

ВІДГУК

офіційного опонента доктора фізико-математичних наук
Ващенко Володимира Миколайовича
на дисертаційну роботу

ЗАДУНАЯ ОЛЕКСІЯ СЕРГІЙОВИЧА

"Наукові засади підвищення ефективності забезпечення екологічної безпеки мокрих сховищ відпрацьованого ядерного пального"

що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека

Актуальність теми дисертаційного дослідження.

Події 11 березня 2011 року пов'язані з аваріями на 1-4 енергоблоках АЕС «Фукусіма-1» виявили як обмежені можливості реакторів киплячого типу BWR щодо запобігання та подолання умов виникнення надзвичайної ситуації, так і недостатню підготовленість персоналу з управління подібними важкими аваріями.

Однією з основних причин недостатньої підготовленості персоналу з управління важкими аваріями виявився загальноприйнятий у світовій практиці підхід виключення з розгляду (моделювання, аналізу та обґрунтування протиаварійних процедур) відносно малоімовірних подій, до яких, зокрема, можна віднести вихідні події важких аварій, що сталися на енергоблоках АЕС Fukushima- Daiichi.

Уроки аварії на АЕС «Фукусіма-1» повинні бути використані для визначення напрямків вдосконалення вітчизняних методик аналізу важких аварій на сховищах відпрацьованого ядерного пального (СВЯП).

Сучасні методики повинні охоплювати не тільки чисельне моделювання за допомогою розрахункових кодів, а й технологічні аспекти розвитку аварій, працездатність усіх систем і устаткування в умовах важких аварій, доступність і надійність контрольно-вимірних приладів. Загальноприйнятий в даний час підхід при аналізі безпеки СВЯП полягає в ранжуванні розгляду аварій за їх внеском в інтегральні імовірнісні показники.

Тому малоімовірним аварійним подіям приділяється другорядна увага в ході аналізу безпеки та під час розробки протиаварійних заходів (в тому числі посібників / інструкцій з управління аваріями).

У той же час необхідно відзначити, що проведені Державною інспекцією ядерного регулювання України (ДІЯРУ) «стрес-тести» з оцінки (переоцінки) безпеки діючих в Україні реакторних установок після аварії на АЕС Fukushima- Daiichi фактично не виявили нові «дефіцити» безпеки щодо зовнішніх екстремальних подій природного (геофізичного) характеру.

Однією з можливих причин таких результатів «стрес-тестів» можна вважати

недостатнє врахування цілого ряду відносно малоймовірних аварійних подій внаслідок недостатнього використання в існуючих підходах до оцінювання безпеки обґрунтованих методів моделювання процесів, що викликають ці події, що в свою чергу вимагає вдосконалення теоретичних і методологічних основ концепції розробки ефективних стратегій управління відносно малоймовірними важкими аваріями.

Тому, комплексна розробка нових і вдосконалення існуючих методів, моделей і підходів в рамках загальної концепції аналізу та забезпечення техногенної безпеки СВЯП, що враховують відносно малоймовірні аварійні події з катастрофічними наслідками, формалізація на їх основі теоретичних і методологічних положень і принципів, а також організація практичних заходів із забезпечення їх безпеки є актуальною науково-прикладною проблемою державного значення.

Методологічною основою дисертаційного дослідження послужили праці вітчизняних і зарубіжних вчених, як в області забезпечення безпеки СВЯП, так і чисельного моделювання умов виникнення аварійної ситуації та її розвиток у просторі і часі.

Достовірність одержаних результатів визначалася використанням сучасних методів чисельного моделювання аварійних теплофізичних і радіаційно-небезпечних процесів, обґрунтуванням точності одержуваних результатів на основі багатоступеневого тестування алгоритмів, а також результатами верифікації на експериментальному матеріалі.

Наукова новизна роботи полягає у розробці нових і вдосконаленні існуючих методів і моделей для оцінки безпеки систем та обладнання СВЯП-1 в умовах малоймовірних аварійних подій та у розкритті особливостей виникнення і розвитку техногенних аварій в басейні витримки (БВ) як передумови науково-технічного прогресу у сфері забезпечення його екологічної безпеки та прилеглих територій.

Основні наукові результати такі.

- *вперше* розроблена аналітична модель виникнення та розвитку аварійних процесів у 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;

- *вперше* із застосуванням комп'ютерної програми «Best-T» розроблено теплофізичну модель і визначено локальні значення температур тепловиділяючих збірок в аварійній ситуації, пов'язаній із припиненням циркуляції води через басейн витримки, що дозволило оптимізувати обсяг обчислювальних робіт у частині розрахунків теплогідралічних 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 БВ на діючих АЕС України.

- *удосконалено* систему контролю вибухо- та пожежонебезпечних ситуацій у 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.

Практична значимість результатів роботи.

Практична цінність дисертаційної роботи визначається тим, що запропоновані підходи 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.

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.

Повнота викладення результатів дисертації в наукових фахових виданнях.

Публікації охоплюють основний зміст дисертаційної роботи та достатньо повно відображають основні результати та наукові положення дисертаційної роботи. У всіх публікаціях у співавторстві здобувачу належить вагомий внесок.

Щодо **завершеності дисертаційної роботи в цілому**, слід відзначити, що це - завершена наукова робота, яка складається з переліку умовних позначень, вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел зі 152 найменувань і 4-х додатків. Робота містить 23 рисунки та 29 таблиць. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 146 сторінок.

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** дисертаційної роботи на основі наукових літературних джерел досліджено світовий досвід екологічно-безпечного поводження з ВЯП. На даний час на підприємствах атомної галузі надходження в навколишнє середовище техногенних радіонуклідів строго контролюється, але 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.

На основі проведеного аналізу сучасного рівня безпеки мокрого сховища відпрацьованого ядерного пального ЧАЕС (СВЯП-1) можливо 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 дозволяє провести аналіз не тільки безпеки функціонування СВЯП-1, але обґрунтовано подовжити термін його експлуатації на основі принципів і загальних критеріїв безпеки в процесі зберігання відпрацьованого палива, котрі задовольняють вимогам чинних міжнародних та національних норм і правил.

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

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

Детерміністський аналіз безпеки СВЯП-1 дозволив провести:

- моделювання виникнення та розвитку пожеж;
- аналіз запроектованих аварій зі зневодненням відсіків сховища, який був виконаний на основі тривимірних моделей відсіку сховища з використанням спеціалізованих програмних комплексів для виконання теплогідравлічних розрахунків.

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

У роботі визначено перелік вихідних подій, які можуть призвести до порушення нормальних умов експлуатації СВЯП-1, аварійних ситуацій або аварій. Автором зазначено, що безпека СВЯП-1 здійснюється 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, локалізація і ліквідація наслідків аварій.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи проведено аналіз стану питань моделювання вибухобезпеки при важких аваріях в БВ. Показано необхідність розробки додаткових детерміністських критеріїв умов виникнення парових високоенергетичних вибухів та вибухів водневих сумішей.

Відомо, що в процесі моделювання вибухів пари в приміщеннях СВЯП-1 на стадії важкої аварії актуальним стає питання визначення умов (критеріїв) виникнення детонаційної ситуації, в залежності від теплогідродинамічного трифазного стану охолоджуючої води. Визначення таких критеріїв дозволило автору обґрунтувати заходи з управління важкими аваріями стосовно усунення умов виникнення парових вибухів.

Основними можливими вибухонебезпечними подіями на внутрішньо- і позакорпусній стадії важких аварій на СВЯП-1 є:

- детонація і дефлаграція (самозаймання) пароповітряної суміші, що містить водень, у результаті термохімічних взаємодій компонентів;
- паровий вибух при різкому зростанні тиску в результаті теплообміну пошкоджених елементів БВ з охолоджуючим середовищем.

Також може утворитися водень, що, в свою чергу, призведе до розвитку детонації. Паровий вибух може викликати різке зростання тиску і кількості водню, а також призвести до сильного механічного впливу на елементи конструкції БВ і, в першу чергу, на корпус (в залежності від того, де стався вибух).

Дослідження механізму термомеханічної взаємодії двох різнорідних рідин з різною температурою дозволили автору виділити такі фази виникнення і протікання парового вибуху:

- початкове змішування гарячої і холодної рідин (механізм теплообміну між рідинами - плівкове кипіння);
- різка інтенсифікація теплообміну при порушенні плівкового кипіння;
- формування ударної хвилі внаслідок ланцюгового процесу різкої генерації пари і подальшої фрагментації рідини;
- поширення ударної хвилі в багатофазній системі.

Для протипожежного захисту приміщень СВЯП розроблено новий спосіб визначення параметрів концентрації водню в повітрі інтегрально-оптичним хімічним абсорбційним сенсором. Розроблено прикладне програмне забезпечення, методи створення програмних компонентів, які реалізують режими реального часу та конструювання циклограм.

У **п'ятому розділі** проведено оцінку радіаційного навантаження і ризику під час аварій на СВЯП-1 та здійснено порівняльний аналіз впливу наслідків проектних і заprojektних аварій на довкілля. Автором дисертаційної роботи згідно з рекомендаціями МАГАТЕ проведено оцінку радіаційної обстановки для проектних і заprojektних аварій за найменш сприятливих метеорологічних умов, характерних для району розміщення СВЯП. Для аварій різного класу, що призводять до максимальних радіаційних наслідків, здійснено комплекс розрахунків інтегральних приземних концентрацій радіонуклідів і щільності їх осадження на ґрунт у різних напрямках на різних відстанях від точки викиду за період не менше 2-х років із дискретністю 1-3 години, в результаті чого для кожної просторової точки формується вибірка результатів розрахунку.

При цьому, визначальним фактором, що формує дозові навантаження на населення при радіаційних аваріях, є розсіювання факелу викиду, яке залежить від метеорологічних параметрів (стійкість атмосфери, швидкість вітру, опади), топографічних параметрів (тип підстилаючої поверхні, рельєф) району розміщення СВЯП -1 і висоти викиду.

Слід зазначити, що Гаусова модель атмосферної дифузії знайшла широке поширення на практиці в силу своєї простоти і прозорості отримання результатів. За останні десятиліття вона багаторазово модифікувалася стосовно різних регіонів і сфер діяльності людини. Дана модель рекомендована для практичного

застосування міжнародними організаціями, включаючи Всесвітню метеорологічну організацію (ВМО), Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ), Науковий комітет з дії атомної радіації (НКДАР) ООН, Всесвітню організацію охорони здоров'я (ВООЗ) та ін. Гаусова модель рекомендована для розрахунків нормативними документами «Керівництво МАГАТЕ з безпеки № 50-SG-S3», і в даний час реалізована в зарубіжних розрахункових кодах «GENII», «PASC», «COSIMA», «AIDA», «BSAVVL version 2.3h» та ін.

Проте, широко використовувані в природоохоронній практиці багатьох країн методи розрахунку забруднення атмосфери за допомогою Гаусової моделі на базі тих чи інших аналітичних рішень рівнянь турбулентної дифузії можливо застосовувати лише для деяких спрощених аварійних ситуацій. Вони не дозволяють виконувати точні розрахунки переносу і розсіювання радіонуклідів в умовах складного просторового структурування джерел радіаційних викидів в межах проммайданчика.

З іншого боку, методи чисельного інтегрування Гаусового рівняння хоча і отримали досить велике поширення в наукових дослідженнях, по-суті, також не дозволяють виконувати задачі розрахунків перенесення і розсіювання домішок в районі розміщення АЕС, оскільки вимагають задання в цьому випадку всіх дев'яти компонент тензора коефіцієнта турбулентної дифузії.

Тому, подальше удосконалення математичних моделей переносу і розсіювання викидів від ядерних об'єктів, в останні десятиліття було орієнтоване, в першу чергу, на стохастичні моделі дальнього перенесення Лагранжа. У дисертаційній 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.

Загальні висновки містять основні результати дисертаційної роботи, які достатньо повно характеризують науково-практичні дослідження.

Робота створює позитивне враження послідовним вирішенням ряду завдань. Суттєві недоліки відсутні.

Основні результати досліджень використані:

- у навчальному процесі 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 впровадження;

- у 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 використовувалися при підготовці

звіту з науково-дослідної роботи «Наукові засади створення системи захисту функціонування критичної інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій» (Державний реєстраційний № 0118U003078), що проводилась в Інституті державного управління у сфері цивільного захисту (ІДУЦЗ) Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

Оцінка мови та стилю викладення матеріалу.

Дисертаційна робота за структурою, мовою та стилем подання відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України. Текст дисертації представлено технічно грамотною мовою, логічно та послідовно. Ступінь узагальнень, систематизації та формалізації відповідає рівню вимог до кандидатських дисертацій. Забезпечено взаємозв'язок проведених досліджень та отриманих результатів, викладення наукових положень, результатів та висновків здійснено аргументовано. Застосована в роботі термінологія є загально визнаною, стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.

Зміст автореферату відповідає розділам дисертаційної роботи та її основним положенням.

Дисертаційна робота є одноособово створеною кваліфікаційною науковою працею, яка містить сукупність результатів та наукових положень, поданих автором для публічного захисту, має внутрішню єдність і свідчить про особистий внесок автора в науку. Тематика досліджень відповідає паспорту спеціальності 21.06.01 – екологічна безпека відповідно до формули спеціальності: «Розроблення технічних засобів контролю за станом довкілля, обґрунтування оцінок екологічного ризику, пошук і створення за їх допомогою оптимальних форм управління екологічною безпекою».

Зауваження щодо змісту та оформлення дисертації та автореферату:

1. Здобувач не в повній мірі обґрунтував необхідні і достатні умови застосування превентивних дій шляхом моделювання аварійних ситуацій та оцінки протиаварійних заходів для підвищення рівня техногенної безпеки СВЯП-1.

2. У дисертаційній роботі відсутнє повне обґрунтування умов виникнення детонаційних вибухо- і пожежонебезпечних ситуацій, які призводять до механічного впливу на елементи конструкції для оцінки надійності захисних бар'єрів безпеки СВЯП-1.

3. Застосування в дисертаційній роботі в якості достатніх умов вибухобезпеки пароповітряної суміші, що містить водень лише хімічних критеріїв (діаграма Шапіро - Моффетта, рис.4.5) є необґрунтованим для всіх стадій і етапів розвитку важкої аварії (зокрема, у разі швидкої зміни теплогідродинамічних режимних параметрів).

4. З усього наявного переліку підходів для вирішення задачі розсіювання радіонуклідів в атмосфері, у тому числі використовувана автором в дисертації Гауссова модель атмосферної дифузії, найкращими є 3D-моделі, засновані на застосуванні напівемпіричного рівняння турбулентної дифузії і моделі Лагранжа.

Наведені недоліки не знижують значимості отриманих у ході виконання дисертаційної роботи результатів.

Загальний висновок.

Дисертаційна робота Задуная Олексія Сергійовича "Наукові засади підвищення ефективності забезпечення екологічної безпеки мокрих сховищ відпрацьованого ядерного пального" є закінченою науковою працею, в якій отримано нові наукові експериментальні і теоретичні результати.

Дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні і є цілісним науковим дослідженням, має наукову та практичну цінність, відповідає паспорту спеціальності 21.06.01 – екологічна безпека і вимогам п.п. 11, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами), а її автор – **Задунай Олексій Сергійович** – заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека.

Офіційний опонент

Професор кафедри екологічного моніторингу,
геоінформаційних та аерокосмічних технологій
Державної екологічної академії післядипломної освіти
та управління
лауреат Державної премії України
в галузі науки і техніки
д.ф.-м.н., с.н.с.

В.М. Ващенко