного генезису;

Із застосуванням комп'ютерної програми «Best-T» розроблено теплофізичну модель і визначено локальні значення температур тепловиділяючих збірок в аварійній ситуації, пов'язаній з припиненням циркуляції води через басейн витримки, що дозволило оптимізувати обсяг обчислювальних робіт у частині розрахунків теплогідравлічних процесів у рамках комплексного обґрунтування екологічної безпеки мокрих сховищ відпрацьованого ядерного пального.

Набула подальшого розвитку методика визначення якісного стану конструкції басейну витримки, що дало можливість розраховувати теплотехнічні параметри мокрих сховищ відпрацьованого ядерного пального для різного впливу навантажень, наприклад, при зміні температури теплоносія або енерговиділенні у відпрацьованому ядерному паливі. Цю методику можливо застосовувати для оцінювання ресурсу конструкцій існуючих басейнів витримки на діючих АЕС України.

Удосконалено систему контролю вибухо- та пожежонебезпечних ситуацій в приміщеннях мокрих сховищ відпрацьованого ядерного пального, яка на відміну від існуючої, передбачає використання науково обґрунтованого та розробленого нового способу визначення параметрів концентрації водню в повітрі інтегрально-оптичним хімічним абсорбційним сенсором.

**Ключові слова:** мокрі сховища відпрацьованого ядерного палива, екологічна небезпечність, басейн витримки, моделювання аварійних процесів, екологічна безпека.

## АННОТАЦИЯ

*Задунай А.С., Научные основы повышения эффективности обеспечения экологической безопасности мокрых хранилищ отработавшего ядерного топлива.* - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 21.06.01 – «Экологическая безопасность». - Государственная экологическая академия последипломного образования и управления Министерства экологии и природных ресурсов Украины, Киев, 2019.

В результате диссертационных исследований приведено решение актуальной научной задачи раскрытия особенностей возникновения и развития техногенных аварий на мокрых хранилищах отработанного ядерного топлива как подоплеку научных основ повышения эффективности обеспечения их экологической безопасности.

Объектом исследования был процесс формирования техногенно-экологической опасности при эксплуатации мокрого хранилища отработанного ядерного топлива.

Предмет исследования - влияние факторов на процесс формирования техногенно-экологической опасности при эксплуатации мокрого хранилища отработанного ядерного топлива.

Для достижения поставленной цели и решения поставленных задач использованы теоретические и экспериментальные методы. Методы анализа и синтеза использовались для обобщения литературных источников и выявления основных направлений исследований. Методом моделирования была создана аналитическая модель определения состояния аварийных процессов в бассейне выдержки и теплофизическая модель для определения локальных значений температур тепловыделяющих сборок при аварийной ситуации, также проведено математическое моделирование возможных аварий на мокрых хранилищах отработанного ядерного топлива. С использованием вероятностного и детерминистского методов была проведена оценка уровня потенциальной опасности объекта ХОЯТ-1.

Раскрыты особенности возникновения и развития техногенных аварий на мокрых хранилищах отработанного ядерного топлива как предпосылки научно-технического прогресса в сфере обеспечения их экологической безопасности и прилегающих территорий.

Разработана аналитическая модель возникновения и развития аварийных процессов в бассейне выдержки мокрого хранилища, сущность которой заключается в применении теории надежности и поэтапного комплексного использования методов: вероятностного - для ранжирования опасных событий и детерминистского - для моделирования аварийных процессов и их экологических последствий, что в отличие от уже известных, позволит избегать ошибочных управленческих решений в случае возникновения чрезвычайных ситуациях различного генезиса;

С использованием компьютерной программы «Best-T» разработана теплофизическая модель и определены локальные значения температур тепловыделяющих сборок в аварийной ситуации, связанной с прекращением циркуляции воды через бассейн выдержки, что позволило оптимизировать объем вычислительных работ в части расчетов теплогидравлических процессов в рамках

комплексного обоснования экологической безопасности мокрых хранилищ отработанного ядерного топлива.

Получила дальнейшее развитие методика определения качественного состояния конструкции бассейна выдержки, что дало возможность рассчитывать теплотехнические параметры мокрых хранилищ отработанного ядерного топлива для различного воздействия нагрузок, например, при изменении температуры теплоносителя или энерговыделения в отработанном ядерном топливе. Эту методику можно применять для оценки ресурса конструкций существующих бассейнов выдержки на действующих АЭС Украины.

Усовершенствована система контроля взрыво- и пожароопасных ситуаций в помещениях мокрых хранилищ отработанного ядерного топлива, которая в отличие от существующей, предусматривает использование научно обоснованного и разработанного нового способа определения параметров концентрации водорода в воздухе интегрально-оптическим химическим абсорбционным сенсором.

Основные результаты исследований использованы в учебном процессе в ИГУГО Государственной службы Украины по чрезвычайным ситуациям для проведения лекционных и практических занятий при преподавании дисциплины «Пожарная безопасность промышленных объектов» (заочная форма, специальность 261 «Пожарная безопасность», область знаний 26 «Гражданская безопасность», магистратура) и при проведении курсов повышения квалификации преподавателей учебной дисциплины «Безопасность жизнедеятельности» (цикл профессиональной подготовки, темы «Техногенные опасности и их последствия», «Типология аварий на потенциально-опасных объектах»), что подтверждается полученным актом о внедрении; в ходе выполнения опытно-конструкторской работы, шифр "Платформа-1" в Государственном научно-исследовательском институте специальной связи и защиты информации. Внедрение результатов исследования позволило обеспечить повышение эффективности функционирования систем специальной связи в Украине, о чем указано в акте внедрения.

**Ключевые слова:** мокрые хранилища отработанного ядерного топлива, экологическая опасность, бассейн выдержки, моделирование аварийных процессов, экологическая безопасность.

## SUMMARY

*Zadunai A.S., Scientific principles for improving the efficiency of environmental safety of spent nuclear fuel pool.* – A manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 21.06.01 – ecological safety. State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management of the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine, Kyiv, 2019.

The peculiarities of the anthropogenic accidents initiation and development on spent nuclear fuel pool site are covered. Which became a prerequisite for scientific and technological progress in the field of ensuring environmental safety on fuel pool site and adjacent territories.

An analytical model of the emergency processes initiation and development in the spent nuclear fuel pool is developed. Its essence lies in the application of the theory of reliability and the phased complex use of methods: probabilistic - for the ranking of hazardous occurrences and deterministic - for modeling of emergency processes and their environmental effects. The model, unlike already known ones, makes possible the

avoidance of false managerial decisions in case of emergencies belonging to different genesis;

A thermophysical model was developed by means of the "Best-T" computer program and the local fuel assemblies temperature values in case of emergency situation connected with the termination of water circulation through the cooling pool. This allowed to optimize the amount of computational work in the part of calculations of the thermohydraulic processes within the framework of the complex substantiation of spent nuclear fuel pool ecological safety.

The method of determining the qualitative state of the cooling pool construction has developed further. It gave the opportunity to calculate the thermal and technical parameters of spent nuclear fuel pool considering different stresses. For example, in case of change of the coolant temperature or energy release level in spent nuclear fuel. This technique may be used to evaluate the durability of existing pools of functional nuclear power plants in Ukraine.

The system of explosion and fire hazard situations control in the premises of spent nuclear fuel pools is improved, as well. It resulted in the system, which, unlike the existing one, makes provision for the use of a scientifically grounded and developed new method for determining the parameters of hydrogen concentration in air with the help of an integral optical chemical absorption sensor.

**Key words:** spent nuclear fuel pools, ecological hazard, cooling pool, emergency processes modeling, ecological safety.