

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**



КОРДУБА ІРИНА БОГДАНІВНА

УДК 621.311.256:621.039.58

**НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ПІДВИЩЕННЯ
ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
УКРАЇНИ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

21.06.01 – екологічна безпека

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2023

Дисертація є рукопис

Роботу виконано в Київському національному університеті будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України

Наукова консультантка: докторка технічних наук, професорка
ВОЛОШКІНА ОЛЕНА СЕМЕНІВНА,
професорка кафедри технологій захисту
навколишнього середовища та охорони праці
Київського національного університету
будівництва і архітектури.

Офіційні опоненти: докторка технічних наук, професорка
ЛЕВЧЕНКО ЛАРИСА ОЛЕКСІЇВНА,
професорка кафедри цифрових технологій в
енергетиці Національного технічного університету
України «Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського»;

доктор технічних наук, професор
ПЕТРУК РОМАН ВАСИЛЬОВИЧ,
професор кафедри екології, хімії та технологій
захисту довкілля Вінницького національного
технічного університету;

доктор технічних наук, професор
СИДОРЕНКО ВОЛОДИМИР ЛЕОНІДОВИЧ,
професор кафедри профілактики пожеж та безпеки
життєдіяльності населення Інституту державного
управління та наукових досліджень з цивільного
захисту.

Захист відбудеться 07 грудня 2023р. о 10:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.11 при Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою 03037 м. Київ. Повітрофлотський проспект ауд 466
З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, або за посиланням:
<https://www.knuba.edu.ua/iryna-korduba/>

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.056.11

доктор технічних наук



Віктор МІЛЕЙКОВСЬКИЙ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За даними бази даних PRIS на сьогодні у світі експлуатується 442 ядерні енергетичні реакторні установки (ЯЕРУ) та ще 56 ЯЕРУ знаходяться на стадії будівництва. У період 2007-2021 років було побудовано, здано в експлуатацію та продовжують будуватися 148 нових ЯЕРУ: з реакторами типу ВВЕР/PWR - 128 шт (86%); РНWR - 10 шт (6,7%); ВWR - 5 шт (3,4%); FBR - 4 шт (2,7%); НТGR - 1 шт (0,67%). Отже, оновлення світового парку ЯЕРУ з реакторами типу ВВЕР другого покоління G-2 приблизно на 86% здійснюється за рахунок будівництва реакторних енергетичних установок з реакторами ВВЕР/PWR другого покоління G-2. При цьому, після екологічної катастрофи на АЕС Фукушіма-1 в нових ЯЕРУ, наприклад, у ЯЕРУ з реакторами AP-1000 третього покоління G-3 американської компанії Вестінгауз застосовуються модернізовані пасивні системи аварійного охолодження.

Темпи світового будівництва та здачі в експлуатацію нових ЯЕРУ в останні 30 років значно уповільнилися. Основною причиною тому стали екологічні катастрофи на ЧАЕС та Фукушіма-1, протестні настрої світової громадськості, наявність надлишку електричних потужностей і конкуренція на енергоринках, низькі економічні показники експлуатованих ЯЕРУ при величезних капітальних витратах, дуже тривале будівництво нових ЯЕРУ. Але попри всі ці та інші причини, багато країн Південно-Східної Азії, Близького Сходу, регіонів Африки зацікавлені у створенні та розвитку власної ядерної енергетики.

В Україні на чотирьох АЕС загалом експлуатується 15 ЯЕРУ з реакторами типу ВВЕР покоління G-2 які знаходяться на етапі закінчення їхнього проектного робочого ресурсу. У перспективі Україна, як було заявлено на рівні Президента та Уряду, планує побудувати на своїх АЕС ядерні реактори AP-1000 американської фірми Вестінгауз та малі модульні реактори ММР типу МР-160/300, та інші.

Світова ядерна енергетика у своєму сучасному вигляді почала створюватися під час холодної війни. Тоді її головним завданням було напрацювання ядерних збройових матеріалів на основі уран-плутонієвого ядерного паливного циклу (УП ЯПЦ). При цьому проблеми екологічної безпеки відкладалися на майбутнє як другорядні. Однак, на фоні численних інцидентів, аварій і екологічних катастроф на АЕС світу у світового співтовариства в останні 20 років остаточно сформувалося нове розуміння того, що незаперечним, вирішальним і найголовнішим імперативним пріоритетом сучасної та майбутньої ядерної енергетики повинен бути екологічний фактор. Але на сьогодні новим додатковим небезпечним потужним фактором глобального впливу на екологічну безпеку світової ядерної енергетики стала російська агресія проти України, що супроводжується ядерним тероризмом.

Отже, забезпечення технологічної, експлуатаційної й екологічної безпеки сучасних ЯЕРУ з ВВЕР, AP-1000 та ММР є одним із найактуальніших питань розвитку сучасної ядерної енергетики України і світу.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до завдань Міністерства освіти і науки України, а також згідно з міжгалузевим планом ДП НАЕК «Енергоатом» і ДІЯРУ, щодо подальшого підвищення безпеки енергетичної системи України з урахуванням

уроків великої запроєктної аварії на АЕС Фукушіма-1 і Комплексної (зведеної) програми підвищення безпеки АЕС України. Безпосередньо пов'язана з планами держбюджетної тематики Київського Національного університету будівництва і архітектури на замовлення Міністерства науки і освіти України (№ державної реєстрації 0117U003297, 0123U104372)

Метою роботи є розроблення методів та засобів підвищення екологічної безпеки експлуатації АЕС з ядерними енергетичними реакторами типу ВВЕР на основі головних уроків Фукушімської катастрофи.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести огляд літератури для визначення технологічних та екологічних основ розвитку світової ядерної енергетики на етапі четвертого глобального енергетичного переходу.

2. Оцінити безпеку реакторів AP-1000 компанії Вестінгауз та ММР160/300 на основі яких планується розвиток української ядерної енергетики і порівняти її з особливостями та екологічною безпекою реакторів ВВР-1000.

3. Визначити вплив систем охолодження АЕС на їхню екологічну безпеку в умовах глобальних кліматичних змін.

4. На основі уроків Фукушімської аварії розробити методи та засоби для оцінювання рівня екологічної безпеки реакторів типу ВВЕР та надати пропозиції щодо його підвищення. Виконати моделювання екологічно небезпечних аварій з довготривалим знеструмленням ЯЕРУ з ВВЕР.

5. Виконати моделювання режиму горіння біжної хвилі на епітеплових нейтронах.

6. Оцінити можливість теплофікаційного застосування ММР на українських теплогенераційних малих станціях малої потужності (АСМП).

Об'єктом дослідження є процеси в ядерних енергетичних реакторних установках з ВВЕР, які визначають екологічну безпеку.

Предметом дослідження є методи, моделі та підходи для аналізу і забезпечення екологічної та експлуатаційної безпеки ядерних енергетичних реакторних установок АЕС в умовах малоїмовірних аварійних подій з потенційними екологічними катастрофічними наслідками.

Методи дослідження. У роботі використовувалися методи системного аналізу для оцінювання причин, техногенних та екологічних наслідків важких запроєктних аварій на ЯЕРУ АЕС з реакторами типу ВВЕР. Що виникли як наслідок відносно малоїмовірних вихідних аварійних подій, а також для формалізації головних вимог і положень концепції забезпечення екологічної безпеки ЯЕРУ. Також застосовано детерміновані та ймовірнісні методи комп'ютерного моделювання розвитку термогідродинамічних екстремальних процесів з подальшим аналізом отриманих результатів. Для обґрунтування ефективних стратегій управління відносно малоїмовірними важкими запроєктними аваріями на АЕС з ВВЕР використано балансовий метод.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у теоретичному обґрунтуванні забезпеченні екологічної безпеки ЯЕРУ з ВВЕР, AP-1000 та

перспективних ММР є одним із найактуальніших питань розвитку сучасної ядерної енергетики України і світу. **При цьому:**

Уперше теоретично досліджено особливості динаміки Фукушімської аварії, що базуються на фундаментальній відмінності температурних залежностей густин джерел теплоти для МОКС-палива і палива на оксиді урані, що дозволяє виявити і пояснити характерні температурні особливостей перебігу процесів.

Уперше на основі детерміністського підходу досліджено можливі варіанти перебігу затоплення промислового майданчика АЕС внаслідок бойових дій, що дозволило визначити умови критичного затоплення з повним тривалим знеструмленням та порушенням умов теплообміну у сухих сховищах відпрацьованого ядерного палива задля розроблення стратегії запобігання аварійним ситуаціям.

Удосконалено методи моделювання парогазових вибухів на динамічних стадіях аварійних процесів з повним тривалим знеструмленням на основі результатів чисельного моделювання ядерних аварій, що дозволяє покращити стратегію керування аваріями з ТПЗ, яка базується на застосуванні додаткових пасивних систем безпеки. Ефективна стратегія управління аваріями з повним тривалим знеструмленням ЯЕРУ з ВВЕР-1000 може бути заснована на комплексній модернізації систем аварійного підживлення парогенераторів насосами з пароприводами та з контурами природної циркуляції систем пасивного відведення тепла від гермооб'єму реакторної установки.

Набули подальшого розвитку дослідження того положення, що безумовне виконання головних вимог екологічної безпеки та біосумісності можливе тільки у так званому хвильовому ядерному реакторі покоління G-V, який не потребує надкритичного завантаження активної зони ядерним паливом і тому, принциповим чином, в силу закладених в нього ядерно-фізичних законів, ні за яких умов не може вибухнути і викликати руйнування реакторної зали з виключенням можливої небезпечної участі оператора в регулюванні реактивності активної зони реактора. Крім цього, саморегульованість ядерних фізичних процесів в активній зоні реактора; біологічна сумісність; використання у якості ядерного палива незбагаченого природного U-238, або накопиченого ВОЯП від інших реакторів і технічного урану; технологічне рішення проблеми нерозповсюдження; унеможливлення важких запроєктних аварій і катастроф; усунення необхідності частих перезавантажень ядерного палива; мінімальне радіоактивне забруднення реакторного залу і відсутність зовнішнього радіоактивного забруднення довкілля; найвища екологічна безпека у разі військових, терористичних та екстремальних природних впливів забезпечує екологічну та соціальну прийнятність майбутньої ядерної енергетики.

Практичне значення отриманих результатів. Головні результати дисертаційної роботи мають важливе значення для підвищення рівня екологічної безпеки світової та української ядерної енергетики в наступному:

- розроблені розширені практичні рекомендації щодо комплексного оцінювання набору проблем екологічної безпеки ММР: надмірна модулізація конструкції ЯЕРУ та АЕС може призвести до створення менш ефективних ядерних енергосистем і перешкоджати інноваціям; нові ММР мають багато активних і

пасивних елементів безпеки, практичне впровадження яких ще необхідно ретельно оцінити.

- розроблено практичну схему приєднання атомних станцій малої потужності з ММР до парогазових турбін типу К -450/500-5.8 для виробництва комунального тепла на українських ТЕС.

Результати роботи також можуть бути використані для мінімізації катастрофічних екологічних наслідків та для оцінка готовності АЕС до упередження екологічних аварій та достатності заходів і засобів для захисту персоналу, населення і територій. Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі для підготовки фахівців за спеціальністю 21.06.01 «Екологічна безпека», 101 «Екологія», 183 «Технології захисту навколишнього середовища». Впровадження результатів НДР підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача в конкретних публікаціях у співавторстві з В.М. Ващенко, В.І. Скалозубовим, В.П. Кравченко, В.Л. Козловим, О.С.Волошкіною та іншими - наведено на сторінках 29-34.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційного дослідження доповідались, обговорювались і отримали позитивну оцінку на наукових, науково-методичних конференціях і семінарах різного рівня, а саме: XII Міжнародній науково-технічній конференції, м. Миколаїв; VIII Міжнародному з'їзді екологів, 22-24 вересня 2021 р., м. Вінниця; II Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження», 2-3 грудня 2021 р., м. Полтава; I Міжнародній науково-практичній конференції ГО «ІЕЕЕД», м. Луцьк; Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених КНЕУ, 2022 р.; II Міжнародній науковій конференції «Комплексний підхід до модернізації науки: методи, моделі та мульти дисциплінарність», 26 серпня 2022 р., м. Чернівці; Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми техногенно-екологічної безпеки в сфері цивільного захисту», 8-9 грудня 2022 р., м. Харків; V Міжнародній науковій конференції «Здобутки та досягнення прикладних та фундаментальних наук XXI століття», 16 грудня 2022р., м. Вінниця; XXVIII-ій Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку», 07 січня 2023 р., м. Лімасол; Міжнародній науково-практичній конференції «Modern research in world science», 29-31 січня 2023 р., м. Львів; IV Міжнародній науковій конференції «Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень», м. Житомир; II Міжнародній науково-практичній конференції «Green construction»; XVII Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів; XVI Міжнародній конференції з досвіду проектування та застосування систем сапр (cadsм); IEEE 3-rd International Conference on System Analysis and Intelligent Computing, SAIC 2022 - Proceedings, 2022; International Conference of Young Professionals, GeoTerrace 2022; VI Міжнародній науково-практичній конференції «Innovations and prospects in modern science», м. Стокгольм; VI Міжнародній науковій конференції, м. Лондон; науковій конференції «Ricerche scientifici metodi della loro realizzazione: esperienza mondiale e realtà omestiche», 29 вересня 2023 р.,

м. Болонья.

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 41 наукову працю, серед яких: 10 статей у наукових виданнях, долучених до Переліку наукових фахових видань України, 9 статей у наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію, з них – 7 у періодичних виданнях, що індексуються в наукометричних базах Scopus і Web of Science, зокрема 2 у виданнях квартілю Q3, два розділи в колективних монографіях, а також 19 публікацій у збірниках матеріалів та доповідей українських та міжнародних науково-технічних конференцій та 1 стаття в українському журналі, не внесеному в перелік фахових видань.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу і шести розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 380 найменувань, додатків, викладена робота на 370 сторінках друкованого тексту, серед яких 300 сторінок основного тексту, 73 рисунки і 6 таблиць

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі проведено аналіз актуальних питань забезпечення екологічної безпеки ядерної енергетики в Україні з урахуванням уроків великої Фукусімської аварії і екстремальних умов експлуатації українських АЕС воєнного часу. На фоні пост фокусімського оновлення ядерної енергетики МАГАТЕ заявило, що принципи безпеки ядерної енергетики визначаються системно недосконалими організаційними та інженерно-бар'єрними заходами і засобами. Проте цілком очевидним є й те, що екологічна безпека кожної ЯЕРУ, як основного фундаментального виробничого об'єкта в симбіозі військового промислового та ядерного енергетичного комплексів (ВПК та ЯЕК), повинна гарантуватися тільки фізичними законами, здатними забезпечити екологічну безпеку роботи ядерних енергетичних реакторних установок (ЯЕРУ) шляхом фізико-технологічного виключення виробництва будь-яких небезпечних відходів та викидів/скидів в навколишнє середовище і виключити можливість будь-яких екологічних аварій і катастроф в результаті технологічного чи людського фактору, чи зовнішніх природних екстремальних впливів. Але поки що всі АЕС світу залишаються технологічно не захищеними від людського фактора, від метеоритних ударів, смерчів, землетрусів, цунамі, кліматичних змін і нарешті від військових та терористичних атак. Тому АЕС з реакторами нових поколінь в майбутньому повинні забезпечувати екологічну безпеку АЕС/ЯЕРУ, навіть тоді коли у персоналу не буде можливості термінового аварійного реагування на аварійну ситуацію. Тому глобальне енергетичне майбутнє неможливе без суттєвого технологічного оновлення та подальшого розвитку нинішньої ядерної енергетики з урахуванням можливих проривних та революційних ядерно-енергетичних технологій, які вже заявляють про себе в рамках світового науково-технічного та технологічного прогресу.

На основі проведеного в розділі 1 огляду та аналізу його результатів визначені мета і задачі дисертації, а також зроблені наступні висновки:

1. Історично сучасна ядерна енергетика створювалася в період холодної війни для виробництва ядерної зброї, а виробництво енергії розглядалося атомними відомствами ядерних держав як другорядний продукт. Тому проблеми екологічної безпеки для населення та довкілля в той час не розглядалися.

2. Аварії з розплавленням активної зони на АЕС Три-Майл-Айленд, на Чорнобильській АЕС у 1986 р., і на АЕС Фукушіма-1 у 2011 р., змусили ядерні держави зайнятися питаннями екологічної безпеки АЕС та ядерного паливного циклу: безпечна робота АЕС; утилізація радіоактивних відходів і відпрацьованого ядерного палива; несанкціоноване поширення ядерних матеріалів; унеможливлення умов виникнення важких за проєктних екологічних аварій і катастроф; блокування впливу небезпечного людського фактору; впровадження нових технологій, створених на принципах абсолютної/етелонної екологічної безпеки і здатних протидіяти воєнним та терористичним діям. Усі ці проблеми в результаті подальшого розвитку ядерних технологій можуть бути вирішені технологічним шляхом.

3. Сучасна ядерна енергетика знаходиться на етапі стагнації свого розвитку. Її частка в глобальному виробництві електроенергії знизилася з 17,6 % у 1996 р., до майже 8% у 2021 р. За останні двадцять років у світі знизилася і кількість замовлень на нові ЯЕРУ. Це викликано супротивом громадськості проти будівництва нових АЕС, наявністю надлишкових електричних потужностей та розвитком конкуренції на енергоринках, низькими економічними показниками багатьох ядерних енергетичних установок.

4. Водночас, незважаючи на зазначені недоліки, ряд країн які розвиваються в Південно-Східній Азії, на Близькому Сході, в регіонах Африки, проявляють підвищений інтерес щодо розвитку власної ядерної енергетики. При цьому рішення держав про те, продовжувати чи розвивати власну ядерну енергетику, в підсумку, залежатиме від гарантій абсолютної екологічної безпеки та вибору державних завдань.

В результаті проведеного аналізу впливу діючих та перспективних ЯЕРУ на екологічну безпеку ядерної енергетики України та Європи встановлено:

1. В екстремальних умовах воєнного часу для забезпечення екологічної безпеки України та Європи найбільш небезпечними є аварії з повним знеструмленням енергоблоків АЕС із ВВЕР (аналог Фукушімської аварії). Лише за період зимової кампанії 2022/2023 рр. було зруйновано/пошкоджено внаслідок ракетних ударів більше половини всіх критичних об'єктів зовнішнього електропостачання та виникнення аварійних ситуацій із знеструмленням енергоблоків АЕС.

2. Діючі системи управління аваріями з повним тривалим знеструмленням ЯЕРУ з ВВЕР виявилися недостатніми для запобігання важким за проєктним екологічним аваріям і їх катастрофічним екологічним наслідкам.

3. Перспективним напрямом щодо підвищення ефективності керування аваріями з повним знеструмленням може бути експлуатація реакторних установок великої (АР-1000) та малої (ММР) потужності, в яких керування аваріями повністю здійснюється за допомогою пасивних систем безпеки, що не вимагають електропостачання. Проте необхідний додатковий аналіз достатньої надійності

управління аваріями в ЯЕРУ на основі повністю пасивної стратегії.

На сьогодні існує лінійка модернізованих традиційних ядерних енергетичних технологій та відповідних проектів, які отримали назву Покоління III+. Ці проекти розглядаються для їх впровадження в ядерній енергетиці України. Модульна технологія AP-1000 компанії Вестінгауз США є єдиною з реакторних технологій Покоління III+, що ліцензована комісією з ядерного регулювання в США. В офіційних джерелах зазначається, що впровадження в Україні апробованої реакторної установки AP-1000 Покоління III+ на базі реактора потужністю до 1100 МВт із системами пасивної безпеки та унікальними особливостями в частині інноваційності і стандартизації дасть змогу зменшити терміни і вартість будівництва, забезпечити високий рівень екологічної безпеки АЕС і стати новим важливим елементом майбутньої безвуглецевої енергетики.

Реактори AP-1000 вже побудовано в США і в Китаї, і вони показали можливість скорочення термінів планово-попереджувальних ремонтів та перезавантаження ядерного палива, покращення коефіцієнту встановленої потужності. Тому для України є практична можливість вивчити та використати досвід будівництва реакторів AP-1000 та їх експлуатації.

Детальний технологічний аналіз ядерних енергетичних реакторних технологій типу ВВЕР, які знаходяться на сьогодні в експлуатації і складають понад 82% реакторного парку планети показує, що у всіх діючих реакторів є недоліки в галузі екологічної безпеки. Уроки усіх без виключення ядерних катастроф на ядерних об'єктах також свідчать про небезпечність людського фактору та про відсутність необхідного рівня екологічної культури, що може збільшити ймовірність екологічних інцидентів і аварій.

Модернізація діючих у світі ядерних енергетичних реакторів здійснюється в напрямку збільшення тиску в реакторі, підвищення робочої температури і збільшення відсотка вигорання палива. Внаслідок такої модернізації відбувається прискорене старіння металу і подальше зниження надійності ЯЕРУ і їх екологічної безпеки. При цьому механізми старіння реакторних матеріалів в умовах високих радіаційних, термічних та баричних навантажень вивчені недостатньо і їх важко прогнозувати. Але стандарти для ядерних підприємств не завжди враховують такі нові умови роботи.

Залишається також невідвратною екологічна небезпека від зовнішніх впливів екстремальних природних явищ: землетрусів, повеней, смерчів, змін глобального клімату, геокосмічних явищ та воєнних і терористичних дій.

Процеси виробництва низькозбагаченого ядерного палива та переробки ядерного палива, опроміненого в реакторах за час паливної кампанії, також пов'язані з масштабними екологічними загрозами і ризиками. При цьому розроблюване міжнародними зусиллями на протязі більше 20-и років четверте покоління енергетичних ядерних реакторів G-4 в певній мірі продовжує цю тенденцію. А в перспективі виробництво електроенергії на АЕС з реакторами четвертого покоління G-4 також не дає абсолютних гарантій щодо можливого впливу людського фактору та неконтрольованого поширення ядерних матеріалів.

Ядерний реактор AP-1000 компанії Вестінгауз є модульною водо-водяною

реакторною технологією Покоління III+. Використання виготовлених у заводських умовах технологічних модулів при спорудженні АЕС дозволяє: зменшити об'єми трудовитрат на будівельно-промисловому майданчику АЕС; підвищити якість та її заводський контроль при виготовленні модулів; паралельно виконувати багато робіт і скоротити терміни спорудження АЕС.

Впровадження малих модульних реакторів МР-160/300 в Україні може підвищити економічні показники виробництва електроенергії за рахунок зниження капітальних і експлуатаційних витрат та скоротити терміни їх спорудження. ММР мають багатопрофільне призначення – від виробництва електроенергії і комунального та промислового тепла до утилізації ядерних відходів. Також стане можливим більш швидке повернення інвестицій та зміна вугільних теплогенераторів на ТЕС на атомні станції МП, що важливо для декарбонізації української енергетики.

Задачі забезпечення експлуатаційної та екологічної безпеки нових поколінь ММР, в т. ч. для МР-160/300, зводяться до отримання максимально низької розрахункової ймовірності аварійних подій, а також максимально низької ймовірності радіоекологічних наслідків з дотриманням усіх вимог національних та міжнародних нормативних та рекомендаційних документів, що приймаються конкретною державою та її громадянським суспільством.

Процеси створення та впровадження нових ММР-технологій в умовах конкретної країни, пов'язані з нагальною необхідністю вирішення багатьох технічних та технологічних питань, проведення різних аналізів та обґрунтувань, у першу чергу питань екологічної безпеки та вирішення питань ліцензування з урахуванням наступних положень:

1. В реакторобудуванні не є принципово новими. Проте модульна концепція сучасних ММР все ще перебуває на стадії свого розвитку і має певні серйозні технологічні та безпекові суперечливості.

2. Модулювання енергоємних електромеханічних систем є досить важкою задачею. При цьому надмірна модулізація конструкцій ЯЕРУ та АЕС може навпаки призвести до створення менш ефективних енергетичних ядерних систем з розподіленою функціональністю модулів і навіть перешкоджати інноваціям. Опонентська думка також звертає увагу на відсутність будь якої фактичної технічної та експлуатаційної інформації, та інформації щодо виведення з експлуатації ММР з адекватним обґрунтуванням витрат та вигод. Тому впровадження нових ММР вимагає подальших досліджень для визначення, розробки, створення та інтеграції ефективних і надійних модульних структур і міжмодульних зв'язків з використанням інженерії на основі нових знань. Інакше впровадження ММР може не досягнути декларованих розробниками високих цілей.

3. В нових ММР використовуються активні і пасивні елементи екологічної безпеки для реакторів покоління G-IV. Однак застосування в ММР таких елементів експерти пов'язують з можливими непередбачуваними наслідками для екологічної безпеки і їх також необхідно ретельно оцінити.

4. ММР працюють на низько збагаченому урані (НЗУ) з різним збагаченням та вмістом плутонію. І це може стати перешкодою для юрисдикцій, які прагнуть мати енергосистеми, незалежні від імпортного забезпечення ядерним паливом.

5. Перспективні ММР, побудовані за відмінними від LWR технологіями, є новинками для операторів і регуляторів, та для інспекторів МАГАТЕ. Реактори ММР, призначені для довготривалих кампаній, можуть мати на початкових стадіях кампанії більші запаси надлишкової реактивності, яка компенсується за рахунок вибраних технічних проектних рішень, наприклад за рахунок використання вигоряючих поглиначів та/або органів регулювання. При цьому екологічну небезпеку ММР для режимів нерозповсюдження можна вбачати в тому, що в активних зонах ММР можна таємно і невидимо організувати опромінення зразків для їх використання у незадекларованій ядерній діяльності. Мова тут може йти про несанкціоноване напрацювання плутонію з уранових мішеней для послідуєчих лабораторних експериментів. В деяких ММР передбачається використання непрозорих теплоносіїв – рідких солей або свинець-вісмуту для яких методи візуального інспектування активних зон та басейнів витримки ОЯП, стають “незрячими” і їх слід замінити системами спеціального оптико-електронного "бачення". ММР мають маловидимий тепловий слід, що значно ускладнює застосування аерокосмічних та інших дистанційних засобів їх контролю.

6. Важливою і невирішеною проблемою є створення сховищ ОЯП для тих ММР, де такі сховища передбачені проектом.

7. Український вибір МР-160/300, пояснюється, зокрема, тим, що даний проєкт є єдиним в своєму класі реакторів, що отримав ліцензію Комісії з ядерного регулювання США в липні 2021 року. Однак питання екологічної безпеки реакторів АР-1000 та МР-160/300 повинні досліджуватися і підтверджуватися для кожного конкретного проєкту, що планується до впровадження в Україні.

В другому розділі роботи розроблено науково-методологічні підходи теоретичного обґрунтування до врахування кліматичних змін на роботу енергетичного сектору України. Енергетична ефективність ядерних реакторів залежать від наявності води та її температури у ставках-охолоджувачах. При ККД сучасних АЕС в 33–35% до 65% теплової енергії потрапляє в навколишнє середовище. Алгоритм проведених в даному розділі досліджень полягав в наступному: досліджено зміни температурних показників води в ставках-охолоджувачах в залежності від температури повітря шляхом побудованих кореляційних залежностей між цими показниками; на основі моніторингових багаторічних даних про температуру повітря в даному регіоні здійснено прогностичні оцінки підвищення температури води в багаторічному розрізі – 30, 50 і 100 років за допомогою програмного продукту OriginPro8.

В розділі також отримано коефіцієнти вихідних потужностей наступних десятиліть і в українському ядерно-енергетичному секторі в розрізі працюючих АЕС. Отримані дані розрахунків свідчать, що протягом кожного десятиліття значення коефіцієнта повної вихідної потужності зменшуються. Максимальні значення з'являються взимку, коли температура низька, а отже, і виробництво електроенергії вище, а влітку, де високі температури і, відповідно, потужність виробництва нижче.

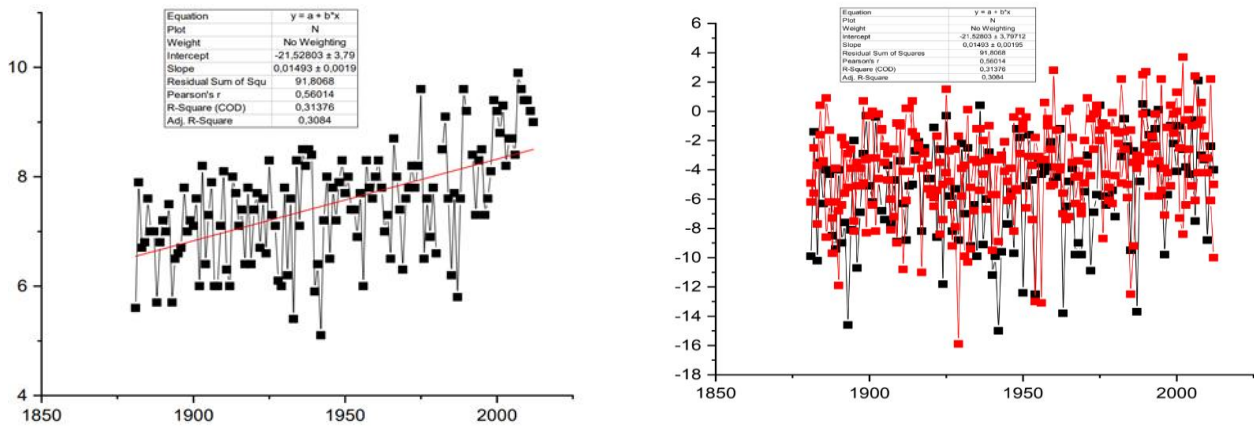


Рис. 1. Кореляційні залежності між показниками зміни температурних показників води в водоймах-охолоджувачах в залежності від температури повітря

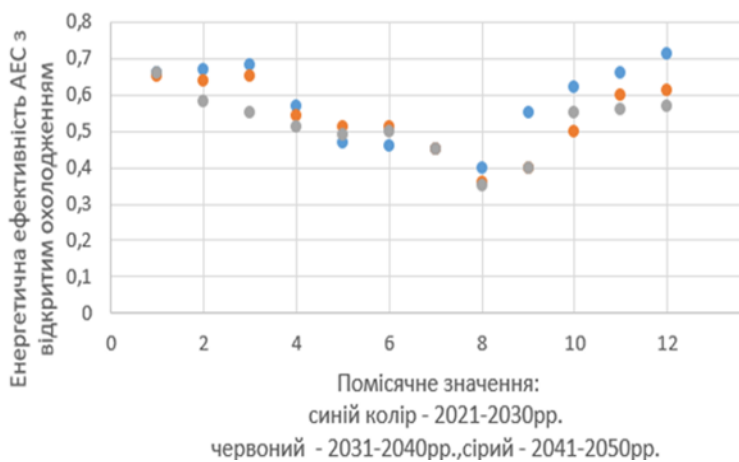


Рис. 2. Помісячна залежність між ефективністю роботи діючих АЕС з системою відкритого охолодження на території України в розрізі 2021-2050pp.

Оптимізація роботи ставка-охолоджувача АЕС в сучасних умовах його експлуатації запропоновано вирішувати за допомогою імітаційної моделі екологічних ризиків, алгоритм якої представлено в другому розділі дисертаційної роботи і в якій забезпечується баланс економічної вигоди та екологічної доцільності споживання природних ресурсів. Рішення даної концептуальної моделі дозволяє визначити розмір фондів для виконання природоохоронних та технологічних функцій (ЕР) роботи АЕС з метою уникнення в майбутньому надзвичайної ситуації на об'єкті та зниження рівня теплового забруднення водойми.

Враховуючи в майбутньому очікуване збільшення попиту на електроенергію, необхідно враховувати кліматичні зміни на роботу енергетичного сектору. що зміна клімату та глобальне потепління є ризиком виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах ядерної енергетики, що потребує прийняття стратегічних рішень щодо переходу у вітчизняному енергетичному секторі до реакторів нового покоління.

В розділі 3 проведено аналіз можливостей підвищення екологічної безпеки АЕС України внаслідок екстремальних умов їх експлуатації. Основна мета даного розділу – проаналізувати уроки аварії на АЕС Фукусіма-1 для забезпечення

екологічної безпеки українських атомних енергоблоків у разі екстремальних зовнішніх явищ та повного довгострокового знеструмлення АЕС з ВВЕР.

У березні – квітні 2011 року на АЕС Фукушіма-1 (Японія) сталася одна з найбільших екологічних катастроф внаслідок потужного сейсмічного впливу та послідуєчого за ним затоплення промислового майданчика та машинних залів з дизель-генераторами, що в результаті призвело до тривалого зникнення зовнішнього електропостачання та виходу з ладу електронасосів систем безпеки, що забезпечують відведення залишкового тепла від ядерного палива. Системи пасивної безпеки, які не потребують електроживлення, теж не забезпечили необхідних умов безпеки. Такі обставини зрештою призвели до важких за проектних ядерних аварій, до руйнівних парогазових вибухів з катастрофічним екологічними наслідками.

Хронологія, наслідки та уроки великої аварії на АЕС Фукушіма-1 продовжують обговорюватися в численних дослідженнях. Підсумовуючи результати цих досліджень, можна зробити висновок, що основними причинами аварії були: значні конструктивно-технічні недоліки киплячих реакторів BWR у частині запобігання важким за проектним ядерним аваріям і парогазовим вибухам з повною втратою електропостачання; недостатня підготовленість персоналу до ліквідації аварії з повним довготривалим знеструмленням за надзвичайно складної ситуації після затоплення промислового майданчика АЕС.

За оцінками експлуатуючої організації ТЕРСО внаслідок аварії на АЕС Фукушіма-1 рівень радіаційного забруднення довкілля, починаючи з 16 березня, значно перевищив природні фонові та гранично допустимі значення для населення на межі майданчика АЕС і за межами 30-км зони. Отже, аварія на АЕС Фукушіма-1 за екологічними наслідками відповідає рівню аварії на ЧАЕС. Крім того, підраховано, що розплав активної зони в початковий період відбувався швидше, ніж вважалося раніше.

Значення концентрації йоду-131 в повітрі Києва (рис. 3), у період з 22.03.2011р. по 5.05.2011р., свідчать про різкий стрибок до $5,9 \cdot 10^{-3}$ Бк/м³ (29 березня) і подальше падіння до $2,3 \cdot 10^{-3}$ Бк/м³ (5.04.2011 р.).

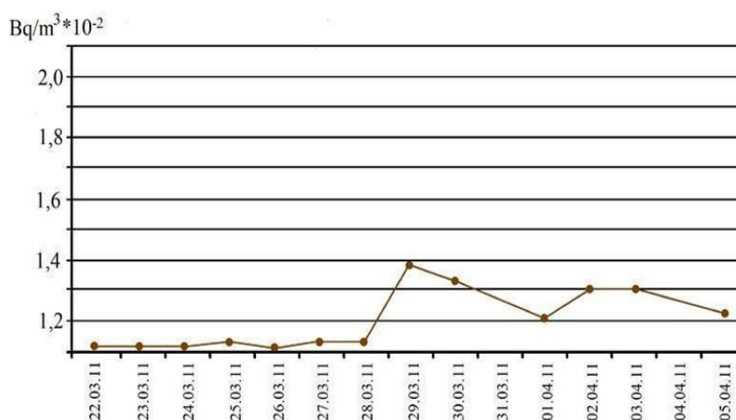


Рис. 3. Концентрація йоду-131 (Бк/м³) в повітрі м. Києва в період з 22.03.2011р. по 5.05.2011р.

Відповідно до норм радіаційної безпеки України допустимий безпечний для населення рівень йоду-131 в повітрі становить 4,0 Бк/м³. В Україні було складно встановити додатковий вміст ізотопів цезію-137 в повітрі від АЕС Фукушіма-1 через наявність на значній території країни чорнобильського цезію-137.

Важкі аварії на трьох енергоблоках Фукушімської АЕС 1-4 об'єдналися в загальну подію, яка кваліфікується, як і на Чорнобильській АЕС, найвищим ступенем 7 - «велика аварія». Причини, наслідки та уроки аварії на Фукушімі актуальні для всієї світової атомної енергетики. Проте уроки великої аварії на АЕС Фукушіма-1 необхідно враховувати для різних конструкцій АЕС, умов і досвіду експлуатації, що визначає мету представленої роботи.

Головними причинами Фукушімської катастрофи були: значні технічні недоліки в конструкціях киплячих водяних реакторів типу ВWR в частині запобігання важким екологічним аваріям і парогазовим вибухам у разі повної тривалої втрати електропостачання; недостатня підготовленість персоналу до ліквідації аварії за надзвичайно складної ситуації після затоплення промислового майданчика Фукушімської АЕС.

Отже, головний урок Фукушімської катастрофи для забезпечення екологічної безпеки світової та української ядерної енергетики полягає в унеможливленні виникнення малоймовірних аварійних подій з катастрофічними екологічними наслідками в результаті: затоплення промислового майданчика АЕС; повного тривалого знеструмлення; парогазових руйнівних вибухів; спільного впливу зовнішніх екстремальних подій - землетрусів, торнадо, ураганів, смерчів, падіння метеоритів та великогабаритних об'єктів, тощо. Підтвердженням такого висновку стало те, що за результатами перевірок було виявлено недостатню ефективність стратегій і методів управління подібними аваріями з повним тривалим знеструмленням на АЕС США.

До аварії на АЕС Фукушіма-1 на АЕС України аварія з повним знеструмленням вважалася надзвичайно малоймовірною подією (10^{-7} - 10^{-8} р/реактор) і тому не мала пріоритету для забезпечення екологічної безпеки АЕС з ВВЕР. Однак уроки аварії на АЕС Фукушіма-1 виявили недостатню ефективність стратегії та методів управління аваріями з повним тривалим знеструмленням і визначили, що системи пасивної безпеки підживлення парогенераторів повинні бути віднесені до 1-го класу безпеки АЕС ВВЕР.

Під час аварії/катастрофи на АЕС Фукушіма-1 після повного відключення систем охолодження та через неефективність систем пасивної безпеки аварійно зупинених реакторів і сховищ ВЯП 4-го енергоблоку сталися парогазові вибухи різної потужності, які були однією з головних причин катастрофічних екологічних наслідків. Проте до сьогодні однозначного тлумачення причин і умов фукушімських парогазових вибухів не було зроблено. При цьому умови виникнення «парових» і «водневих» вибухів на динамічних стадіях внутрішньо корпусних та поза корпусних фаз аварій в дофукушімську епоху не моделювалися.

Головними причинами фукушімських руйнівних парогазових вибухів стали: втрата герметичності контурів систем пасивної безпеки відведення залишкового тепла реактора на енергоблоках № 1 і 3, втрата герметичності на реакторі контуру в

об'ємі захисної герметичної оболонки на енергоблоку №2 та відмова, критичної для безпеки, функції відведення залишкового тепла в басейні зберігання ВЯП енергоблоку №4.

Уроки аварії на різних АЕС та відомі результати аналізу вибухонебезпечних умов на ядерних реакторах типу ВВЕР АЕС Фукушіма-1 визначили необхідність вдосконалення методів моделювання умов і наслідків парогазових вибухів на динамічних стадіях аварійних процесів. Результати чисельного моделювання ядерних аварій з повним тривалим знеструмленням АЕС з ВВЕР також визначили необхідність удосконалення стратегій і методів попередження та управління аваріями з повним тривалим знеструмленням. Перспективним підходом у цьому плані є комплексне використання додаткових систем пасивної безпеки для забезпечення функції живлення парогенераторів з турбонасосами в діапазоні відносно високих тисків і природної циркуляції в діапазоні відносно низьких тисків.

Багаторічний світовий досвід експлуатації ЯЕРУ і регулювання їх екологічної безпеки, а також уроки найбільших екологічних аварій і катастроф виявили недостатню обґрунтованість традиційних ймовірнісних показників та критеріїв безпеки. Але, з іншого боку, всі енергоблоки АЕС Фукушіма-1 на момент виникнення великої екологічної катастрофи у 2011 році відповідали встановленим критеріям екологічної безпеки.

В екстремальних умовах під час російсько-української війни при експлуатації Запорізької АЕС вихідними подіями екологічних катастроф можуть бути: руйнування захисних бар'єрів безпеки ЯЕРУ внаслідок навмисного чи випадкового влучення бойових зарядів; руйнування чи відмови критичних об'єктів інфраструктури, які забезпечують зовнішнє чи аварійне електроспоживання енергоблоків ЗАЕС; затоплення промайданчика ЗАЕС внаслідок попадання потужних бойових зарядів у ставок-охолоджувач та інші. Серед терористичних загроз, найнебезпечнішою є ядерна загроза, яка на сьогодні з області ймовірних перейшла в реальну воєнно-терористичну форму в Чорнобильській зоні відчуження та на Запорізькій АЕС після її захоплення окупантами.

Застосування ймовірнісних підходів та методів оцінки стану екологічної безпеки Запорізької АЕС в екстремальних умовах воєнного часу виявилось недостатньо обґрунтованим через недосконалість ймовірнісних методів оцінки рівня безпеки ЯЕРУ, через те, що військові дії є не передбачуваними і стохастичними. Більш обґрунтованим для об'єктивної оцінки екологічної безпеки є детерміністичні методи та підходи, що базуються на детерміністичному моделюванні аварійних послідовностей вихідних аварійних подій.

У стрес-тестах з переоцінки безпеки АЕС України з урахуванням уроків Фукушімської аварії було проведено детерміністський аналіз можливості затоплення промислового майданчика Запорізької АЕС внаслідок руйнування гребель Дніпровського каскаду водосховищ під час запроектного землетрусу. В результаті було встановлено відсутність можливості/ризиків затоплення промайданчика Запорізької АЕС. Однак при моделюванні процесів затоплення у стрес-тестах використовувалися спрощені квазістаціонарні гідравлічні моделі, а також не враховувався вплив зовнішніх екстремальних явищ - землетрусів, торнадо

та ураганів безпосередньо на об'єми води в Каховському водосховищі та в ставку-охолоджувачі Запорізької АЕС.

Умови затоплення промислового майданчика ЗАЕС за потужності бойового заряду із силою впливу

F:

$$F > 1,2\rho HS_1 g \quad (1)$$

i/або

$$F > \Delta P_2 S_1 \quad (2)$$

i/або

$$F > 0,3\sigma S_2 \quad (3)$$

i/або

$$F > v_c^2 \rho HS_1 / L \quad (4)$$

де ρ – густина води; H – висота промислового майданчика ЗАЕС над рівнем ставка-охолоджувача; S_1 , S_2 – площа поверхні ставка-охолоджувача та греблі Каховського водосховища відповідно; g – прискорення вільного падіння; ΔP_2 – тиск розрідження у торнадо 2-го класу інтенсивності; σ – гранично допустима напруга руйнування бетону греблі Каховського водосховища; v_c – гранично допустима швидкість ураганного вітру; L – еквівалентний (наведений) розмір ставка-охолоджувача.

В розроблених у пост-Фукусіміський період Інструкціями з керування ядерними аваріями на ЯЕРУ з ВВЕР-1000 дії оперативного персоналу з управління аваріями з повним тривалим знеструмленням (ПТЗ) фактично зводяться до заходів з відновлення електропостачання та підключення всіх доступних засобів охолодження активної зони реактора і в тому числі акумуляторних батарей постійного струму для забезпечення працездатності електронасосів активних систем безпеки. Але спроби реалізації всіх названих заходів були і в умовах Фукусіміської катастрофи, але уникнути катастрофічних вибухів не вдалося, а отже поки що немає гарантованих підстав щодо ефективності цих заходів у екстремальних умовах затоплення промислового майданчика Запорізької АЕС. Тому актуальним питанням оцінки стану/рівня екологічної безпеки ядерної енергетики України в екстремальних умовах війни є ситуація на Запорізькій АЕС з причини її тимчасової окупації і бойових дій.

Отже, основні уроки великої Фукусіміської катастрофи у 2011 році визначають для ядерної енергетики необхідність моделювання, аналізу та розробки протиаварійних заходів для відносно малоїмовірних подій з можливими катастрофічними екологічними наслідками. Але ймовірнісні підходи для оцінки об'єктивного стану/рівня безпеки Запорізької АЕС у екстремальних умовах війни є недостатньо обґрунтованими. Саме тому в роботі на основі детерміністського підходу визначено умови критичного затоплення промайданчика ЗАЕС внаслідок бойових дій, що може стати причиною повного тривалого знеструмлення ЯЕРУ/АЕС та порушення умов теплообміну у сухих сховищах відпрацьованого

ядерного палива. При цьому запобігання затопленню проммайданчика Запорізької АЕС може ґрунтуватися на будівництві додаткових захисних бар'єрів на березі ставка-охолоджувача.

Ефективна стратегія управління аваріями з повним тривалим знеструмленням енергоблоків з ВВЕР-1000 також може бути заснована на комплексній модернізації систем аварійного підживлення парогенераторів насосами з пароприводами та з контурами природної циркуляції систем пасивного відведення тепла від гермооб'єму реакторної установки.

На основі отриманих у розділі 3 результатів встановлено:

1. Домінантною групою вихідних аварійних подій для екологічної безпеки України та Європи в екстремальних умовах експлуатації українських АЕС є повне знеструмлення енергоблоків (аналог Фукушімської аварії).

2. Підвищення екологічної безпеки в екстремальних умовах експлуатації українських АЕС з реакторами ВВЕР можливе шляхом удосконалення стратегії управління аварій з повним знеструмленням енергоблоків пасивними системами аварійного підживлення парогенераторів.

Важкі запроєктні аварії на ЯЕРУ АЕС Фукушіма-1 розглядаються як унікальний, хоч і вкрай небажаний "експеримент". До Фукушімської аварії перспектива розширення паливної бази АЕС зокрема пов'язувалася з використанням МОКС-палива (змішаного оксидного уран-плутонієвого палива). Важка запроєктна аварія на АЕС Фукушіма-1 призвела до розплавлення АЗР і виявила недостатню вивченість температурних властивостей паливних нуклідів у діапазоні температур, ширшому за діапазон робочих температур існуючих реакторів (понад 1000 °К). У зв'язку з цим у розділі приведені результати виконаного розрахунку температурних залежностей перерізів ядерних реакцій поділу і радіаційного захоплення, усереднених по спектру теплових нейтронів для урану-238, урану-235 і плутонію-239. На цій основі знайдено і пояснено принципову відмінність у температурних залежностях усереднених за спектром теплових нейтронів перерізів ядерних реакцій урану-235 і плутонію-239 для досліджуваного діапазону температур. Також були розраховані температурні залежності густин джерел тепла для МОКС-палива та оксидного палива для теплових реакторів.

На сьогодні вже ведуться розробки ядерних реакторів, що принципово відрізняються від реакторів попередніх поколінь G-II, III, IV, які не мають надкритичного завантаження ядерного палива і не потребують регулювання реактивності реактора. Ці ядерні реактори, що характеризується внутрішньою ядерно-екологічною безпекою, і класифікуються як реактори п'ятого покоління G-V. Вимогам еталонної екологічної безпеки для реакторів G-V повністю відповідає хвильовий уран-плутонієвий реактор, який відомий в США як «реактор на біжній хвилі», а в Японії - як реактор «CANDLE». Але точніше цей реактор можна назвати реактором з фронтальним горінням ядерного палива. Цей тип реактора дозволяє виключити процедуру збагачення ядерного палива в ядерному паливному циклі і використовувати в ньому в якості палива природний і навіть технічний уран, а також відпрацьоване ядерне паливо в інших реакторах.

На сьогодні, більше як через 10 років після екологічної катастрофи на АЕС

Фукушіма-1, з'явилися певні дані, що підтверджують теоретичні припущення зроблені в даній роботі, хоча і в дуже малому обсязі і, на жаль, які опубліковані не в наукових виданнях. Результати аналізу експериментальних даних, що стосуються вибухів на АЕС Фукушіма-1 вказують на те, що реально на АЕС було три вибухи, які були задокументовані на відео. Першим був вибух водню, що утворився в результаті пароцирконієвої реакції розкладання води, якому (на відео білий колір диму). Помаранчевий колір палаючого полум'я над реактором 3-го енергоблоку вказує на дуже високу температуру ~ 3000 °К, тобто температуру плавлення оксидного палива реактора під час другого вибуху. Третій вибух, що супроводжувався на відео чорним димом, вказує на вибух в уран-плутонієвому паливному середовищі і його викид. Такий процес призвів до підвищення реактивності реактора, оскільки коефіцієнт реактивності був від'ємним, тому Сетсуо Фудзівара назвав аварію на третьому енергоблоці ядерним вибухом.

Отже, на сьогодні вже є експериментальні дані для обґрунтованого висновку, що аварії розвивалися відповідно до теоретичної моделі, заснованої на динаміці ядерних реакцій за участю нейтронів, оскільки за рахунок хімічних реакцій навряд чи можна було б розігріти і розплавити таку кількість оксидного палива.

Слід зазначити, що текст, який стосується хвильових ядерних реакторів включений до дисертаційної роботи не випадково, оскільки пояснити особливості динаміки ядерного палива зруйнованих ядерних реакторів під час аварії, після неї і до теперішнього часу можна, використовуючи динаміку хвильового горіння, температурних режимів вибуху і радіаційних дефектів в ядерному паливі. Але до сьогодні, строгої теорії сповільнення нейтронів у паливному середовищі реактора, що ділиться, не існує. Тому для оцінки нейтронних спектрів необхідно використовувати модельні наближення. Однак аналіз експериментальних даних, отриманих в процесі великої важкої нзапроектної Фукушімської катастрофи та після її закінчення на протязі досить тривалого часу, дозволяє виявити і пояснити принципову відмінність температурних залежностей перерізів поділу, усереднених за тепловим спектром нейтронів.

Виявлені в роботі особливості температурної поведінки МОХ-палива дали можливість пояснити деякі особливості динаміки аварії на третьому блоці АЕС Фукушіма-1. Важливо також звернути увагу на те, що ще не опубліковано жодних даних про нейтронні потоки як під час аварії реакторів АЕС Фукушіма-1, так і після аварії, аж до сьогодні, хоча вже розроблено дистанційну антинейтринну технологію контролю за нуклідним складом реакторного палива, за допомогою якої, наприклад, можна отримати і дані про нейтрони. Також виявлено і пояснено принципову відмінність температурних залежностей перерізів поділу, усереднених за тепловим спектром нейтронів і отримано розрахункові температурні залежності щільностей теплових джерел для МОХ- і UO₂ палива для теплових реакторів, а також виявлено особливості температурної поведінки МОХ-палива які дозволили пояснити деякі особливості динаміки аварії на 3-му блоці Фукушіма-1.

Розділ 4 присвячений моделюванню парогазових вибухів на ЯЕРУ з ВВЕР. Необхідність цього моделювання також визначається головними уроками великої Фукушімської екологічної катастрофи. Важливість такого моделювання

підкреслюється тим фактом, що, виходячи з надзвичайної актуальності проблем, пов'язаних з запобіганням парогазових вибухів на АЕС, ще у 2002 році Агентством атомних досліджень США було створено спеціальну групу з парових вибухів. У звітах цієї групи підкреслюється гостра фундаментальна проблема для світової екологічної безпеки АЕС яка ще не має свого вирішення через незадовільно вивчені процеси протікання неоднорідних вибухів.

Результати застосування детерміністського методу показують, що критерії виникнення парових вибухів у динамічних аварійних режимах визначаються граничною амплітудою тиску та швидкістю розповсюдження акустичних збурень у паровому об'ємі. Критерії водневої детонації у динамічних аварійних режимах визначаються граничною амплітудою збільшення температури оболонки твелів та середньою швидкістю потоку теплоносія/охолоджувача в активній зоні (АЗ) ядерного реактора. При цьому криза теплообміну визначається межею проти потокового руху рідини і генерується всередині шару пари. І, якщо через хімічні взаємодії евтектики або досягнення точки плавлення в активній зоні утворюється рідка фракція, то вона може переміщуватися і твердіти в більш холодних областях активної зони. При цьому паровий вибух може бути визначений як потужне вивільнення енергії розплаву у формі ударної хвилі стиснення внаслідок високо швидкісного ланцюгового процесу взаємодії гарячого розплаву і холодної пари охолоджувача. Процес починається з бурхливої взаємодії між розплавленими уламками активної зони та водою. Якщо велика енергія відводиться за досить короткий час, то ударна хвиля може зруйнувати днище корпусу реактора або створити гідроудар, спрямований у верхню частину корпусу реактора, Такий удар здатний відірвати верхню кришку корпусу реактора, яка стає снарядом, здатним завдати удару по конструкціях контайнменту. А послідовність подій створює "альфа-вид" відмови контайнменту який застосовується тільки до реакторів, конструкція яких допускає фізичну можливість такого розвитку подій.

У дисертації вперше розроблено оригінальний метод моделювання умов виникнення парогазових вибухів у динамічних режимах аварій із «щільним» реакторним контуром.

Основні уроки великої аварії на Фукусімській АЕС у 2011 р. для екологічної безпеки визначають необхідність моделювання, аналізу та розробки протиаварійних заходів для відносно малоймовірних подій, але які мають катастрофічні екологічні наслідки, з урахуванням численних відмов систем безпеки. Критерії і умови виникнення парогазових термохімічних вибухів у динамічних аварійних режимах у «щільному» реакторному контурі ядерних енергоустановок із ВВЕР та з відмовами систем запобіжних клапанів і аварійного парогазовидалення визначаються швидкістю зміни термодинамічних і фізико-хімічних параметрів. Представлено детерміністський метод визначення критеріїв і умов парогазових вибухів у динамічних аварійних режимах у «щільному» реакторному контурі з відмовами запобіжних клапанів та систем аварійного парогазовидалення. Умови виникнення водневих вибухів визначаються максимальною швидкістю збільшення температури оболонки твелів, а умови парових вибухів - максимальною швидкістю збільшення тиску внаслідок інтенсифікації термохімічних процесів пароутворення. Критерії

виникнення парових вибухів у динамічних аварійних режимах визначаються граничною амплітудою тиску та швидкістю розповсюдження акустичних збурень у паровому об'ємі. Критерії водневої детонації у динамічних аварійних режимах визначаються граничною амплітудою збільшення температури оболонок твелів та середньою швидкістю потоку теплоносія/охолоджувача в активній зоні (АЗ) ядерного реактора.

Наукові теоретичні та експериментальні дослідження парогазових вибухів розпочалися в кінці 1950-х років у результаті досягнення науково обґрунтованого розуміння тих можливих катастрофічних наслідків, що проявилися в аваріях на АЕС. В перших експериментах вивчалися мало масштабні термохімічні паро-вибухові процеси фрагментації рідкометалевих крапель в результаті їх падіння у рідкий охолоджувач.

Моделювання аварій і аналіз екологічної безпеки ядерних енергетичних реакторних установок (ЯЕРУ) проводилось багатьма авторами. Але, незважаючи на це, задачі визначення умов і критеріїв виникнення парогазових вибухів під час екологічних аварій залишаються багато в чому не вивченими. На основі багато чисельних результатів теоретичних і експериментальних досліджень, було створено кілька теорій фрагментації крапель у парогазових вибухових процесах. Для подальших експериментальних досліджень були побудовані великі установки для моделювання усіх процесів на всіх етапах парогазових вибухів.

Виходячи з надзвичайної актуальності проблем, що пов'язані з запобіганням парогазових вибухів на АЕС, в 2002 році Агентством атомних досліджень США було створено спеціальну цільову групу з парових вибухів. У її звітах про результати її 20-и річної роботи підкреслюється, гостра фундаментальна проблема для світової екологічної безпеки АЕС поки що не має свого успішного вирішення.

Відомо, що руйнівні парогазові вибухи стали однією з основних причин катастрофічних екологічних наслідків Чорнобильської, Фукушімської та інших аварій. При аналізі екологічної безпеки ядерних енергетичних реакторних установок (ЯЕРУ) з ВВЕР як правило моделюються умови парогазових вибухів для відносно «повільних» аварійних процесів за наступних причин:

1. Покладається успішне спрацювання систем безпеки (СБ), які обмежують тиск у реакторній установці (запобіжні клапани, пароскидальні пристрої, СБ подачі охолоджувача та ін.). Уроки Фукушімської аварії визначають необхідність моделювання аварійних процесів з урахуванням численних відмов СБ. Також необхідно відзначити, що відмови запобіжних клапанів реактора стали однією з основних причин важкої ядерної аварії на АЕС ТМІ-2 (США) у 1979р. та аварійного інциденту на Рівненській АЕС у 2009р.

2. Питання визначення критеріїв і умов виникнення термохімічних парогазових вибухів у динамічних швидкоплинних аварійних режимах зі «щільним» реакторним контуром з відмовами запобіжних клапанів зазвичай не розглядаються. У динамічних аварійних режимах критерії і умови виникнення парогазових вибухів визначаються швидкістю зміни термохімічних, термодинамічних і фізики-хімічних параметрів.

До аварій зі «щільним» реакторним контуром відносяться: аварії спричинені

екстремальними вихідними явищами - землетрусами, затопленнями, торнадо, ураганами, падінням великих об'єктів і т.д.); реактивні аварії і відмови аварійного захисту реактора; течі і розриви парових та живильних трубопроводів 2-го контуру ЯЕРУ із ВВЕР; відмови головних циркуляційних насосів та ін.

Умови парогазових вибухів у динамічних аварійних режимах мають вигляд:

$$\frac{dP_R}{dt} \geq (P_{Rm} - P_{R0})a_V(P_R)/H_{VR} \quad (5)$$

$$\frac{dP_g}{dt} \geq (P_{gm} - P_{g0})a_V(P_g)/H_{Vg} \quad (6)$$

$$\frac{dT_{0b}}{dt} \geq (T_{0bm} - T_{0b0})v_T/H_a \quad (7)$$

де P_{R0} , P_{g0} - початковий тиск у RC і SG; P_{Rm} , P_{gm} - гранично допустимий тиск у RC і SG; a_V - швидкість звуку в паровому об'ємі; T_{0b0} - гранично допустима і початкова температура оболонок твелів; H_{VR} , H_{Vg} - еквівалентний розмір парового об'єму в реакторі і парогенераторі; v_T - середня швидкість теплоносія в активній зоні реактора; H_a - висота активної зони.

Момент можливого настання парогазового вибуху в процесі запроектованої аварії зі «щільним» реакторним контуром і парогенератором:

$$t_0 = \min(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5) \quad (8)$$

Критеріями екологічної безпеки зазвичай приймаються гранично допустима температура ядерного палива і оболонки твелів. Критеріями радіаційної безпеки приймаються - гранично допустимий тиск в реакторі і герметичному об'ємі, гранично допустима концентрація водню, норми допустимих радіаційних доз опромінення персоналу, населення і навколишнього середовища. При цьому, в якості умов виникнення водневих вибухів приймається гранично допустима концентрація водню в залежності від концентрації кисню, який є каталізатором водної детонації, і концентрації водяної пари, як нейтралізатора водневої детонації, відповідно до діаграми Шапіро-Монфетті.

Критерії та умови парогазових вибухів:

1. Критерієм умов водневої детонації в реакторі приймається гранично допустима температура оболонок твелів, що відповідає початку інтенсифікації пароцирконієвої реакції з утворенням газоподібного водню. При цьому, не враховується можливий істотно динамічний характер аварійного процесу, при якому умови водневої детонації можуть залежати від швидкості зміни температури оболонки твелів.

2. Критерієм умов водневої детонації в гермообсязі ядерної реакторної установки відповідно до діаграми Шапіро-Монфетті зазвичай приймається гранично

допустима концентрація водню рівна 4%. Слід зазначити, що діаграма Шапіро-Монфетті обґрунтована лише для квазірівноважних процесів генерації водню.

3. Критерії та умови пароводяної детонації, що викликають парові енергетичні вибухи, при моделюванні аварій фактично не розглядаються. На нашу думку, основна причина такої ситуації полягає у відсутності досить обґрунтованих розрахункових залежностей визначення умов пароводяних вибухів, а також у припущеннях абсолютної надійності запобіжних клапанів перевищення тиску. Разом з тим саме пароводяні вибухи мали місце в процесі Чорнобильської аварії і можливо на окремих блоках АЕС Фукусіма-1. Необхідно також враховувати, що потужні пароводяні вибухи можуть призвести до розпаду молекул води на водень і кисень, а відповідно і до умов «ланцюгової» водневої детонації. На думку багатьох спеціалістів такий потужний «ланцюговий» вибух стався на третьому блоці АЕС Фукусіма-1.

У даній роботі далі коротко описано запропонований метод визначення критеріїв і умов виникнення парогазових вибухів при динамічних режимах аварій зі «щільним» реакторним контуром та відмовами запобіжних клапанів.

В розділі 5 представлено розроблений і обґрунтований альтернативний метод аналізу безпеки активної зони ЯЕПУ для вдосконалення теплофізичних властивостей і складу ядерного палива, конструкцій тепловиділяючих збірок, режимів роботи ядерного енергетичного реактора на підвищеній або зниженій потужності тощо. Зауважимо, що на сьогодні для ЯЕПУ з ВВЕР відсутні достатньо обґрунтовані загальноприйняті критерії і умови виникнення «парових» вибухів.

При аналізі екологічної безпеки процесів модернізації ЯЕПУ з детермінованими кодами необхідно враховувати можливість негативних ефектів «коду користувача» (EUC) і «відмінності коду» (ECD), які можуть суттєво впливати на результати повторного моделювання аварій з детермінованими кодами Це означає, що з урахуванням модернізацій. При розрахунковому моделюванні однакових аварій, але різними кодами одного рівня верифікації кінцеві результати розрахунків можуть також істотно відрізнятись. Тому в розділі представлено розроблений альтернативний метод аналізу безпеки при модернізаціях активної зони реактора, який не потребує залучення повторного моделювання аварій детерміністськими кодами. Альтернативний метод аналізу безпеки під час модернізації активної зони реактора виключає вплив ефектів «коду користувача» та «відмінності коду». Методика аналізу безпеки при модернізації активної зони реакторних установок базується на отриманих аналітичних залежностях зміни максимальної температури ядерного палива та оболонок твелів у модернізованій та базовій моделях активної зони реактора. Цей метод є достатньо обґрунтованим для його застосування при модернізаціях теплофізичних властивостей і складу ядерного палива, конструкцій тепловиділяючих збірок, режимів роботи реактора на підвищеній, або зниженій потужності і ін.

Основні положення методу аналізу ядерної безпеки при модернізації активної зони реактора:

1. Детерміністськими критеріями (показниками) ядерної безпеки РУ приймаються: гранично допустима температура початку незворотної деградації

ядерного палива T_{Fm} ; гранично допустима температура початку інтенсифікації пароцирконієвої реакції з генерацією вибухонебезпечного водню і тепловиділень в оболонці твела T_{obm} .

Умови екологічної безпеки:

$$T_F < T_{Fm} \quad (9)$$

$$T_{ob} < T_{obm} \quad (10)$$

Гранично допустима температура ядерного палива визначається його хімічним складом. Для «чистого» UO_2 -топлива $T_{Fm} = 3113$ °К, для цирконієвих оболонок твелів ЯЕУ з ВВЕР $T_{obm} = 1473$ °К.

2. Метод аналізу умов ядерної безпеки заснований на визначенні аналітичних залежностей змін максимальної температури ядерного палива T_F і оболонки твела T_{ob} в процесі аварії або перехідного режиму модернізованої активної зони реактора (m) від базової проектною моделі (b).

У загальному випадку аналізуються модернізації теплофізичних властивостей і конструкції елементів твелів, хімічного складу елементів твелів, конструкційно-технічних параметрів тепловиділяючих збірок реактора, непроектних режимів роботи реактора на підвищеній або зниженій потужності і ін.

3. Аналізується одновимірна «двостонна» модель паливної матриці твела, що складається з основної (центральної) і поверхневої (rim-зони) зони паливної матриці (рис.4).

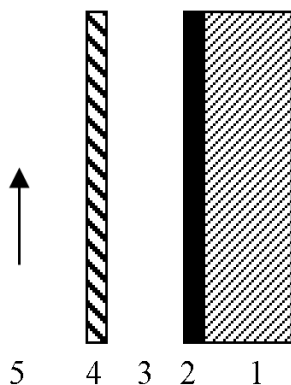


Рис. 4. Двостонна модель паливної матриці твела: 1 – основна (центральна) зона паливної матриці; 2 – поверхнева rim-зона паливної матриці; 3 – газовий зазор твела; 4 – оболонка твела; 5 – потік теплоносія

Рівняння теплового балансу для паливної матриці і оболонки твела відповідно:

$$C_{pF} M_F \frac{dT_F}{dt} = N_F(t) - R_T^{-1} \Pi_T (T_F - T_{ob}) \quad (11)$$

$$C_{pob} M_{ob} \frac{dT_{ob}}{dt} = R_T^{-1} \Pi_T (T_F - T_{ob}) - \alpha_T \Pi_T (T_{ob} - T_T) \quad (12)$$

$$T_F(t=0) = T_{F0}; \quad T_{ob}(t=0) = T_{ob0} \quad (13)$$

де T_F , T_{ob} – максимальна температура ядерного палива і оболонки твела відповідно; t – час; C_{pF} , C_{pob} – середня на одиницю маси теплоємність палива і оболонки твела відповідно; M_F , M_{ob} – маса паливної матриці і оболонки твела відповідно; $N_{F(t)}$ – потужність тепловиділяючою паливної матриці; Π_T – площа поверхні твела; α_T – коефіцієнт тепловіддачі на поверхні твела; T_T – температура теплоносія; R_T – термічний опір твела

$$R_T = \frac{\delta_{F1}}{\lambda_{F1}} + \frac{\delta_{F2}}{\lambda_{F2}} + \frac{\delta_g}{\lambda_g} + \frac{\delta_{ob}}{\lambda_{ob}} \quad (14)$$

де δ_{F1} , δ_{F2} , δ_g , δ_{ob} – товщина центральної зони паливної матриці, гім-зони, газового зазору, оболонки твела відповідно; λ_{F1} , λ_{F2} , λ_g , λ_{ob} – коефіцієнт теплопровідності центральної зони паливної матриці, гім-зони, газового зазору, оболонки твела відповідно.

Після перетворення рівнянь теплового балансу для паливної матриці і оболонки твела (11) і (12) отримаємо систему рівнянь в форматі критеріїв впливу конструкційно-технічних параметрів на умови екологічної безпеки (9) і (10):

$$\frac{dT_F}{dt} = K_N - K_{RF}(T_F - T_{ob}) \quad (15)$$

$$\frac{dT_{ob}}{dt} = K_{Rob}(T_F - T_{ob}) - K_\alpha(T_{ob} - T_T) \quad (16)$$

де критерій впливу потужності енерговиділень ядерного палива на умови екологічної безпеки:

$$K_N = \frac{N_F}{C_{pF}M_F} \quad (17)$$

критерій впливу термічного опору твела на умови екологічної безпеки:

$$K_{RF} = \frac{R_T^{-1}\Pi_T}{C_{pF}M_F}; \quad K_{Rob} = \frac{R_T^{-1}\Pi_T}{C_{pob}M_{ob}} \quad (18)$$

критерій впливу умов зовнішнього теплообміну на поверхні твела:

$$K_\alpha = \frac{\alpha_T\Pi_T}{C_{pob}M_{ob}} \quad (19)$$

Параметри модернізації критеріїв впливу на умови екологічної безпеки:

$$m_N = \frac{K_N(m)}{K_N(b)}; m_{RF} = \frac{K_{RF}(m)}{K_{RF}(b)}; m_{Rob} = \frac{K_{Rob}(m)}{K_{Rob}(b)} \quad (20)$$

$$m_\alpha = \frac{K_\alpha(m)}{K_\alpha(b)} \quad (21)$$

Умови забезпечення або підвищення екологічної безпеки при модернізації активної зони реактора:

$$\frac{dT_F(m)}{dt} - \frac{dT_F(b)}{dt} \leq 0 \quad (22)$$

$$\frac{dT_{ob}(m)}{dt} - \frac{dT_{ob}(b)}{dt} \leq 0 \quad (23)$$

Тоді, з урахуванням параметрів модернізації (20) і (21), умови забезпечення або підвищення екологічної безпеки при модернізації активної зони реактора (22) і (23) відповідно:

$$(m_N - 1)K_N(b) - (m_{RF} - 1)\Delta T_{Fob}(b) \leq 0 \quad (24)$$

$$(m_{Rob} - 1)\Delta T_{Fob}(b) - (m_\alpha - 1)\Delta T_{obT}(b) \leq 0 \quad (25)$$

де $\Delta T_{Fob} = T_F(b) - T_{ob}(b)$; $\Delta T_{obT} = T_{ob}(b) - T_T(b)$.

Показано, що стає можливим, практичне застосування отриманих умов забезпечення або підвищення ядерної безпеки можна продемонструвати на прикладі двох актуальних завдань для сучасної ядерної енергетики з модернізації активної зони РУ з ВВЕР - диверсифікація тепловиділяючих збірок ядерних реакторів і вдосконалення теплофізичних властивостей ядерного палива. В результаті в розділі 5 отримано наступні головні висновки:

1. Представлений альтернативний метод аналізу безпеки під час модернізації активної зони реактора виключає вплив ефектів «коду користувача» та «відмінності коду». Методика аналізу безпеки при модернізації активної зони реакторних установок базується на отриманих аналітичних залежностях зміни максимальної температури ядерного палива та оболонок тепловиділяючих елементів у модернізованій та базовій моделі активної зони реактора.

2. Основне обмеження обґрунтованості впровадження детермінованих кодів при аналізі безпеки модернізації реакторних установок пов'язане з ефектами «коду користувача» та «відмінності кодів». Ці негативні наслідки ускладнюють об'єктивну оцінку впливу модернізації реакторних установок на критерії та умови безпеки

3. Представлений альтернативний метод виключає вплив ефектів «користувача кодом» і «відмінності кодів» при модернізації теплофізичних властивостей і складу ядерного палива, конструкцій тепловиділяючих збірок, режимів роботи реактора на підвищеній або зниженій потужності і ін.

4. Метод аналізу безпеки при модернізаціях активної зони реакторних установок заснований на отриманих аналітичних залежностях змін максимальної

температури ядерного палива і оболонок тепловиділяючих елементів в модернізованій і базовій моделі активної зони реактора. Метод є обґрунтованим для застосування при модернізації теплофізичних властивостей і складу ядерного палива, конструкцій тепловиділяючих збірок, режимів роботи реактора на підвищеній, або зниженій потужності і ін.

В розділі 6 розглядаються особливості будівництва малих модульних реакторів (ММР) типу AP-160/300, NuScale, RollsRoyce та інші. Існує думка, що ці ММР є дуже перспективними для України. Про це свідчать підписані відповідні міжнародні меморандуми. У зв'язку з цим виникає нагальна потреба в удосконаленні схем тепlopостачання для приєднання атомних станцій малої потужності до міських тепломереж. Найбільш відпрацьованими та затребуваними компонентами АЕС малої потужності є водяні ММР під тиском. Їх розробники декларують, що проектні показники їх екологічної безпеки та незалежність від джерела води дозволяють розміщувати ММР близько до населених пунктів. Тому дослідження та розробка удосконалених схем приєднання ядерних станцій малої потужності до міських тепломереж, спрямовані на покращення можливостей існуючих схем тепlopостачання є особливо актуальною проблемою. Цю проблематику в ряді європейських країн вже достатньо давно визнано пріоритетною.

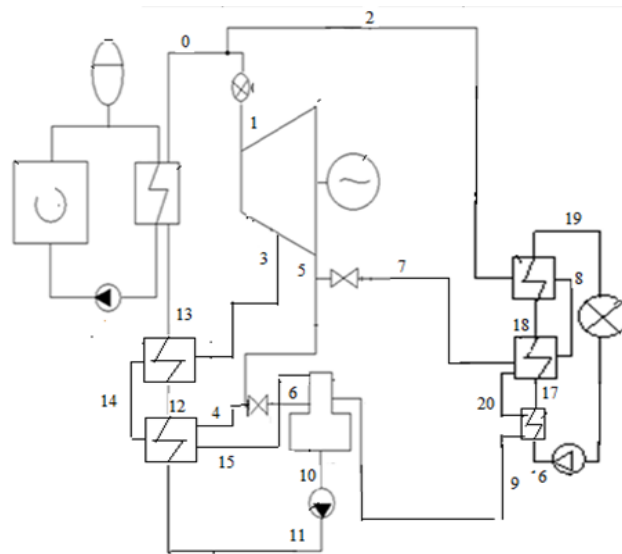


Рис. 5. Розрахункова схема роботи атомних станцій малої потужності у теплофікаційному режимі: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – компенсатор тиску; 4 – циліндр високого тиску парової турбіни; 5 – сепаратор; 6 – циліндр низького тиску (ЦНТ); 7 – електрогенератор; 8 – конденсатор змішення; 9 – суха градирня; 10 – циркуляційний насос; 11 – конденсатний насос; 12 – охолоджувач ежекторів; 13 – знесолююча установка; 14 – підігрівач низького тиску (ПНТ); 15 – деаератор; 16 – живильний насос; 17 – підігрівач високого тиску (ПВТ) №1; 18 – ПВТ-2; 19 – підігрівач мережевої води (ПМВ-2); 20 – ПМВ-1; 21 – охолоджувач дренажу; 22 – споживач теплоти; 23 – мережевий насос.

Використання SMR-160 для теплогенеруючих АТС малої потужності у з тепловою потужністю реактора 525 МВт, може успішно забезпечити комунальним теплом район крупного міста. В такому разі надзвичайно важливою є проблема забезпечення їх екологічної безпеки.

Сред найбільших переваг використання ядерних теплових станцій малої потужності є можливість зменшити негативний вплив енергетики на навколишнє середовище. Обмеженнями для таких досліджень є те що на сьогодні немає описаної технічної частини малих модульних реакторів, немає їх точних параметрів і це не дозволяє зробити точні математичні розрахунки.

В даному розділі з метою підвищення потужності для комунального теплопостачання запропоновано безпечну схему з використанням ПВТ у проти тисковому режимі та догрівом мережевої води гострою парою. В цьому режимі роботи АСМП з SMR-160 при потужності реактора 525 МВт забезпечує теплоспоживача потужністю 442,5 МВт та електричну потужність 36,1 МВт шляхом використання теплового насоса, випарником якого слугує конденсатор турбіни. Цей режим роботи дозволяє виробити 448,62 МВт теплової енергії для теплоспоживача та 76,38 МВт електричної потужності.

Таблиця 1. Порівняння різних схем використання АСМП з SMR-160 з точки зору виробітку електричної та теплової енергії

| Теплова схема | $N_{ел}$, МВт | $Q_{тепл}$, МВт | E_Q , МВт | ККД _{ех} , % |
|----------------------|----------------|------------------|-------------|-----------------------|
| Конденсаційний режим | 150 | 32 | – | – |
| Схема рис. 5 | 36,1 | 442,5 | 116,3 | 29,03 |
| Використання ТН | 76,38 | 448,62 | 69,9 | 27,7 |

В результаті порівняння двох засобів теплопостачання зроблено висновок про перевагу протитискового режиму, для якого ексергетичний ККД більше ніж ККД схеми з використанням теплового насоса на 1,33 % (абс.). При цьому при протисковому режимі температура прямої мережевої води становила 130 °С, при використанні ТН температура прямої мережевої води – 65 °С.

Узагальнюючи отримані результати, можна зробити висновок про ефективність та екологічну безпечність використання малих АЕС на базі ММР-160 в поєднанні з існуючими на українських ТЕС турбогенераторами.

ВИСНОВКИ

1. У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-прикладну проблему забезпечення екологічної безпеки сучасних ЯЕРУ з ВВЕР, АР-1000 та з ММР яка є одним із найактуальніших питань розвитку сучасної ядерної енергетики України і світу.

2. У результаті літературного аналізу виявлено, що реактори АР-1000 Покоління III+ компанії «Вестінгауз» мають підвищений рівень надійності та безпеки, в порівнянні з реакторами типу ВВЕР другого покоління, і можуть розглядатися в контексті розвитку ядерної енергетики світу та України. В Україні також розглядається можливість будівництва ММР типу МР-160/300 для заміни

вуглецевих теплових електростанцій. ММР мають багатопрофільне призначення - від виробництва електроенергії до утилізації ядерних відходів, і можуть зіграти помітну роль у декарбонізації вуглецевої промисловості та уникнути спалювання великих кількостей викопного палива. Однак гарантувати неможливість на МР-160/300 радіаційних важких запроектованих екологічних аварій та катастроф можна тільки в тому випадку, якщо проектна аварійна чи важка запроектована аварія неможлива в силу закладених в його роботу фізичних законів. Тому декларована виробниками екологічна безпека реакторів АР-1000 та МР-160/300 повинна досліджуватися і підтверджуватися для кожного конкретного проекту, що планується до впровадження в Україні.

3. Реактор АР-1000 є технологією Покоління III+. Для аварійного охолодження активної зони і корпусу в АР-1000 застосовуються пасивні системи безпеки, значно простіші і дешевші ніж активні насосні системи охолодження. В АР-1000, в порівнянні з діючими реакторами типу ВВЕР з аналогічною потужністю, кількість клапанів зменшено на 50%, трубопроводів - на 80-83%, кабелів - на 70-87%, насосів - на 35%, а обсяг сейсмостійких будівель на 45-50%. В результаті можна зменшити число відмов обладнання і відповідно кількість небезпечних аварійних подій і ситуацій, що можуть закінчуватися важкими запроектованими екологічними аваріями і катастрофами. ММР мають багато активних і пасивних елементів безпеки. ММР працюють на низькозбагаченому урані з різними коефіцієнтами збагачення з певною кількістю плутонію. На основі розробленого детерміністського методу аналізу відносних критеріїв та умов безпеки ядерних енергоустановок різних типів визначені відносні критерії та умови екологічної безпеки ядерних енергоустановок з реакторами типу ВВЕР-1000 та АР-1000 у відношенні функцій безпеки на аварійному підживленні та охолодження активної зони реактора та парогенераторів.

4. Здійснено дослідження щодо впливу глобальних змін клімату на системи охолодження через відкриті водойми на основі отриманих прогнозних оцінок ефективності роботи станцій в залежності від температури водних об'єктів. На основі встановлених прогнозних середньомісячних температурних даних на період до 2100 року встановлено прогнозні залежності підвищення температури ставків-охолоджувачів АЕС та отримані коефіцієнти вихідних потужностей наступних десятиліть і в українському ядерно-енергетичному секторі в розрізі працюючих АЕС. Отримані дані розрахунків свідчать, що зміна клімату та глобальне потепління є ризиком виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах ядерної енергетики, та потребує прийняття стратегічних рішень щодо переходу до реакторів нового покоління.

5. Основними причинами великої катастрофічної ядерно-екологічної важкої аварії на АЕС Фукусіма-1 були: значні конструктивно-технічні недоліки киплячих реакторів типу ВВР у запобіганні ядерним важким запроектованим аваріям; парогазові вибухи; повна втрата електропостачання; недостатня підготовленість персоналу до ліквідації екологічної аварії з повним довгостроковим знеструмленням за надзвичайної ситуації після затоплення проммайданчика АЕС. Основними причинами руйнівних парогазових вибухів із

катастрофічними екологічними наслідками на АЕС Фукушіма стали: втрата герметичності контурів систем пасивної безпеки відведення залишкового тепла реактора на енергоблоках № 1 і 3, втрата герметичності контуру на реакторі в об'ємі захисної герметичної оболонки на енергоблоку №2 та відмова, критичної для безпеки, функції відведення залишкового тепла в басейні зберігання та витримки відпрацьованого ядерного палива блоку №4.

6. Результати застосування удосконаленого детерміністського методу визначення критеріїв і умов парогазових вибухів у динамічних аварійних режимах у «щільному» реакторному контурі з відмовами запобіжних клапанів та систем аварійного парогазовидалення показують, що умови виникнення водневих вибухів визначаються максимальною швидкістю збільшення температури оболонок твелів, а умови парових вибухів - максимальною швидкістю збільшення тиску внаслідок інтенсифікації процесів пароутворення. Критерії водневої детонації у динамічних аварійних режимах визначаються граничною амплітудою збільшення температури оболонок твелів та середньою швидкістю течії теплоносія в активній зоні реактора.

7. Традиційні ймовірнісні підходи оцінки об'єктивного стану/рівня безпеки Запорізької АЕС у екстремальних умовах є недостатньо обґрунтованими з урахуванням уроків найбільших ядерних та радіаційних аварій. На основі детерміністського підходу визначено умови критичного затоплення для екологічної безпеки промислового майданчика Запорізької АЕС внаслідок екстремальних бойових дій. Його затоплення може бути причиною виникнення двох вихідних аварійних подій: повне тривале знеструмлення енергоблоків; порушення умов теплообміну у сухих сховищах відпрацьованого ядерного палива. Запобігання затопленню промайданчика ЗАЕС може ґрунтуватися на будівництві захисних бар'єрів від затоплення на березі ставка-охолоджувача. Ефективна стратегія управління аваріями з повним тривалим знеструмленням енергоблоків з ВВЕР-1000 також може бути заснована на комплексній модернізації систем аварійного підживлення парогенераторів насосами з пароприводами та з контурами природної циркуляції систем пасивного відведення тепла від гермооб'єму реакторної установки.

8. Удосконалений детерміністський метод визначення критеріїв і умов парогазових вибухів у динамічних аварійних режимах у "щільному" реакторному контурі з відмовами запобіжних клапанів та систем аварійного парогазовидалення дав можливість провести розрахунковий аналіз та установити, що проектна стратегія керування аваріями з ТПЗ не здатна забезпечити успішне виконання функцій безпеки для відведення залишкових тепловиділень з активної зони ядерного реактора та для підтримання необхідного рівня живильної води в парогенераторах. Умови екологічної безпеки за максимальною температурою оболонок твелів і максимально допустимими рівнем живильної води в парогенераторі порушуються при проектній стратегії керування аваріями з тривалим повним знеструмленням. Метод аналізу рівня безпеки при модернізаціях активної зони реакторних установок заснований на отриманих аналітичних залежностях змін максимальної температури ядерного палива і оболонок тепловиділяючих елементів в модернізованій і базовій моделі активної зони

реактора. Метод є обґрунтованим для застосування при модернізації теплофізичних властивостей і складу ядерного палива, конструкцій тепловиділяючих збірок, режимів роботи реактора на підвищеній, або зниженій потужності і ін.

9. Представлений альтернативний метод аналізу рівня екологічної безпеки під час модернізації активної зони реактора виключає вплив ефектів «коду користувача» та «відмінності коду» показує, що головне обмеження обґрунтованості впровадження детермінованих кодів при аналізі безпеки модернізації реакторних установок пов'язане з ефектами «коду користувача» та «відмінності кодів». Ці негативні наслідки ускладнюють об'єктивну оцінку впливу модернізації реакторних установок на критерії та умови безпеки. Альтернативний метод виключає вплив ефектів «користувача кодом» і «відмінності кодів» при модернізації теплофізичних властивостей і складу ядерного палива, конструкцій тепловиділяючих збірок, режимів роботи реактора на підвищеній або зниженій потужності і ін.

10. Отримані результати комп'ютерного моделювання епітермічного нейтронно-енергетичного комплексу демонструють вплив параметрів зовнішнього джерела нейтронів на параметри режиму горіння навіть для спрощеної моделі. У реальному процесі ядерного горіння суттєвий вплив на режим горіння матиме не тільки густина потоку зовнішнього джерела нейтронів, але і його енергетичний спектр. Це добре узгоджується з фізичними механізмами, що забезпечують коефіцієнт відтворення і вплив параметрів зовнішнього джерела нейтронів на хвильовий режим горіння, необхідний для реалізації автохвильового режиму горіння. Отримано модельну оцінку теплової потужності епідермального хвильового ядерного реактора з циліндричною однорідною активною зоною діаметром 50 см з природного урану і сповільнювачем, яка становить 10 829,08 МВт, що в 3,6 рази перевищує теплову потужність реактора ВВЕР-1000.

11. Можливість використання MMR для комунального теплопостачання міст має обмеження за потужністю. Для підвищення потужності теплопостачання запропоновано схему з використанням ПВТ у протитисковому режимі та догрівом мережевої води гострою парою. В цьому режимі роботи АСМП з SMR-160 при потужності реактора 525 МВт забезпечує теплоспоживача потужністю 442,5 МВт та електричну потужність 36,1 МВт. Використання теплового насоса, випарником якого слугує конденсатор турбіни. Цей режим роботи дозволяє виробити 448,62 МВт теплової енергії для теплоспоживача та 76,38 МВт електричної потужності. В результаті порівняння двох засобів теплопостачання зроблено висновок про перевагу протитискового режиму, для якого ексергетичний ККД більше ніж ККД схеми з використанням теплового насоса на 1,33 % (абс.). При цьому при протисковому режимі температура прямої мережевої води становила 130 °С, при використанні ТН температура прямої мережевої води – 65 °С.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові публікації, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. **Кордуба І.Б.**, Ващенко В.М., Скалозубов В.І., Комаров Ю.В., Гриб В.Ю. Моделювання екологічної небезпечної аварії з тривалим знеструмленням на енергоустановках з ВВЕР. Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій: Колективна монографія. Полтава – Львів, 2022. С. 218-230.

Авторкою запропоновано на основних уроках Фукушімської аварії модернізувати традиційну стратегію керування аваріями з повним знеструмленням.

2. Ващенко В.М., Скалозубов В.І., **Кордуба І.Б.** Ядерна та екологічна небезпека Запорізької АЕС в екстремальних умовах війни в Україні. Виклики та загрози об'єктам критичної інфраструктури: Колективна монографія. Київ. С. 54-59.

Авторкою запропоновано захист для протидії неможливого затоплення ЗАЕС.

3. Skalozubov V. Melnik S., Vashchenko V. **Korduba I.** Hrib V. The method of expressanal ysisofnu clearand ecological safety during the modernization of Nuclearfuel. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 32(2), 388-395. ISSN2617-2119. doi: 10.15421/112335 (**Web of Science**)

Автором запропоновано метод аналізу ядерно-екологічної безпеки, який ґрунтується на інтерпретації зміни умов безпеки за температурою оболонок тепловиділяючих елементів та ядерного палива та може бути використаний при модернізаціях ядерних енергетичних установок.

4. VashchenkoV., **Korduba I.**, Zhukova O. Technological and operating features ofthe AR-1000 reactors generation III+ and small modular reactors MR-160. Екологічна безпека та природокористування. 2021. №40. С.149-156. (**Фахове видання**) DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.149-156>

Автором проведено аналіз технологічних рішень при яких отримується максимально низька імовірність радіаційних наслідків для населення та навколишнього середовища.

5. **Кордуба І.** Ядерно-екологічна безпека світової ядерної енергетики на етапі четвертого глобального енергетичного переходу. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. 2022. 26. С.7-14. (**Фахове видання**) DOI: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2\(26\)-7-14](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2(26)-7-14)

6. **Кордуба І.**, Патлашенко Ж. Шляхи технологічного посилення ядерно-екологічної безпеки та ефективності ядерної енергетики. Екологічні науки. 2023. 46. С.75-79. (**Фахове видання**) DOI: 10.32846/2306-9716/2023.есо.1-46.13

Авторкою розглянуто основні шляхи та рекомендації щодо посилення екологічної безпеки та ефективності ядерної енергетики України

7. Skalozubov V., Vashchenko V., Komarov Y., **Korduba I.**, Zhukova O. Method foranalysis of nuclearsafety of reactor facilities during modernization of the ir

Core.Ecological Engineering&Environmental Technology (EET), 2023, 24(6), s. 186–191. ISSN 2719-7050. <https://doi.org/10.12912/27197050/168372> (**Scopus, Q3**)

Розроблено альтернативний метод аналізу безпеки активної зони реакторних установок з можливістю вдосконалення теплофізичних властивостей і складу ядерного палива, режимів роботи реактора його конструктивних особливостей

8. Voloshkina O., **Korduba I.**, Zhukova O. Determination of the efficiency of cooling systems of nuclear power plants of Ukraine in the conditions of global climate changes. *Ecological Engineering & Environmental Technology (EET)*, 2023, 24(5), s. 170–176. ISSN 2719-7050. <https://doi.org/10.12912/27197050/165900> (**Scopus, Q3**)

Авторкою оцінено вплив глобальних кліматичних змін на ефективність роботи об'єктів енергетики України. Запропоновано підхід та методуку досліджень.

9. **Кордуба І.**, Патлашенко Ж. Техніко-екологічний аналіз стану та перспектив світової енергетики. *Екологічні науки*. 2023. 47. С. 7-16. doi.org/10.32846/2306-9716/2023.есо.2-47.1 (**Фахове видання**)

Авторкою здійснено техніко-екологічний аналіз стану та перспектив світової енергетики, запропоновано підхід до такої оцінки.

10. Vashchenko V., Skalozubov V., Komarov Y., **Korduba I.**, Yarotskaia G. Experience in learning lessons from the major accident at the “FUKUSHIMA-1» nuclear power plant to improve the safety of the global nuclear industry. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*. 2023. 10(5). S.32-41. ISSN (Online) 2348 – 7968. (**Фахове видання**)

Авторкою запропоновано удосконалення стратегії управління нещасними випадками з повною довгостроковістю знеструмлення та вдосконалення методів моделювання умов на стадіях аварійних процесів.

11. Ващенко В., Скалозубов В., **Кордуба І.** Жукова О., Косенко С. Критерії термодинамічних умов парогазових вибухів у динамічних режимах аварій на ядерних енергоблоках із реакторами ВВЕР. *Екологічна безпека та природокористування*. 2022. 44. С. 128-134. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.4.128-134> (**Фахове видання**)

Автором розроблено метод визначення критеріїв і умов виникнення парогазових вибухів при динамічних режимах аварій зі «щільним» реакторним контуром та відмовами запобіжних клапанів моделювання вихідних аварійних подій – сейсмічні впливи, падіння масивних об'єктів тощо

12. Ващенко В., **Кордуба І.** Розвідка та видобуток глибинних корисних копалин без шахт і кар'єрів за допомогою ядерних автономних термобурів-геозондів. *Екологічна безпека та природокористування*. 2023. 45. С.104-110. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.104-110> (**Фахове видання**)

Авторкою розглянуто аспекти теорії та побудови автономних ядерних глибоких термічних бурів-геозондів, використання яких має велике значення для істотного зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище.

13. **Korduba I.** Zhukova O. Patlashenko Z. Prospects of technological improvement of nuclear and environment safety of world energy. *Open Journal of Ecology*, 2023, 13, s. 536-548. ISSN Online: 2162-1993. ISSN Print: 2162-1985. DOI: [10.4236/oje.2023.138033](https://doi.org/10.4236/oje.2023.138033) (**Web of Science**)

Авторкою розроблено основи технологічного вдосконалення ядерної та екологічної безпеки світової енергетики виходячи з умов завантаження активної зони реакторів нового покоління ядерним паливом.

14. ВащенкоВ., **Кордуба І.** Аналіз ядерно-екологічної безпеки Запорізької АЕС в екстремальних умовах експлуатації у військовий час. Екологічна безпека та природокористування. 2023. № 47. С.30-38. **(Фахове видання)**

Авторкою з використанням детерміністського підходу було визначено умови критичного затоплення для безпеки промислового майданчика Запорізької АЕС внаслідок бойових дій.

15. Tarasov V., Chernenzenko S. **Korduba I.** Vashchenko V. Features of the Therna plutonium effect and dynamics of the accidentat Unit III of the Fukushima 1 nuclear powerplant. *Deuts cheinternationale Zeitschriftfür Zeitgenössische Wissenschaft*, 2023, 61. s.48-62. DOI: [10.5281/zenodo.8204601](https://doi.org/10.5281/zenodo.8204601)

Авторкою розраховано температурні залежності густини джерел тепла для МОКС-палива та оксидно-уранового палива. Представлено теорію динаміки аварії, яка базується на принциповій відмінності температурних залежностей густини джерел тепла для МОКС-палива та оксидного уранового палива.

16. ВащенкоВ., **КордубаІ.** Моделювання теплофізичних процесів в системі «автогомний термобур-розпла-порода. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2023. 159. С.11-119. **(Фахове видання)**

Авторкою була здійснена постановка задачі і моделювання теплофізичних процесів в системі «автономний термобур-розплава-порода»

17. Skalozubov V. Vashchenko V. **Korduba I.** Dorozh O. Budev D. Kandeeva V. Zhukova O. Method of Qualification of Nuclear and Environmental Safety Systems of Nuclear Power Plants With VVER-1000 and AR-1000. *Danish Scientific Journal*, 2023, 74, s.77-80. ISSN 3375-2389. doi.org/10.5281/zenodo.8199248

Авторкою розроблено основи детермінованого методу аналізу відносних критеріїв та умов безпеки АЕС різних типів.

18. Волошкіна О.С., Жукова О.Г., **Кордуба І.Б.**, Маршалл Д.І. Методичні підходи до оцінки забруднення поверхневих водних об'єктів в зоні дії гірничо-видобувних підприємств на прикладі Донецько-Придністровського регіону. Екологічна безпека та природокористування. 2021. 39. С. 69 – 75. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.3.69-75> **(Фахове видання)**

Авторка приймала участь в оцінці якості водних ресурсів ставків-охолоджувачів

19. Voloshkina O., Efimenko E., **Korduba I.**, Chernyshev D., Shovkivska V., Zhukova O. Visual modeling of the landslide slopes stress-strain state for the computer-aided design of retaining wall structures. 2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems, CADSM 2021 - Proceedings, 2021. ISSN: 2572-7583. DOI: [10.1109/CADSM.52681.2021.9385211](https://doi.org/10.1109/CADSM.52681.2021.9385211) **(Scopus)**

Авторкою був поетапно прослідкований процес перерозподілу напружень в зсувному схил із підвищенням його сейсмічності для забезпечення екологічної

безпеки розташування ставків-охолоджувачів. Аналіз показав, що зі збільшенням сейсмічності втрата стійкості конструкції становила приблизно 10–20 %.

20. Kaliukh I., Voloshkina O., **Korduba I.**, Honcharenko A., Kovaliova A. Complex Research and Implementation of the IoT System for the Residential Buildings Vibroprotection. 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis and Intelligent Computing, SAIC 2022 - Proceedings, 2022. DOI: [10.1109/SAIC57818.2022.9922984](https://doi.org/10.1109/SAIC57818.2022.9922984) (**Scopus**)

Авторка приймала участь у теоретичному обґрунтуванні застосування концепції IoT, DSS та DW в умовах підтопленої забудованої території в зоні впливу водойм-охолоджувачів.

21. Kaliukh I., Voloshkina O., **Korduba I.**, Zhukova O., Honcharenko A. Mathematical modelling of seismic activation of landslides in the Neogene clay of the Carpathian region. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2022», Oct. 2022, Volume 2022, s. 1-5. ISBN. 978-973-741-663-9. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590071> (**Scopus**)

Авторка приймала участь в моделюванні сейсмічної активності на стан екологічної безпеки з метою визначення ризику екологічної безпеки для місць облаштування водойм-охолоджувачів при відкритій системі охолодження.

Наукові публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

22. Ващенко В., Антонов А., Лоза Є., **Кордуба І.**, Капуста Т. Перспективи впровадження плазмової технології перероблення небезпечних відходів, XII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми екології та енергозбереження». 2020, Миколаїв. С. 119.

Авторкою розглянуто перспективні технології перероблення небезпечних відходів

23. Ващенко В., **Кордуба І.**, Гриб В. Технологічний та екологічний аналіз сучасних тенденцій розвитку ядерно-енергетичних технологій, VIII міжнародний з'їзд екологів. 2021, Вінниця. С.51-57.

Участь в розробленні технологічного аналізу тенденцій подальшого розвитку сучасних технологій на ядерних енергетичних об'єктах

24. Жукова О., **Кордуба І.** Екологія – наука чи світогляд. Всеукраїнський круглий стіл. Київ. 16 вересня 2021 року. С.234 -238

Автор розробила основні підходи до формування екологічного світогляду на питанні енергетичної безпеки країни

25. Жукова О., **Кордуба І.**, Березний М. Екологічний потенціал України в умовах воєнного стану. I Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми раціонального використання соціально-економічного, еколого-енергетичного, нормативно-правового потенціалу України та її регіонів». Луцьк. 01 травня 2022 року. С.33-36

Авторкою надані пропозиції щодо збереження енергетичного потенціалу країни в умовах воєнного стану

26. Ващенко В., **Кордуба І.**, Негода Н. Критеріальна оцінка екологічної безпеки ядерних енергетичних технологій, II Міжнародна наукова конференція

«Комплексний підхід до модернізації науки: методи, моделі та мультидисциплінарність». 2022. Чернівці. С. 253

Розроблені критеріальні оцінки щодо екологічної безпеки ядерних технологій

27. Ващенко В., **Кордуба І.** Прогнозування особливостей радіоекологічного впливу наслідків аварій на ядерно-енергетичних об'єктах. *Modern research in world science: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції.* Львів, 2022. С.151-158.

Авторкою здійснено аналіз особливостей радіоекологічного впливу наслідків аварій.

28. **Кордуба І.,** Жукова О. Навколишнє середовище – «мовчазна жертва» війни. *Проблеми техногенно-екологічної безпеки в сфері цивільного захисту: Матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф.* Харків, 2022. С. 208-210

Аналіз впливу військових дій на навколишнє середовище, зокрема досліджено питання ядерного тероризму.

29. Ващенко В., Скалозубов С., **Кордуба І.,** Жукова О., Косенко С. Моделювання парогазових вибухів на ядерно-енергетичних реакторних установках із ВВЕР. *Здобутки та досягнення прикладних та фундаментальних наук XXI століття: матеріали IV Міжнародної наук. конф.* Вінниця, 2022. С. 184-187

Здійснено моделювання парогазових вибухів на ядерно-енергетичних установках

30. **Кордуба І.** Шляхи підвищення ядерно-екологічної безпеки та ефективності ядерної енергетики. *Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку: матеріали XXVIII Міжнародної наук.-практ. конф.* Лімасол, 2023. С. 261-268

31. Ващенко В., **Кордуба І.** Концептуальний аспект ядерних автономних термобурів для геотехнологій видобутку глибинних корисних копалин. *Modern research in world science: матеріали VII Міжнародна наук.-практ. конф.* Львів, 2023. С. 351-359

Розроблені концептуальні основи застосування ядерних автономних термобурів для геотехнологій видобутку глибинних корисних копалин

32. **Кордуба І.** Оцінка рівня ядерної та радіаційної безпеки Запорізької атомної електростанції в екстремальних умовах воєнного часу. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень: матеріали IV Міжнародна наук. конф.* «. Житомир, 2023. С.125-129.

33. Волошкіна О., **Кордуба І.,** Жукова О., Цибитовський С. Оцінка впливу існуючих систем охолодження атомних реакторів на екологічну безпеку України в умовах кліматичних змін. *Green construction: матеріали II Міжнародної наук.-практ. конф.* Київ, 2023. С. 427-431.

Розроблені наукові підходи та здійснено моделювання ефективності роботи об'єктів енергетики в умовах кліматичних змін

34. Жукова О., **Кордуба І.** Проекція змін клімату та їх зв'язок з водними ресурсами. *Екологічна безпека держави: матеріали XVII Всеукраїнської наук.-практ. конф.* Київ, 2023. С. 73-74

Розглянуто взаємовплив зміни клімату та основних характеристик водних

ресурсів

35. **Кордуба І.** Вплив роботи електростанцій ТЕС та АЕС на довкілля, VI міжнародна наукова конференція «CHALLENGES AND PROBLEMS OF MODERN SCIENCE». Лондон, 2023. С. 124-132.

36. **Кордуба І.** Технологічний стан та перспективи створення ядерних хвильових реакторів покоління GV. INNOVATIONS AND PROSPECTS IN MODERN SCIENCE: матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф.. Стокгольм, 2023. С.247-254

37. **Кордуба І.** Аналіз ядерно-екологічної безпеки ядерних енергетичних установок з ВВЕР-1000/340 та AP-1000. *Ricerche scientifici metodi della loro realizzazione: esperienza mondiale e realtà omestiche*: матеріали міжнародної конф. Болонья, 2023. С.1-12

38. Ващенко В., Скалозубов В., **Кордуба І.** Ядерна та екологічна небезпека Запорізької АЕС в екстремальних умовах війни в Україні. *Виклики та загрози об'єктам критичної інфраструктури*: матеріали Міжнародної наук.-практ. конф.. Київ, 2023. С.54-59

Автором проаналізовано робота Запорізької АЕС в екстремальних умовах війни

39. Ващенко В., Скалозубов В., Комаров Ю., **Кордуба І.**, Гриб В. Моделювання екологічної небезпечної аварії з тривалим знеструмленням на енергоустановках з ВВЕР. *Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022*: Колективна монографія. Полтава – Львів, 2022.С.- 218-230.

Розроблені основи теплогідродинамічної моделі екологічно небезпечної аварії на ядерних енергоустановках на базі реакторів типу ВВЕР для модернізованої стратегії керування аваріями з тривалим повним знеструмленням (ТПЗ)

40.**Кордуба І.Б.**, Жукова О.Г., Негода Н.В. Будівельні матеріали та технології зниження забруднення навколишнього середовища в контексті змін клімату. *Захист і відновлення екологічної рівноваги та забезпечення самовідновлення екосистем*: колективна монографія. Полтава: Видавництво ПП «Астрая», 2022. С.16-24.

Авторкою було проаналізовано зміни температур повітря за довгостроковий період.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

41. Vashchenko V., Skalozubov V. Voloshkina O. **Korduba I.**, Dudarev I. Hayo H. Zhukova O., Hryb V. Stipulating the radio ecological impact of consequences of accidents at nuclear power facilities. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021. 11(10). s. 24-27. DOI: 10.15421/2021_314

Автором удосконалено ризик-орієнтований метод прогнозування впливу радіаційних наслідків аварій у широкому діапазоні потужностей дозопромінення.

АНОТАЦІЯ

Кордуба І.Б. - Науково- методологічні засади підвищення екологічної безпеки ядерної енергетики України в екстремальних умовах експлуатації. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 - екологічна безпека. Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, 2023.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-прикладної проблеми забезпечення технологічної, експлуатаційної й екологічної безпеки сучасних ЯЕРУ з ВВЕР, АР-1000 та з ММР, що є одним із найактуальніших питань розвитку сучасної ядерної енергетики України і світу.

Визначено вплив систем охолодження АЕС на їхню екологічну безпеку в умовах глобальних кліматичних змін. Оцінено безпеку реакторів АР-1000 компанії Вествнгауз та ММР160/300 на основі яких планується розвиток української ядерної енергетики і порівняти її з сбойностями та екологічною безпекою реакторів ВВЕР-1000. Розроблено методи та засоби для оцінювання рівня екологічної безпеки реакторів типу ВВЕР та надано пропозиції щодо його підвищення. Виконано моделювання екологічно небезпечних аварій з довготривалим знеструмленням ЯЕРУ з ВВЕР, моделювання режиму горіння біжної хвилі на епітеплових нейтронах. Оцінено можливість теплофікаційного застосування ММР на українських теплогенераційних малих станціях малої потужності.

Ключові слова: ядерна енергетика, ядерна енергетична реакторна установка, екологічна безпека, радіоактивні відходи, відпрацьоване ядерне паливо, ресурсна паливна база, непоширення ядерних матеріалів, уран, плутоній, ядерний реактор; малий модульний реактор.

ANNOTATION

Korduba I.B. - Scientific and methodological principles of increasing the environmental safety of the nuclear power industry of Ukraine in extreme operating conditions. On the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 21.06.01 - environmental safety. Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2023.

According to the PRIS database, 442 NPPs are currently in operation in the world and 56 NPPs are under construction. In the period of 2007-2021, 148 new NPPs were built, commissioned and continue to be under construction: - VVER/PWR - 128 units (86%), PHWR - 10 units (6.7%), BWR - 5 units (3.4%), FBR - 4 units (2.7%), HTGR - 1 unit (0.67%). Thus, the renewal of the world NPP fleet with VVER of the second-generation G-2 type by about 86% is also carried out through the construction of reactor power plants with VVER/PWR of the second generation G-2. At the same time, after the ecological and nuclear disaster at Fukushima-1 NPP, passive emergency cooling systems are used in new NPPs, for example, in NPPs with AR-1000 reactors of the third generation G-3 of the American company Westinghouse.

At the same time, the pace of global construction and commissioning of new nuclear power plants has slowed significantly over the past 30 years. A significant reason for this was the protest mood of the world community, the presence of excess electric power capacities and competition in energy markets, low economic performance of operated NPPs with huge capital expenditures, very long construction of new NPPs, nuclear and

environmental disasters at Chernobyl and Fukushima-1. However, despite all these and other drawbacks, many countries in Southeast Asia, the Middle East, and African regions are interested in creating and developing their own nuclear power industry.

In Ukraine, a total of 13 NPPs are in operation at 4 NPPs, including VVERs of the G-2 generation, which are at the end of their design life. In the future, as stated by the President and the Government of Ukraine, Ukraine plans to build AR-1000 nuclear reactors of the American company Westinghouse and small modular reactors of the MR-160/300 type, and others at its NPPs.

It is important to note that nuclear energy in its current form was created during the Cold War, when its main task was to develop nuclear weapons materials based on the uranium-plutonium nuclear fuel cycle (U-PF). At the same time, the problems of nuclear and environmental safety were postponed to the future as secondary. However, against the background of numerous incidents, accidents and nuclear and environmental disasters at NPPs around the world, the world community has finally formed a new understanding in the last 20 years that the nuclear and environmental factor should be an indisputable, decisive and the most important imperative priority of modern and future nuclear power. However, today, Russian aggression and full-scale war against Ukraine have become a new additional dangerous and powerful factor of global influence on nuclear and environmental safety of the world nuclear power industry.

Therefore, analysis of technological, operational and nuclear-environmental safety features of modern VVER, AR-1000 and SMR NPPs is one of the most urgent issues of modern nuclear energy development in Ukraine and the world.

Keywords: nuclear energy, nuclear power reactor, environmental safety, radioactive waste, spent nuclear fuel, resource fuel base, non-proliferation of nuclear materials, uranium, plutonium, nuclear reactor; small modular reactor.