

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**СИДОРЕНКО ВОЛОДИМИР ЛЕОНІДОВИЧ**



УДК 504[054+064+75]:621.039.743

**ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ:  
ТЕХНОПРИРОДНІ ЗАГРОЗИ ВІД РАДІАЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ  
ОБ'ЄКТІВ І ЯВИЩ**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

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

Київ 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі профілактики пожеж та безпеки життєдіяльності населення Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (ІДУ НД ЦЗ) Державної служби України з надзвичайних ситуацій, м. Київ.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Азаров Сергій Іванович**,  
Інститут ядерних досліджень НАН України,  
провідний фахівець відділу ДЯР

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Фролов Валерій Федорович**,  
Національний авіаційний університет,  
завідувач кафедри екології

доктор технічних наук, професор  
**Захматов Володимир Дмитрович**,  
Державна екологічна академія  
післядипломної освіти та управління,  
професор кафедри екологічної безпеки

доктор технічних наук, доцент  
**Попович Василь Васильович**,  
Львівський державний університет  
безпеки життєдіяльності,  
начальник Навчально-наукового  
інституту цивільного захисту

Захист відбудеться «30» жовтня 2020 р. об 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.09 у Національному авіаційному університеті за адресою: проспект Любомира Гузара, 1, корпус 5, ауд. 611, м. Київ, Україна, 03058.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: проспект Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058 та на сайті: [www.nau.edu.ua](http://www.nau.edu.ua).

Автореферат розісланий «25» вересня 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Л.М. Черняк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Чорнобильська катастрофа явила собою масштабну, унікальну аварію в історії людства зі своїми занадто негативними наслідками, відсутністю досвіду їх подолання, різноманітністю об'єктів ураження тощо. Не дивлячись на те, що з моменту цієї катастрофи минуло вже майже 35 років, її наслідки будуть ще довго нагадувати про себе своїм негативним впливом на довкілля.

У післяаварійний період (10–15 років) було написано дуже багато наукових праць різного характеру, присвячених Чорнобильській катастрофі і, зокрема, її екологічній складовій. Потім інтерес до Чорнобильської тематики дещо спав та імпульсивно проявлявся після взаємопов'язаних надзвичайних подій, таких як аварії і пожежі на об'єкті «Укриття» (далі – ОУ), масштабні пожежі у Чорнобильській зоні відчуження (далі – ЧЗВ), аварія на АЕС «Фукусіма» тощо.

Після Чорнобильської катастрофи було проведено чимало досліджень щодо вторинної небезпеки радіоактивних аерозолів під час пожеж в лісах, забруднених техногенними радіонуклідами. Досі тривають дискусії щодо визначальних параметрів надходження радіоактивних продуктів згоряння (далі – РПЗ) у довкілля під час лісових пожеж на території ЧЗВ. Отже дослідження тривають, оскільки наразі немає гарантованих даних, що однозначно визначають процеси надходження різних радіонуклідів в атмосферу під час лісових пожеж.

Вперше методику дослідження радіаційних наслідків від пожеж в лісах, забруднених техногенними радіонуклідами, було запропоновано Душа-Гудимом С.І. В подальшому розвиток цього напрямку досліджень продовжили Однолько А.А., Гаркавий С.Ф., Процак В.П., Граб М.В., Талерко М.М., Гаргер Є.К. та ін. Моделювання лісових пожеж добре представлено в роботах Гришина А.М. Автореабілітаційними процесами в екосистемах ЧЗВ займалися Шестопапов В.М., Францевич Л.І., Балашов Л.С., Бондаренко Г.М., Гайченко В.А.

Викликає велику зацікавленість колективна монографія під редакцією академіка НАН України Барьяхтара В.Г. «Чернобыльская катастрофа», в якій надана інформація з вивчення формування поля радіоактивного забруднення внаслідок аварії на ЧАЕС, дослідження біогеохімічних властивостей радіонуклідів чорнобильського викиду й оцінці механізму їх міграції в природному середовищі території України.

Особливу увагу з точки зору виникнення загроз потребують радіаційно небезпечні об'єкти (далі – РНО), що знаходяться в ЧЗВ, а саме: головні корпуси ЧАЕС, комплекс «ОУ – Новий Безпечний Конфайнмент» (далі – НБК), сховище відпрацьованого ядерного палива (далі – СВЯП) «мокрого» типу (СВЯП-1), СВЯП «сухого» типу (СВЯП-2), завод з переробки рідких радіоактивних відходів (далі – РАВ), промисловий комплекс твердих РАВ, виробничий комплекс (далі – ВК) «Вектор», пункт поховання радіоактивних відходів (далі – ППРВ) «Буряківка», приреакторне сховищу твердих і рідких РАВ тощо. Зазначені об'єкти несуть потенційну небезпеку навколишньому середовищу та являють собою загрозу довкіллю. Також відносно щільне скупчення цих РНО в одному місці підвищує ймовірність виникнення ефекту «доміно» під час аварій і надзвичайних

ситуацій різного характеру, особливо в умовах стану гібридної війни.

ОУ – потенційно небезпечний об'єкт і його небезпека зростає з часом мірою руйнування конструкцій, що постраждали під час аварії. Тому згідно зі стратегією перетворення ОУ в екологічно безпечну систему (далі – ЕБС) основним завданням після етапу стабілізації та створення НБК (додаткового бар'єра) є вилучення паливномістких мас (далі – ПММ) високоактивних відходів, після чого передбачено підготовку до зняття з експлуатації ОУ. Для цього необхідно було провести заходи щодо стабілізації, створення додаткових бар'єрів і демонтажу нестабільних конструкцій. Характеристиками радіоактивних аерозолів, їх поширенням за межі ОУ, а також механізми утворення та шляхи міграції рідких РАВ висвітлено у роботах Краснова В.О., Носовського А.В., Рудька В.М., Щербіни В.М. Реалізація проектів стабілізації і перетворення ОУ в ЕБС, призначення, конструкція та вимоги НБК розглядалися в працях Круковського П.Г., Метель М.А., Скляренка Д.І.

Роботи Ключникова О.О., Пазухина Е.М., Шігери Ю.М., Шігери В.Ю. присвячено актуальній проблемі переробки та поховання РАВ, що накопичуються в ЧЗВ. У працях Ольховника Ю.О. йдеться про розробку наукових засад прогнозування загроз забруднення довкілля у разі поверхневого захоронення РАВ в Україні і захисних властивостей інженерних і геологічних бар'єрів, властивих для майданчиків ВК «Вектор» і ППРВ «Буряківка».

Разом з тим, актуальною залишається проблема комплексного аналізу і оцінки впливу техноприродних загроз на рівень екологічної безпеки ЧЗВ, вирішення якої дасть змогу підвищити ефективність системи екологічного управління зазначеної території.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційної роботи відповідає Конституції України (ст. 16), Кодексу цивільного захисту України (гл. 12), Закону України від 25.06.1991 № 1264-ХІІ «Про охорону навколишнього природного середовища», Закону України від 21.12.2010 № 2818-VI «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2020 року», Розпорядженню Кабінету Міністрів України від 17.10.2007 № 880-р «Про схвалення Концепції національної екологічної політики України на період до 2020 року» та змісту завершених науково-дослідних робіт «Комплексне оцінювання радіоекологічних наслідків життєдіяльності населення під час пожеж у лісах, забруднених технологічними радіонуклідами» (державний реєстраційний номер 0113U004502, Інститут державного управління у сфері цивільного захисту (далі – ІДУЦЗ)) (автор – відповідальний виконавець), «Дослідження техногенно-екологічних наслідків Чорнобильської катастрофи на сучасному етапі» (державний реєстраційний номер 0115U000337, ІДУЦЗ) (автор – науковий керівник) та «Методичних рекомендацій щодо забезпечення радіаційного захисту особового складу підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж у зоні відчуження Чорнобильської АЕС» (державний реєстраційний номер 0116U003794, Український науково-дослідний інститут цивільного захисту) (автор – виконавець).

Тему дисертаційного дослідження затверджено на засіданні Вченої ради ІДУЦЗ 26 травня 2015 року (протокол № 5).

**Мета і завдання дослідження.** *Метою* дисертаційного дослідження є розкриття особливостей та закономірностей впливу техноприродних загроз від РНО і явищ на рівень екологічної безпеки ЧЗВ як підгрунтя розвитку наукових основ удосконалення систем її екологічного моніторингу і менеджменту. У відповідності з цією метою необхідно вирішити наступні наукові *завдання*:

- 1) проаналізувати еколого-радіаційний стан ЧЗВ та загрози його погіршення;
- 2) обґрунтувати науково-методичні засади проведення досліджень;
- 3) провести моделювання екологічних небезпек від РНО (ОУ, СВЯП-1) і явищ (лісових пожеж на територіях, що зазнали радіаційного забруднення внаслідок аварії на ЧАЕС);
- 4) провести оцінювання радіаційних небезпек ОУ та їх екологічних наслідків;
- 5) провести оцінювання радіаційних небезпек СВЯП-1 та їх екологічних наслідків;
- 6) удосконалити систему поводження з радіоактивними відходами;
- 7) провести оцінювання радіаційних небезпек лісових пожеж та їх екологічних наслідків;
- 8) удосконалити системи моніторингу і менеджменту еколого-радіаційних небезпек ЧЗВ.

*Об'єкт дослідження* – еколого-небезпечні процеси і явища в навколишньому середовищі ЧЗВ.

*Предмет дослідження* – техноприродні загрози від РНО і явищ.

**Основні методи досліджень.** Для досягнення мети та розв'язання поставлених завдань використано загальнонаукові, експериментальні та інструментальні методи досліджень.

Основу загальнонаукових методів складають логічний аналіз і синтез, порівняння й аналогія, абстрагування та узагальнення інформації під час опрацюванні літературних і електронних джерел. Кількісний, якісний й індексний методи – для аналізу пожежного ризику та аналізу безпеки РНО. Метод механіки суцільного середовища – для побудови фізико-математичної моделі лісової пожежі. Метод чисельного моделювання – для ефективного способу дослідження димової хмари. Метод математичного моделювання (струмінно-дифузійна модель, метод віртуального джерела та модель Гаусса) – для моделювання переміщення і розповсюдження димової хмари. Системний аналіз – для дослідження процесу поводження з РАВ. Ризик-орієнтований підхід (метод FRAME) – для визначення радіаційного ризику.

Під час проведення натуральних (польових) і лабораторних експериментів застосовували метод «конверта» для відбору проб ґрунту, спектрометричний, іонізаційний і напівпровідниковий метод реєстрації радіоактивних випромінювань, стандартну радіохімічну методику для визначення рівня активності радіоактивних елементів у пробах, метод седиментографічного аналізу – для виділення золю з фракції.

Широко використовували інструментальні методи, тобто пакети прикладних програм для персонального обчислювального комплексу (далі –

ПОК). Для різноманітних математичних і технічних розрахунків – Mathcad. Для проведення теплофізичних розрахунків – ANSYS. Для гідроаеродинамічних розрахунків та моделювання розвитку пожежі в приміщеннях – FlowVision та FDS (Fire Dynamics Simulator). Для обробки отриманих даних – Microsoft Excel & Word 2016, Statistica 6.0. Обробку  $\gamma$ -спектра відібраних проб здійснювали за допомогою спеціальної програми ПОК DEC-Professional-380. Також використовувалися різноманітні інформаційні бази даних.

**Наукова новизна отриманих результатів.** В дисертації розв'язується важлива науково-прикладна проблема комплексного аналізу і оцінки впливу техноприродних загроз на рівень екологічної безпеки ЧЗВ, вирішення якої дасть змогу підвищити ефективність системи екологічного управління зазначеної території. Наукову новизну визначають такі теоретичні та експериментальні результати досліджень:

*вперше*

- розроблено методологічні засади наукового обґрунтування рівня екологічної небезпеки ОУ, що надало змогу прогнозувати ступінь впливу небезпечних радіаційних подій на довкілля;

- проведено моделювання небезпечних процесів і комплексне оцінювання можливих техногенно-радіаційних небезпек СВЯП мокрого типу, що дозволило робити прогноз впливу негативних чинників на навколишнє середовище у разі виникнення аварій та аварійних ситуацій на об'єкті;

- науково обґрунтовано доцільність застосування методології прикладного системного аналізу (системно-структурної парадигми) для дослідження процесу поведінки з РАВ, що надало змогу розуміти цей процес як систему зі статичними і динамічними властивостями та враховувати її в загальній системі комплексної екологічної безпеки;

- на основі проведених експериментальних досліджень в натуральних (польових) умовах в ЧЗВ було вивчено закономірності поведінки лісових горючих матеріалів (далі – ЛГМ) та розповсюдження РПЗ під час вогневих випробувань, що дало можливість провести тестування моделей процесів виникнення і розвитку лісової пожежі, міграції РПЗ в атмосферному повітрі та оцінки радіоекологічних наслідків;

*удосконалено*

- методичний підхід до аналізу радіаційного ризику та оцінки радіологічних наслідків під час гасіння пожежі на ОУ, засновану на математичному апараті для аналізу впливу різних чинників безпеки на персонал об'єкта і пожежно-рятувальних підрозділів, що дозволило розраховувати вплив РПЗ на довкілля;

- математичну модель чисельного моделювання викиду РПЗ, що дає змогу моделювати процес міграції та осадження радіоактивних частинок (на основі системи рівнянь мезомасштабної моделі в атмосферному пограничному шарі) та, в подальшому, прогнозувати шкідливий вплив на навколишнє середовище;

*набуло подальшого розвитку*

- концепція побудови технічної системи екологічного моніторингу ЧЗВ на основі надвисокочастотного (далі – НВЧ) радіометра, що зможе забезпечити раннє виявлення небезпечних подій і ситуацій на території, що контролюється, та

вчасно проводити превентивні заходи;

- напями вдосконалення мобільної лабораторії комплексної оцінки та прогнозування надзвичайних ситуацій для забезпечення оперативного контролю радіаційного стану навколо РНО в аварійних і післяаварійних ситуаціях;

- концептуальні основи системи менеджменту еколого-радіаційних небезпек ЧЗВ, що дає змогу забезпечити інформаційно-технічну підтримку ступеня обґрунтованості прийняття управлінських рішень в критичних ситуаціях.

**Практичне значення здобутих результатів** полягає у впровадженні результатів і положень дисертації в системи моніторингу і менеджменту стану екологічної безпеки ЧЗВ. До результатів, здобутих у дисертаційній роботі, що мають практичну цінність, належать наступні положення:

- 1) практична реалізація розроблених методик моделювання розповсюдження РПЗ і разом з ним дефляції летких радіоактивних частинок техногенних радіонуклідів під час лісових пожеж на забруднених радіоактивними речовинами територіях та аварій і аварійних ситуаціях на РНО у відповідному програмному середовищі персонального обчислювального комплексу (далі – ПОК) забезпечить вчасне прогнозування еколого-радіаційних наслідків у навколишньому середовищі;

- 2) практичне використання методики оцінки радіаційного ризику пожежних і рятувальників під час гасіння лісових пожеж і пожеж на РНО ЧЗВ забезпечить проведення постійного і якісного контролю внутрішнього і зовнішнього опромінення зазначеної категорії осіб;

- 3) практичне застосування методики оцінки радіаційного ризику і дозових навантажень для населення під час лісових пожеж з радіаційно небезпечним фактором та аварій на РНО забезпечить вчасне прийняття контрмір із захисту здоров'я мешканців територій, що піддались впливу РПЗ або шкідливих речовин;

- 4) практичне впровадження прикладного системного аналізу в процес поводження з РАВ значно покращить загальну систему комплексної екологічної безпеки ЧЗВ;

- 5) побудова та експлуатація технічної системи екологічного моніторингу ЧЗВ на основі НВЧ радіометра зможе забезпечити раннє виявлення небезпечних подій і ситуацій на території, що контролюється, та вчасне проведення превентивних заходів;

- 6) практична реалізація концепції мобільної лабораторії комплексної оцінки та прогнозування надзвичайних ситуацій дозволить забезпечити оперативний контроль радіаційного стану навколо РНО в аварійних і післяаварійних ситуаціях;

- 7) впровадження в практичну діяльність концептуальних основ системи менеджменту еколого-радіаційних небезпек ЧЗВ дасть можливість забезпечити інформаційно-технічну підтримку ступеня обґрунтованості прийняття управлінських рішень в критичних ситуаціях.

За безпосередньою участю автора окремі результати дисертаційної роботи впроваджено в діяльність Державної служби України з надзвичайних ситуацій, Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника, Головного управління ДСНС України у Київській області (по зоні відчуження та зоні безумовного (обов'язкового) відселення), Державної екологічної академії

післядипломної освіти та управління, Національного університету цивільного захисту України, Інституту державного управління у сфері цивільного захисту. Також мають впровадження науково-дослідні роботи, що зазначені вище.

**Особистий внесок здобувача.** В дисертаційній роботі узагальнено результати досліджень за період з 2011 по 2019 роки, в яких автор брав безпосередню участь. Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Також особисто дисертанту належить обґрунтування теми дослідження, формулювання наукової проблеми, мети та завдань дослідження, обґрунтування положень наукової новизни, встановлення практичної значимості результатів, формування загальних висновків. Автором проведено аналіз і узагальнення інформації літературних і електронних джерел за темою дисертації, обґрунтовано методи дослідження, здійснено моделювання екологічних небезпек від РНО і явищ, проведено оцінювання радіаційних небезпек ОУ та СВЯП-1 та їх екологічних наслідків, радіаційних небезпек лісових пожеж та їх екологічних наслідків, удосконалено системи моніторингу і менеджменту еколого-радіаційних небезпек ЧЗВ.

В роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному: проведено аналіз і узагальнено інформацію літературних і електронних джерел щодо сучасного стану еколого-радіаційного забруднення лісів та території ЧЗВ, структури земель та розподілу радіонуклідів у ґрунтах соснових лісів [25, 26, 40, 41, 48, 49, 63, 75]; сформовано і розглянуто проблеми техногенної безпеки в процесі зняття ЧАЕС з експлуатації [60]; проаналізовано характеристики пожеж на ОУ та узагальнено дані щодо пожежної навантаги і рівня пожежовибухонебезпеки приміщень [27, 28, 61]; сформульовано проблему та запропоновано шляхи її вирішення [4]; проведено аналіз статистичних та динамічних даних лісових пожеж [25, 26, 62, 70, 71]; проаналізовано методики дослідження впливу РНО ЧЗВ на довкілля, розроблено математичний апарат, алгоритм аналізу й оцінювання рівня потенційної небезпеки СВЯП-1, систему аварійного керування під час аварії на СВЯП-1, матрицю прийняття рішень на основі оцінок експертів [20, 27, 28, 51]; розроблено методику дослідження лісових пожеж у ЧЗВ та екологічних наслідків від них, схеми джерел надходження РПЗ у довкілля [25, 26, 43]; проведено аналіз загальних характеристик моделей техноприродних небезпек [35, 54, 56, 73]; запропоновано математичну модель та візуалізовано викид у повітря радіонуклідів під час пожежі на ОУ, розроблено схему організації розрахунків характеристик забруднення повітря і ґрунту під час аварійного викиду РПЗ і пилу [27, 28]; розроблено математичний апарат моделі процесу тепломасообміну в СВЯП-1, сформульовано висновки [18]; розроблено математичний апарат і реалізовано моделювання важкої аварії в БВ СВЯП, сформульовано висновки [16]; удосконалено математичну модель викиду РПЗ із зони лісової пожежі, сформульовано висновки [2, 3, 25, 26, 32, 34, 39, 42]; розроблено схему надходження РПЗ в організм людини, розраховано значення максимальних індивідуальних доз та максимального індивідуального ризику для персоналу [27, 28]; розроблено схему методики аналізу ризику та управління ризиком з оцінки збитків під час аварій на РНО, проаналізовано випадки пожеж, що відбулися в ОУ, запропоновано структуру узагальненої дозиметричної моделі



людини, проведено розрахунок сумарних дозових коефіцієнтів від інгаляційного надходження в організм людини, середньозважених параметрів частинок РПЗ, потужності ефективних інгаляційних доз, значень індивідуального і колективного радіаційних ризиків для пожежних [6, 27, 28]; запропоновано критерії оцінки безпеки ОУ в процесі перетворення на ЕБС [21]; розроблено математичний апарат та методологію математичного моделювання, побудовано схему зміни технічного стану складного комплексу НБК–ОУ [64]; сформульовано завдання, розроблено основу математичного апарата, проведено основні розрахунки, побудовано основні графіки і схеми, сформульовано висновки [15, 17, 19, 22, 23, 24, 55, 57]; проведено досліджень лісових пожеж у натуральних (польових) умовах, здійснено експериментальні лабораторні дослідження, проведено відповідні розрахунки, побудовано графіки і схеми, здійснено порівняння отриманих даних, сформульовано висновки [25, 26, 47]; оцінено радіаційний ризик під час гасінні пожежі, побудовано графіки і схеми, сформульовано висновки [5, 6, 8, 14, 25, 26, 68]; оцінено еколого-радіаційну ситуацію після лісової пожежі та радіаційний ризик, побудовано графіки і схеми, сформульовано висновки [10, 11, 12, 25, 26, 29]; оцінено дозову навантагу для населення під час лісових пожеж з радіаційно небезпечним фактором, побудовано графіки і схеми, сформульовано висновки [25, 26, 36, 65, 66]; запропоновано систему моніторингу за лісопожежною ситуацією у ЧЗВ на основі НВЧ радіометра, складено схеми основних блоків системи, проведено розрахунок основних параметрів, сформульовано висновки [25, 26, 27, 28, 45, 71]; розроблено концепцію мобільної лабораторії комплексної оцінки та прогнозування надзвичайних ситуацій зони еколого-радіаційної небезпеки, оптимізовано комплектацію мобільного лабораторного комплексу (далі – МЛК) приладним обладнанням, запропоновано використання безпілотного літального апарату (далі – БПЛА) як складову частину системи МЛК, сформульовано основні переваги МЛК [1, 7, 13, 27, 28, 30, 31, 33, 35, 46, 50, 67, 74]; запропоновано структурну схему контролю і керування важкими радіаційними аваріями, розроблено математичного апарат, проведено розрахунки, побудовано відповідні графіки [58, 59].

В дисертації також було використано результати спільних праць по СВЯП-1 з кандидатом технічних наук Задунаєм О.С. (науковий консультант автора є його науковим керівником), тема дисертаційної роботи – «Наукові засади підвищення ефективності забезпечення екологічної безпеки мокрих сховищ відпрацьованого ядерного пального» ([https://dea.edu.ua/img/source/Diser/%D0%94%D0%B8%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F\\_%D0%97%D0%B0%D0%B4%D1%83%D0%BD%D0%B0%D0%B9.pdf](https://dea.edu.ua/img/source/Diser/%D0%94%D0%B8%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%97%D0%B0%D0%B4%D1%83%D0%BD%D0%B0%D0%B9.pdf)).

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дослідження доповідалися, обговорювалися та отримали схвальну оцінку на 25 міжнародних, всеукраїнських та галузевих наукових конгресах, конференціях і семінарах, а саме: Міжнародній конференції «Двадцять п'ять років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього» (Київ, 2011); II Міжнародній науково-практичній конференції «Техногенна безпека: теорія, практика, інновації» (Львів, 2011); Щорічних наукових конференціях Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 2011, 2015, 2016); XI науково-практичній конференції

«Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій» (Харків, 2012); Науково-практичних конференціях з міжнародною участю «Радіоекологія» (Київ, 2013, 2014, 2015); XV Міжнародній науково-практичній конференції «Ідеї академіка В.І. Вернадського та проблеми сталого розвитку регіонів» (Кременчук, 2013); Міжнародних науково-практичних інтернет-конференціях «Екологія і природокористування в системі оптимізації відносин природи і суспільства» (Тернопіль, 2015, 2016); Всеукраїнських науково-практичних конференціях «Екологічна безпека держави» (Київ, 2015, 2017); Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи» (Львів, 2015); Всеукраїнському з'їзді екологів з міжнародною участю (Вінниця, 2015); Міжнародному конгресі «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (Львів, 2016); XI Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми екологічної безпеки» (Кременчук, 2016, 2017); Науково-практичному семінарі «Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація» (Харків, 2018); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Пожежна безпека: проблеми та перспективи» (Харків, 2018); IV Всеукраїнській заочній науково-практичній конференції «Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності» (Київ, 2018); III Міжнародних конференціях «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища» (Славутич, 2018, 2019); XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення» (Харків, 2018); I Всеукраїнській науковій конференції «Актуальні питання техногенної та цивільної безпеки України» (Миколаїв, 2018).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 75 наукових праць. З них основні положення та важливіші результати дисертації опубліковано в 21 статті, включених до Переліку наукових фахових видань України [1–21], 3 статтях у наукових періодичних виданнях інших держав [22–24], 4 колективних монографіях [25–28], 3 публікаціях в інших наукових виданнях [29–31] та 33 тезах доповідей на наукових конгресах, конференціях і семінарах [32–64]. Додатково наукові результати дисертації відображено у 12 публікаціях [65–75].

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертація складається з анотації, переліку умовних скорочень, вступу, семи розділів (що містять 58 таблиць та 91 рисунок) зі списками використаних джерел (всього 319 найменувань), загальних висновків та 14 додатків. Загальний обсяг дисертації – 470 сторінок, з них 339 сторінок основного тексту.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету та завдання дослідження, перелічено основні методи досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації, публікації, обсяг і структуру дисертації.

У першому розділі проаналізовано еколого-радіаційний стан Чорнобильської зони відчуження та загроз його погіршення.

Після катастрофи на ЧАЕС у 1986 році площа радіоактивного забруднення склала 53,5 тис. км<sup>2</sup> (9% всієї території України), що охоплює 73 райони у 12 областях. На цій території розміщено 2293 населених пунктів, в яких проживає 2 315 900 людей (5% населення країни), в тому числі 499 500 дітей. Хвойні посадки займають 42% загальної площі, зокрема соснові – 33%. Частина твердолистяних насаджень становить 40%, зокрема дуби і вільха – 32%. Запас деревини в лісах оцінюється в 1,8 млрд кубометрів. Найбільші площі лісів, забруднених радіоактивними продуктами Чорнобильської аварії, знаходяться в Житомирській (974,3 тис. га), Рівненській (728,8 тис. га), Чернігівській (725,5 тис. га) та Київській (416,4 тис. га) областях. У Черкаській, Вінницькій, Волинській, Сумській та Хмельницькій областях площа лісів, забруднених <sup>137</sup>Cs, становила (10–20)% від загальної площі лісового фону.

На територію 30-и кілометрової зони ЧАЕС у вигляді радіоактивних опадів випало, приблизно  $5 \cdot 10^{15}$  Бк, з них  $3 \cdot 10^{13}$  Бк припадає на трансуранові елементи (далі – ТУЕ). Найбільша густина забруднення ґрунту для <sup>137</sup>Cs сягає понад  $8 \cdot 10^{12}$  Бк/км<sup>2</sup>, для <sup>90</sup>Sr –  $7 \cdot 10^{12}$  Бк/км<sup>2</sup>, плутонію –  $3 \cdot 10^{10}$  Бк/км<sup>2</sup>.

Інтенсивність міграційних процесів радіонуклідів у лісних масивах визначається комплексом біоценотичних та біогеохімічних факторів, таких як процес сорбції і десорбції, переміщення з поверхневим і внутрішньогрунтовим складом, біогенне перемішування, вплив складу рослинності, а також дифузія, дефляція та конвективний перенос.

Аналіз розподілу радіонуклідів за профілем ґрунтів у сухих та свіжих лісорослинних умовах показав, що їх вміст у поверхневому горизонті лісової підстилки (AoL) незначний: запас <sup>137</sup>Cs становить біля 1% <sup>90</sup>Sr – 0,4, <sup>239+240</sup>Pu – 0,8 від загального складу в ґрунті. Основна частина ізотопів плутонію утримується ферментативним і гумусовим шарами підстилки. Їх наявність у листовому горизонті (AoL) обумовлена опаданням мертвої кори, якою вони адсорбувались. В цілому, у підстилці соснових насаджень знаходиться (50–90)% сумарного запасу радіоцезію, (40–75)% радіостронцію і до 99% ізотопів плутонію.

Залишаються актуальними питання техногенної безпеки в процесі зняття ЧАЕС з експлуатації. У зв'язку із завершенням терміну експлуатації ЧАЕС в результаті надзвичайних ситуацій техногенного характеру утворюється велика кількість графітових РАВ. Саме реакторний графіт становить більшу частину накопичених твердих РАВ. Маса графітової кладки одного реактора, в залежності від його типу, становить 1,5–2,5 тис. т. Звідси можна зробити висновок, що загальна маса опроміненого графіту з 3-х блоків приблизно дорівнює 7,5 тис. т.

ОУ – це складна технічна споруда, що локалізує значну кількість радіоактивних речовин, які вийшли з-під контролю внаслідок аварії на 4-му блоці ЧАЕС у 1986 році. Його слід розглядати як особливу систему, що має кілька джерел небезпеки – ядерної, радіаційної, пожежної, загальнотехнічної, але включає в себе лише один захисний бар'єр – зовнішнє покриття (оболонку) без будь-яких внутрішніх інженерних протипожежних перешкод або розривів. Аналогів цієї споруди немає ніде у світі і вона не відповідає міжнародним

вимогам щодо ядерної, радіаційної та загальнотехнічної безпеки. Зовнішні захисні конструкції унеможливають вихід лише радіоактивних хімічних елементів, викид яких із зони реактора стався під час аварії. Загальна радіоактивність цих елементів становить більше 2,5 МКі, в тому числі ізотопів  $^{137}\text{Cs}$  – 1,3 МКі та  $^{90}\text{Sr}$  – 0,7 МКі. Наявне значне пожежне навантаження (майже 2000 т горючих матеріалів). Протягом 1986–2016 років на об'єкті сталося сім пожеж. Найбільш небезпечними з них були пожежі в приміщеннях 402/3; 403/3-4 і 805/3.

Актуальним є питання поводження з РАВ у ЧЗВ. В процесі зняття з експлуатації ЧАЕС в ході поточної підготовчої стадії споруджуються і вводяться в експлуатацію об'єкти для поводження з РАВ, накопичених на ЧАЕС і утворення яких очікується під час зняття станції з експлуатації. Приблизно 2,5 тис. т відпрацьованого ядерного палива (далі – ВЯП) утворилось в ході експлуатації реакторів РВПК-1000. В ОУ і на його проммайданчику зосереджено від  $4,0 \cdot 10^5$  до  $1,74 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup> РАВ. Станом на 2016 р. загальна кількість РАВ у ЧЗВ (без ОУ) складає близько 2,8 млн м<sup>3</sup>. З них в пунктах захоронення РАВ та пунктах тимчасової локалізації РАВ знаходяться понад 2,0 млн м<sup>3</sup> РАВ із загальною активністю близько  $7,4 \cdot 10^{15}$  Бк. Загальна активність радіоактивних речовин в природних об'єктах ЧЗВ (у поверхневому шарі ґрунту, донних відкладах водойм, рослинності тощо) становить понад  $8,5 \cdot 10^{15}$  Бк. Загальний обсяг радіоактивно забруднених матеріалів, зосереджених в ЧЗВ, сягає 11 млн м<sup>3</sup>.

Аварії на СВЯП, розташованих на території АЕС, є малоймовірними, але цілком можливими подіями. Про це свідчить світовий досвід, зокрема: короточасна (близько доби) втрата охолодження басейнів з ВЯП на підприємстві з переробки палива в Селлафілді (Великобританія), а також тривала втрата охолодження приреакторних басейнів на енергоблоках АЕС «Фукусіма-1». Лісові пожежі негативно впливають на екологічні системи. Підраховано, що в середньому за рік в Україні виникає близько 3,5 тис. лісових пожеж, якими знищується більше 5 тис. га лісу. За минулі роки після Чорнобильської катастрофи у ЧЗВ виникло більше 40 великомасштабних лісових пожеж, а площа лісових масивів, що пройдена пожежею, перевищила 15 тис. га. Найбільша кількість лісових пожеж (65%) стається весною, 25% – восени і 10% – літом. Середні значення розподілу лісових пожеж складають: низові – 55%, верхові – 30%, перехідні і підземні – 15%. Основними причинами виникнення пожеж на території ЧЗВ є навмисний підпал (47%) і необережне поводження з вогнем (26%). Кількість лісових пожеж на забруднених  $^{137}\text{Cs}$  територіях з рівнем радіоактивного забруднення менше 5 Кі/км<sup>2</sup> склала 68%, від 15 до 40 Кі/км<sup>2</sup> – 23%, а останні на території з рівнем радіоактивного забруднення більше 100 Кі/км<sup>2</sup>.

У другому розділі обґрунтовано науково-методичні засади проведення досліджень. Проаналізовано різні математичні моделі прогнозування екологічних наслідків атмосферного забруднення навколишнього середовища в процесі розвитку аварії на вибухопожежонебезпечних об'єктах, що можна використати для дослідження впливу РНО і явищ ЧЗВ на довкілля.

ОУ може розглядатися як система, що містить джерела ядерної, радіаційної

і загальнотехнічної небезпеки. Зовнішнє укриття (оболонка), що має один захисний бар'єр, не має внутрішніх протипожежних перешкод, протипожежних розривів і вогнеперешкоджувальних бар'єрів. Дослідження і досвід роботи на ОУ вказують на те, що в даний час в реальному стані його ПММ підкритичні.

Для математичного моделювання температурного режиму, напрямку розвитку і тривалості пожежі в приміщенні ОУ використовувались рівняння матеріального балансу, стану навколишнього середовища, кисневого балансу, швидкості вигорання горючих матеріалів в осередку пожежі, утворення продуктів згоряння, максимальної швидкості виділення тепла. Розглядалися об'ємні і локальні пожежі. Оцінки показують, що можливі об'ємні пожежі в ОУ необхідно відносити до категорії пожеж, регульованих вентиляцією. Характеристики таких пожеж можуть бути оцінені за формулами середньооб'ємної максимальної температури газів у приміщенні, еквівалентного діаметру осередку (факела) пожежі, висоти, на якій температура газів у полум'ї досягає максимального значення, висоти факелу полум'я, швидкості вигорання пожежної навантаги, тривалості пожежі, швидкості газів у полум'ї по осі факелу на висоті тощо.

Основною метою забезпечення безпеки СВЯП – є запобігання неконтрольованого розвитку ядерних реакцій і поширення радіації на довкілля. Ідентифікація джерел небезпеки – первинне (початкове) визначення ступеня небезпеки СВЯП-1 ґрунтується на аналізі можливих видів шкоди, що завдається техносфері, людині і довкіллю, та виділення пріоритетних для проведення подальшого аналізу джерел техногенної небезпеки.

Оперативне керування експлуатаційною безпекою СВЯП-1 доцільно орієнтувати на результати аналізу порушень. Аналіз і оцінка рівня потенційної небезпеки СВЯП-1 є тим методичним інструментом за допомогою якого потенційну небезпеку може бути оцінено кількісно. Імовірнісний аналіз безпеки (далі – ІАБ) є основним методом кількісних розрахунків ризику. Для досліджень ІАБ мають значення наступні показники безпеки СВЯП-1: частота тяжкої аварії, імовірність тяжкої аварії, умовна частота тяжких аварій, умовна ймовірність важких аварій, параметр важливості події.

Сутність математичного моделювання аварійних процесів полягає в переході від досліджуваного об'єкта до його математичної моделі та подальшому дослідженні моделі в рамках обчислювального експерименту за допомогою програмно-реалізованих обчислювально-логічних алгоритмів. Для цього будується логічна схема розвитку аварії. За логічною схемою виписується логічна функція, аргументами якої є події, присутні в логічній схемі (рис. 1).

Процес підтримки прийняття рішень з попередження аварій і мінімізації екологічних наслідків варто розділити на три основні етапи (рис. 2): 1) формування груп експертів (спеціалістів), компетентних в предметній області; 2) групова побудова бази знань предметної області базуючись як на об'єктивній, так і на експертній інформації; 3) формування рекомендацій для особи, що приймає рішення на основі даних побудованої бази знань.

Для розуміння процесу формування зон забруднення РПЗ і доз радіоактивного опромінення людей, що мешкають в зоні дії РПЗ, та оцінки радіоекологічних наслідків під час лісових пожеж в ЧЗВ необхідно розробити

математичні моделі: лісової пожежі, утворення радіоактивної димової хмари, викидів РПЗ із зони лісової пожежі в навколишнє середовище, розрахунку дозових навантажень і радіаційних ризиків для населення.

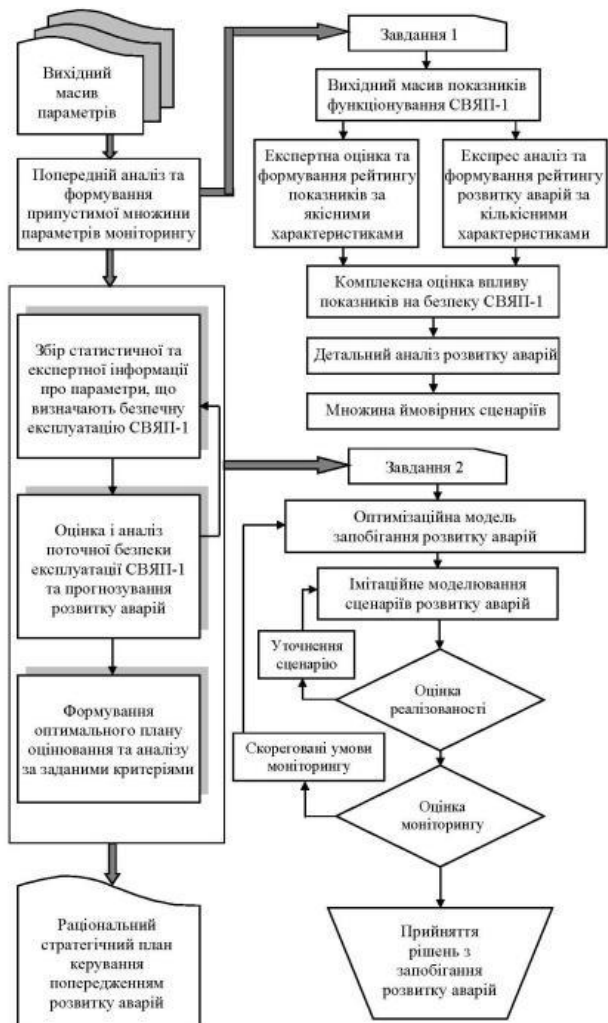


Рис. 1. Алгоритм аналізу та оцінювання рівня потенційної небезпеки СВЯП-1

Найбільш доступний й ефективний спосіб дослідження «димової хмари» – методі чисельного моделювання з використанням чисельних моделей, що достатньо адекватно описують динаміку її утворення. Для відтворення локальних атмосферних процесів на обмеженій території використовувалась базова система рівнянь мезомасштабній моделі в атмосферному пограничному шарі.

Польові роботи включали аналіз проб атмосферного повітря, відбір поверхневих пошарових проб ґрунту, проб рослинності, маркування і доставку проб до місця проведення аналізів. Натуральні дослідження виконувались за середньомасштабними топографічними та ландшафтно-ґрунтовими картами, що дозволили детально вивчити рельєф, ступінь розвитку рослинності, тип ґрунту та радіоактивні забруднення лісових масивів. Під час лісової пожежі проводився забір проб атмосферного повітря на шлейфі димової хмари за стандартною методикою за допомогою марлевих планшетів, розташованих на горизонтально рівній відкритій місцевості, а також експериментальне дослідження концентрації аерозолів та зважених частинок диму за допомогою блоків детектування БДАС-03П фірми «Ізотоп». Після чого було виконано аналіз композиції радіонуклідів та

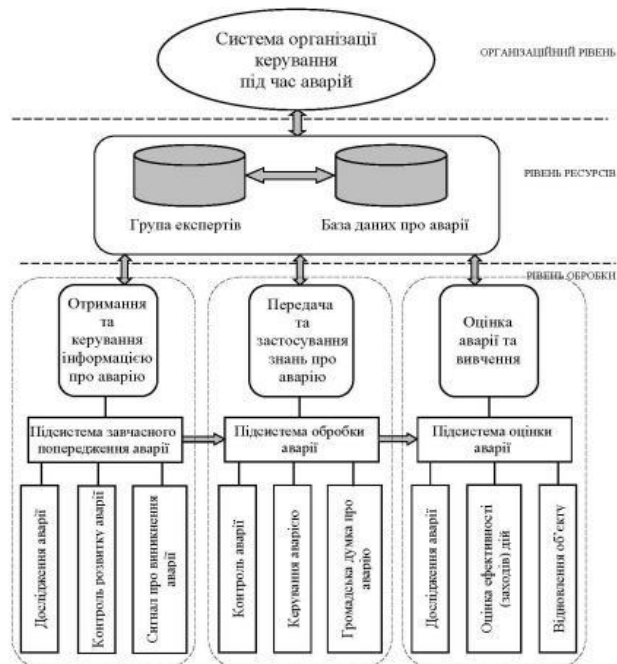


Рис. 2. Структурна схема системи аварійного керування під час аварії на СВЯП-1

В процесі лісових пожеж і горіння ЛГМ, забруднених радіонуклідами, в атмосферу може бути викинуто десятки тон РПЗ. Тривалість життя радіоактивної димової хмари у нижній тропосфері (до 1,5 км) менше тижня, у верхній тропосфері – місяць, у стратосфері – 1–3 роки.

вимірювання об'єму активного та дисперсного складу аерозолі. Виміри питомої активності  $^{137}\text{Cs}$  проводилися з використанням  $\gamma$ -детектора фірми ORTEC з надчистого германію, ефективність якого становила 40%, а розподільна здатність 1,95 кеВ за  $E=1,33 \text{ MeV } ^{60}\text{Co}$ .

Активність  $^{90}\text{Sr}$  та ТУЕ ( $^{238-240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) у пробах визначали за стандартною радіохімічною методикою. Активність екстрагованого  $^{90}\text{Sr}$  вимірювали шляхом радіометрії його дочірнього радіонукліду  $^{90}\text{Y}$  з використанням  $\alpha$ - та  $\beta$ -радіометра "CANBERRA-2400". Відносна похибка вимірювання змінювалась у межах (10–20)% для  $^{137}\text{Cs}$ , (25–30)% для  $^{90}\text{Se}$ , (40–59)% для ТУЕ, залежно від вмісту радіонуклідів у зразках. На радіохімічний аналіз відбирались 2 проби, що мали радіонуклідний склад, близький до середнього з 5-ти вимірювань, які додатково досліджувалися на  $\gamma$ -спектрометрі з обертанням зразка під час експозиції. Для контролю концентрації радіоактивних речовин у відхідних газах використовувалися вітчизняні газоаналізатори: для газу СО-ГМК-3 (діапазон вимірювань (0–400) мг/м<sup>3</sup>, похибка вимірювань  $\pm 10\%$ ), для речовин  $\text{C}_6\text{H}_8$  і  $\text{C}_6\text{H}_6$  – Гамма-М (діапазон вимірювань (0–12) мг/м<sup>3</sup>, похибка вимірювання  $\pm 20\%$ ), а для інших – індикаторні трубки.

В продуктах згоряння були ідентифіковані наступні радіоізотопи: стронцій ( $^{90}\text{Sr}$ ), цезій ( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) і ТУЕ. Оцінка активності РПЗ в натуральних і лабораторних умовах проводилася гамма-спектрометром і по  $\gamma$ -випромінюванню волокнистих фільтрів, що містять активоване вугілля. У табл. 1 представлено порівняння результатів аналізу проб різними методами.

Таблиця 1

Порівняння результатів аналізу проб радіохімічним і бета-спектрометричним методами

Метод аналізу	Активність $^{90}\text{Sr}$ , Бк/проба	Середньоквадратична похибка		
		$\sigma_A$	$\sigma_B$	$\sigma_V$
Радіохімія	0,26±0,20	10,8	12,6	7,5
Бета-спектрометрія	0,89±0,12	15,1	14,7	6,2

Примітка. Наведено середній результат з 5-ти вимірювань, довірчий інтервал вказаний для  $P=0,95$ , причому:  $\sigma_A$  – похибка під час відбирання проби;  $\sigma_B$  – похибка під час проведення хімічних операцій;  $\sigma_V$  – похибка під час вимірювання.

Для оцінки впливу радіаційних факторів під час лісових пожеж на організм людини використовувалися модель інгаляційного надходження радіоактивних речовин.

У **третьому розділі** проведено моделювання екологічних небезпек від РНО і явищ.

Загальна характеристика моделей техноприродних небезпек показала, що для опису такого складного процесу як міграція РПЗ можна застосувати різні динамічні моделі. Однак, для розрахунку швидкопротікаючих процесів викидів РПЗ з декількох осередків загоряння необхідно використати розрахункові методи, більш вдосконалені у фізичному відношенні і прості в математичному.

Для обрання методики, що найкраще підходить для оцінки радіаційного ризику, необхідно врахувати наступні характеристики: нерівномірний розподіл ризику по території, яка підпадає під радіоактивний вплив забруднення довкілля,

специфіка РНО і місцевого населення, що підпадає під негативний вплив радіації, отримання достовірних статистичних даних про радіоактивне забруднення територій, необхідних для розрахунку моделей, визначення вихідних умов для створення моделі «радіаційна доза – відгук» отриманих на основі результатів біотестування, що відображає характер негативного впливу радіоактивних речовин на людину. Аналіз можливих сценаріїв аварій на ОУ показав, що у бувшій центральній залі (далі – ЦЗ) можливі локальна, місцева і об'ємна пожежі. У табл. 2 наведено параметри можливих пожеж у бувшому ЦЗ 4-го блоку ЧАЕС.

Таблиця 2

Параметри можливих пожеж у бувшому ЦЗ 4-го блоку ЧАЕС

Категорія пожежі	Причина пожежі	$P$ , рік <sup>-1</sup>	$N$ , кВт	$T_c$ , К	$F_{П}$ , м <sup>2</sup>	$d_{П}$ , м	$h_{П}$ , м	$r_{Г.М}$ , г/с	$t_{П}$ , год	$H_{Д}$ , м	$V_{Г}^P$ , м/с
Локальна	Займання	$2 \cdot 10^{-2}$	800	1273	<50	10,2	19	4,1	<1,0	100	0,09
Місцева	Обвалення буд- конструкцій із займанням	$4 \cdot 10^{-4}$	900	1373	>50	19,8	22	4,8	>1,5	150	0,65
Об'ємна	Займання з руйнуванням покрівлі	$2 \cdot 10^{-2}$	2000	2073	~100	25,3	40	5,4	~4–6	300	1,12

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

На рис. 3 наведено розраховані значення густини випадіння РПЗ на ґрунт на віддалі 1,0 км від місця локальної пожежі на ОУ для частинок різних діаметрів. Блок-схема організації розрахунків характеристик забруднення довкілля під час аварійного викиду РПЗ і пилу наведена на рис. 4. Типове поведіння функції виснаження АТ з часом наведено на рис. 5. Повна функція виснаження утворюється перемноженням диференційних функцій виснаження за рахунок трьох процесів. Її вигляд показаний на рис. 6. Приземна об'ємна активність у повітрі змінюється з часом, відображаючи рух хмари. На деякій віддалі від джерела вона досягає максимуму, а потім знижується (рис. 7, 8).

Густину поверхневого забруднення одержали інтегруванням за часом загальної інтенсивності осідання домішки на поверхню землі (див. рис. 9, 10):

$$S(x, y) = \int_0^{\infty} C'_s(x, y, t) dt. \quad (1)$$

Моделювання тепломасообміну в СВЯП проводили за допомогою методів математичного моделювання. Основним параметром, що визначає працездатність СВЯП під час аварії, буде максимально припустима температура оболонки  $T_0^{np}$ , причому теплотехнічна надійність СВЯП забезпечується у разі виконанні умови:

$$f(t) = [T_0^{np} - T(t)_0^{\max}] > 0. \quad (2)$$

В перехідних режимах температура теплоносія може перевищувати, за певних умов, максимально граничну температуру  $T_0^{np}$ .



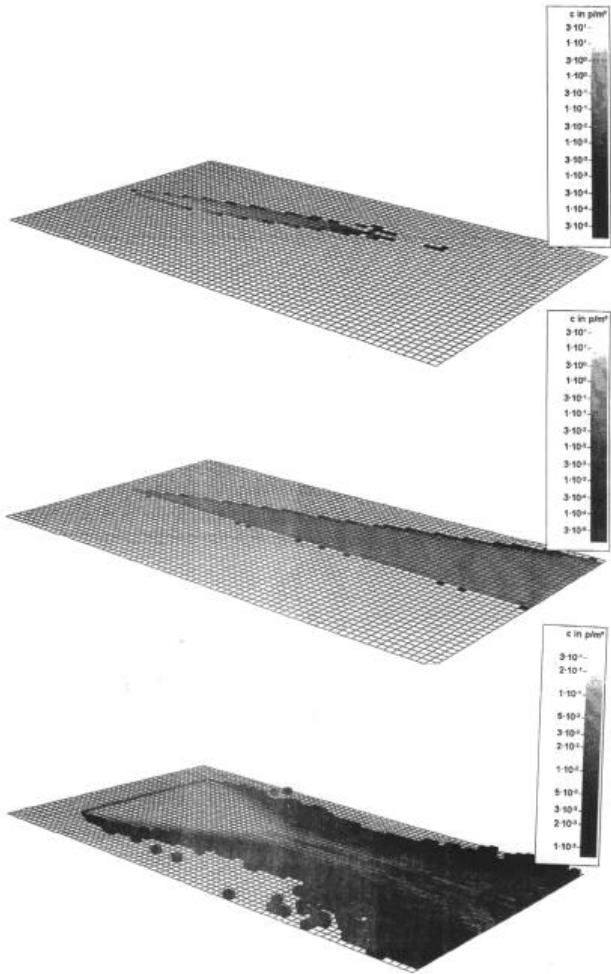


Рис. 3. Розраховані значення густини випадіння РПЗ під час локальної пожежі на ОУ

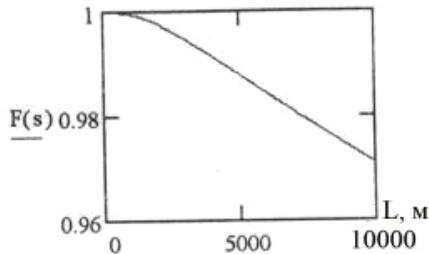


Рис. 6. Повна функція виснаження для висотної частини хмари викиду

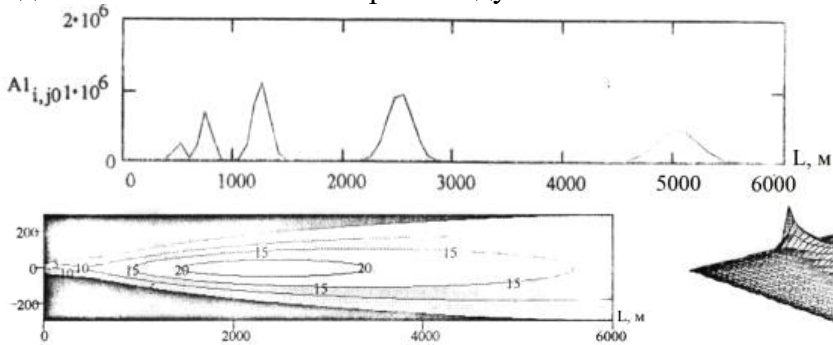


Рис. 9. Лінії рівнів щільності поверхневого забруднення (Бк/м²)

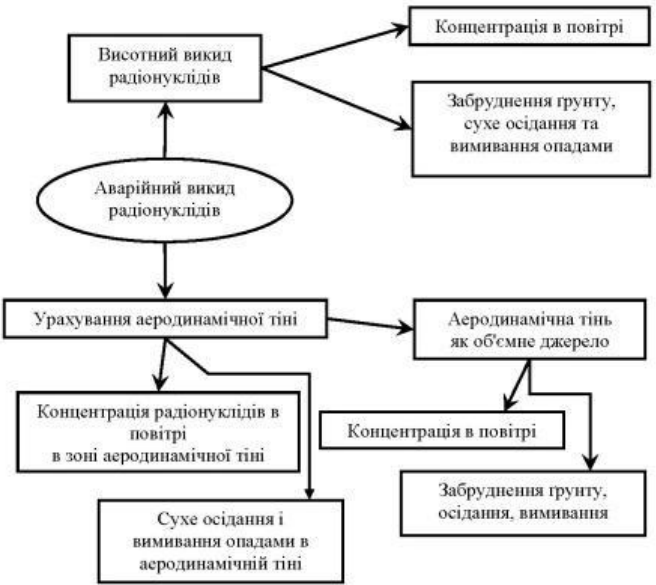


Рис. 4. Блок-схема організації розрахунків характеристик забруднення повітря і ґрунту під час аварійного викиду РПЗ і пилу

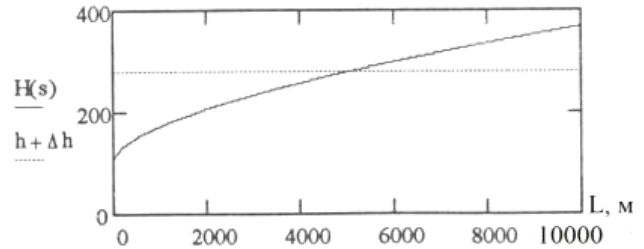


Рис. 5. Характерна залежність висоти хмари від відстані

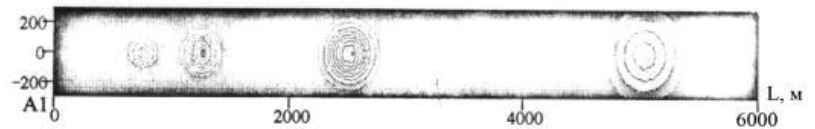


Рис. 7. Приземна концентрація, розрахована для моментів часу:  $t_1=120$  с,  $t_2=180$  с,  $t_3=300$  с,  $t_4=600$  с,  $t_5=1200$  с

Рис. 8. Приземна концентрація уздовж осової лінії сліду для моментів часу:  $t_1=120$  с,  $t_2=180$  с,  $t_3=300$  с,  $t_4=600$  с,  $t_5=1200$  с

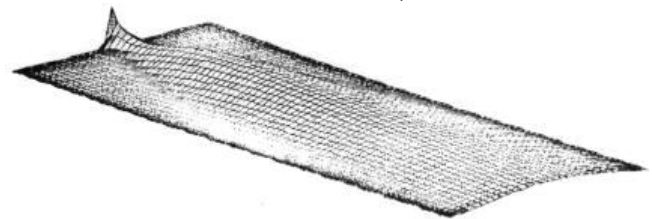


Рис. 10. Густина поверхневого забруднення (Бк/м²) зображена у вигляді поверхні

Аналіз запроектованих аварій зі зневодненням відсіків «мокрого» сховища виконаний на основі тривимірних моделей відсіку сховища з використанням сучасних програмних комплексів для виконання теплогідролічних розрахунків (ANSYS, СОКРАТ, VIBROS2.1, CILINDR-KOMPLE та ін.). Широкий набір теплогідролічних і фізико-хімічних моделей комплексу СОКРАТ дозволяє моделювати поведінку БВ під час важкої аварії з тривалим знеструмленням, що призводить до порушення охолодження БВ. Всі моделі ключових процесів верифіковані з використанням великої експериментальної бази, включаючи експерименти на інтегральних установках і експерименти за окремими явищами.

Реалізація умов вибухобезпеки водньоутримуючої пароповітряної суміші істотно залежить від сценаріїв розгерметизації контуру охолодження БВ і умов потрапляння джерел водню в приміщення СВЯП-1.

Моделювання викиду РПЗ із зони лісової пожежі проводили за розробленою інформаційною моделлю виникнення і розвитку лісової пожежі, в якій ліс розглядається як одношарове двофазне середовище, що складається з повітря і газоподібних продуктів піролізу під час горіння ЛГМ та їх твердих продуктів піролізу. У разі побудови фізико-математичної моделі двофазної гетерогенної суміші на основі методів механіки суцільного середовища така суміш представляється як двокомпонентний континуум з взаємопроникним рухом фаз та міжфазним обміном масою, імпульсом і енергією.

Результати числових експериментів доводять, що форма аерозольної хмари сильно залежить від співвідношення факторів адвекції та конвекції, які на різних стадіях розвитку обумовлювали різні ефекти. Наприклад, навіть помірний вітер на початковій фазі пожежі призводив до придушення конвективних рухів і хмара диму стелилася по землі. Площа горіння  $R_{\phi}$  мала вигляд круга радіусом 100 м в якому задавалась  $S_0=1$ ;  $T_0=340$  К. Розрахункова сітка бралась рівномірною по горизонталі та мала  $128 \times 128$  вузлів з  $\Delta x = \Delta y = 70$  м. По вертикалі сітка містила 100 рівнів, а верхня межа області задавалась на висоті 5 км. В якості ілюстрації на рис. 11 наведено результати порівняння даних, що отримано шляхом моделювання та експериментальних вимірювань концентрацій  $C$  у повітрі густини випадань на поверхню ґрунту  $P$  під час лісової пожежі в ЧЗВ.

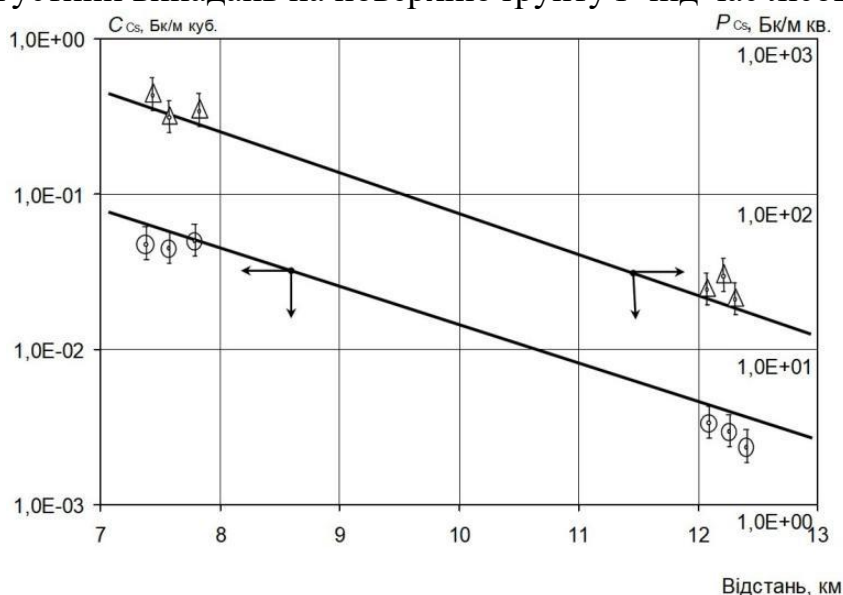


Рис. 11. Результати порівняння даних чисельного моделювання та експериментальних вимірювань концентрацій випадань радіоізотопу  $^{137}\text{Cs}$  під час низової лісової пожежі у ЧЗВ

У четвертому розділі проведено оцінювання радіаційних небезпек ОУ та їх екологічних наслідків. В процесі проведення кількісного аналізу безпеки ОУ необхідно оцінити повноту і достовірність вихідних даних, адекватність і точність використовуваних схем, обґрунтованість прийнятих припущень і залежність від них одержуваних рекомендацій і висновків. ОУ вважається безпечним, коли його радіаційний вплив на персонал, населення і навколишнє середовище в процесі нормальної експлуатації і під час проектних аварій не призводить до перевищення встановлених доз опромінення персоналу та населення і нормативів за викидами і скидами радіоактивної речовини в довкілля.

Розрахунок поширення радіоактивного диму в навколишньому середовищі проводили для помірно стійкого стану атмосфери (категорія погоди С за класифікацією Пасквілла) без дощу за швидкості вітру 2,5 м/с за гауссовою статистичною моделлю. Процес надходження РПЗ в організм людини під час локальної пожежі на ОУ наведено на рис. 12.

Ефективний час нахождения людини у димовій хмарі  $t_e$  розраховувався за наступною формулою:

$$t_e = \int_0^t \exp \left[ -\frac{(x - ut)^2}{2\sigma_x^2} \right] dt, \quad (3)$$

де  $x$  – відстань до контрольного приміщення від точки викиду вздовж осі викиду;  $u$  – швидкість вітру;  $t$  – час, котрий пройшов після викиду;  $\sigma_x$  – стандартне відхилення розподілу домішок у димовій хмарі викиду у напрямку осі  $x$ .



Рис. 12. Схема надходження РПЗ в організм людини

Радіаційний ризик на віддалі  $L$  від місця пожежі на ОУ для персоналу визначали наступним чином:

$$R(L) = \int p(E, L) f[E(Q)] dE, \quad (4)$$

де  $p(E, L)$  – імовірність значного порушення здоров'я працюючих від отриманої дози опромінення;  $f(E, Q)$  – розподіл імовірностей вихідних подій – частоти пожеж на ОУ.

Отримані результати (табл. 3, 4) показують, що максимальна доза не перевищує 50 мЗв, а розмір ризику  $5 \cdot 10^{-5}$  рік<sup>-1</sup> під час локальної пожежі в ОУ.

Таблиця 3  
Значення максимальних індивідуальних доз (мбер) для персоналу

Погодні умови	Віддаль, м		
	100	500	1000
A	$3,33 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-5}$
B	$5,59 \cdot 10^{-3}$	$3,52 \cdot 10^{-4}$	$1,38 \cdot 10^{-4}$
C	$8,44 \cdot 10^{-3}$	$7,42 \cdot 10^{-4}$	$1,96 \cdot 10^{-4}$
D	$1,31 \cdot 10^{-2}$	$1,69 \cdot 10^{-3}$	$5,02 \cdot 10^{-4}$
E	$2,44 \cdot 10^{-2}$	$2,62 \cdot 10^{-3}$	$7,43 \cdot 10^{-4}$
F	$1,76 \cdot 10^{-2}$	$6,92 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$
G	$2,14 \cdot 10^{-1}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$	$4,40 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 4  
Максимальний індивідуальний ризик (1/рік) для персоналу

Погодні умови	Віддаль, м		
	100	500	1000
A	$1,00 \cdot 10^{-11}$	$3,66 \cdot 10^{-13}$	$4,45 \cdot 10^{-14}$
B	$3,27 \cdot 10^{-11}$	$1,96 \cdot 10^{-12}$	$8,05 \cdot 10^{-13}$
C	$1,52 \cdot 10^{-11}$	$1,27 \cdot 10^{-12}$	$3,53 \cdot 10^{-13}$
D	$4,47 \cdot 10^{-11}$	$5,44 \cdot 10^{-12}$	$1,70 \cdot 10^{-12}$
E	$4,40 \cdot 10^{-11}$	$4,50 \cdot 10^{-12}$	$1,34 \cdot 10^{-12}$
F	$7,93 \cdot 10^{-11}$	$3,00 \cdot 10^{-11}$	$7,80 \cdot 10^{-12}$
G	$3,86 \cdot 10^{-10}$	$1,94 \cdot 10^{-10}$	$7,92 \cdot 10^{-11}$

Доза опромінення у разі об'ємної пожежі в ОУ з можливим обваленням захисної покрівлі буде визначатися сумісною дією на персонал РПЗ і радіоактивного пилу.

Графіки різних розрахункових інгаляційних доз у залежності від віддалі від місця радіаційної аварії та погодних умов наведено на рис. 13–16.

У табл. 5 наведено результати розрахунку індивідуального ризику, що очікується від радіації для персоналу ЧАЕС, який знаходиться на шлейфі димової хмари на різних відстанях від місця радіаційної аварії.

Таблиця 5

Індивідуальний ризик, що очікується від радіації для персоналу під час об'ємної пожежі в ОУ

Параметр	Віддаль від місця пожежі, м					
	150	250	350	450	550	650
$r \cdot 10^{-4}, \text{рік}^{-1}$	27,1	13,4	9,6	2,8	1,4	0,12

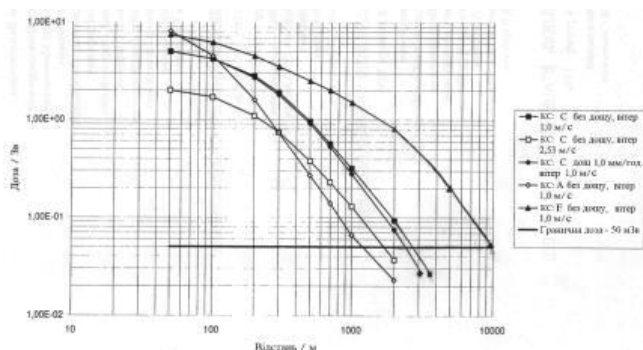


Рис. 13. Ефективна інгаляційна доза опромінення

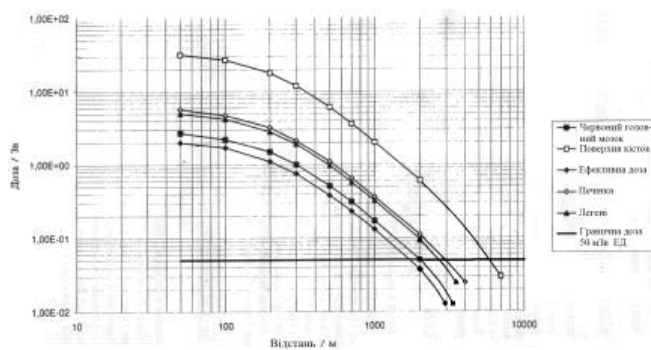


Рис. 14. Інгаляційна доза опромінення критичних органів

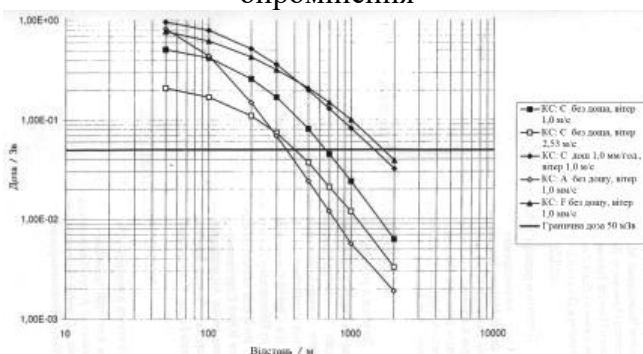


Рис. 15. Ефективна доза опромінення від ґрунту

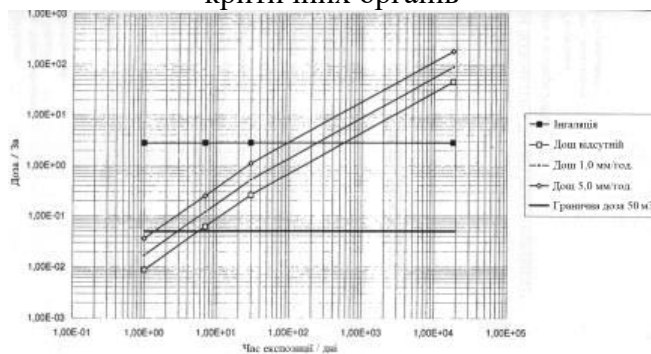


Рис. 16. Ефективна доза зовнішнього опромінення від ґрунту на віддалі 500 м у залежності від погодних умов і інтенсивності дощу

Потужності ефективних інгаляційних доз було обчислено за наведеною на рис. 17 моделлю.

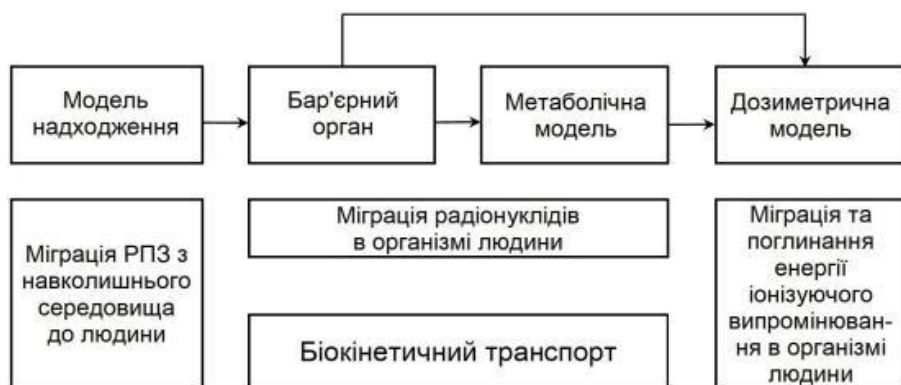


Рис. 17. Структура узагальненої дозиметричної моделі людини

Сумарний дозовий коефіцієнт від інгаляційного надходження було знайдено за основними розрахунковими схемами. Для формалізації та алгоритмізації процесів надходження радіонуклідів у організм людини останній уявляють у вигляді складної пробної та функціонально гетерогенної системи, що описувалась так званою камерною моделлю.

На рис. 18 представлено експериментально вимірний розподіл густини ймовірності за розмірами легких радіоактивних частинок для  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{239+240}\text{Pu}$ , що було оцінено у висхідному потоці РПЗ під час пожежі усередині приміщень 402/3 і 805/3.

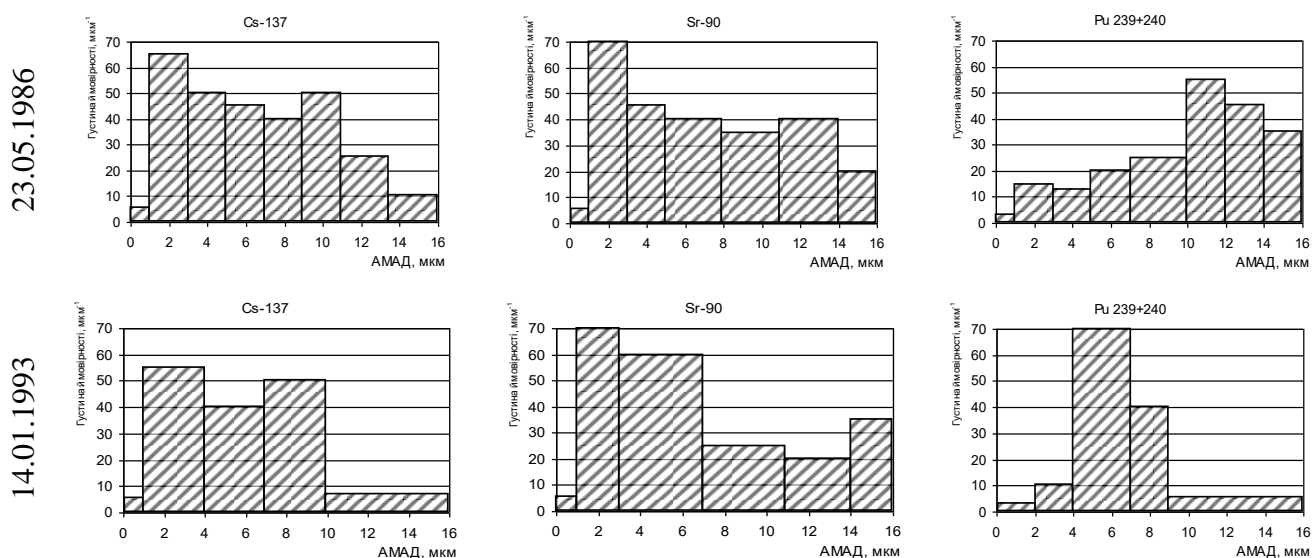


Рис. 18. Розподіл густини ймовірності  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  за розміром РПЗ у вихідному потоці в приміщеннях 402/3 (23.05.1986) та 805/35 (14.01.1993) під час пожеж в ОУ

З рис. 18 видно, що функції у розподілі РПЗ були широкими і мали два максимуми для грубо- і тонкодисперсного аерозолю. Обчислені розподіли аерозольних легких частинок у РПЗ в умовах реальних пожеж на ОУ за розмірами апроксимували логнормальним розподілом.

Після спорудження НБК над ОУ його безпечний стан характеризується великою кількістю взаємопов'язаних факторів, що описують їх конструктивні і технологічні властивості, радіацію, температуру, діючі напруги і деформації, динаміку зовнішніх впливів, властивості матеріалів, що можуть змінюватися в



часі під дією зовнішніх сил і умов експлуатації. Математично опис багатопараметричного стану НБК–ОУ може бути представлений залежністю:

$$X_T = \{X_1, X_2, \dots, X_j\}, \quad (5)$$

де  $X_1 \dots X_j$  – параметри, що описують технічний стан НБК–ОУ в рамках прийнятої моделі і змінюються в процесі експлуатації.

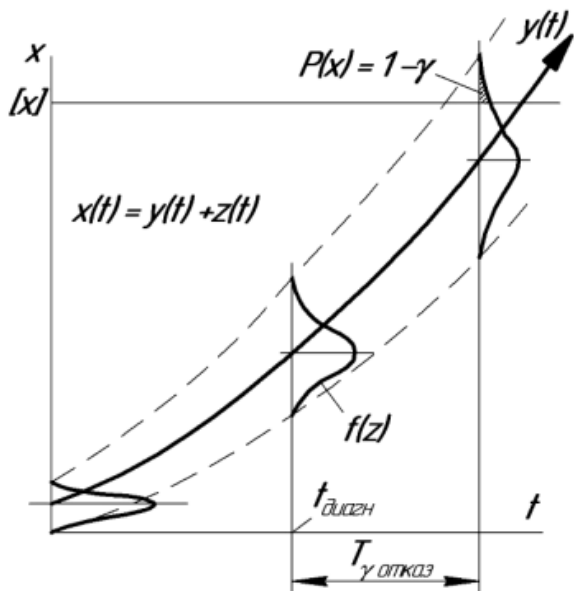


Рис. 19. Схема зміни технічного стану складного комплексу НБК–ОУ

На рис. 19 наведено прогнозування зміни технічного стану НБК–ОУ та оцінку його залишкового ресурсу за трендом і щільністю розподілу поточного стану.

Вибір показників надійності НБК–ОУ буде залежати від його відновлюваності або невідновлюваності, режимів експлуатації і наслідків відмови. Якщо наслідки відмови елементів НБК–ОУ пов'язані з людськими жертвами або великими економічними витратами визначальним показником є гамма-відсотковий ресурс, де  $\gamma$  призначається 0,95 і більше.

У **п'ятому розділі** розроблено і проведено комплексне оцінювання техногенно-екологічної безпеки СВЯП «мокрого» типу». Для оцінки радіаційної небезпеки СВЯП та її впливу на навколишнє середовище необхідно провести оцінювання екологічних наслідків під час експлуатації об'єкта, а також безпеки БВ в умовах невизначеності, надійності його конструкції, теплофізичної безпеки БВ та вибухопожежної небезпеки в процесі зберігання ВЯП.

Основною метою забезпечення екологічної безпеки в процесі експлуатації СВЯП-1 є запобігання неконтрольованого розвитку ядерних реакцій і поширення радіації. СВЯП-1 є безпечним, якщо радіаційний вплив від нього на персонал, населення і навколишнє середовище не перевищує встановлених меж за нормальної експлуатації і під час проектних аварій та обмежується прийнятними значеннями під час важких (запроектних) аварій.

Під час моделювання максимальної проектної аварії було розглянуто падіння (в момент перевантаження) однієї відпрацьованої тепловиділяючої збірки (далі – ВТВЗ) з розгерметизацією всіх тепловиділяючих елементів у разі одночасної відмови системи спецвентиляції. Висота викиду радіонуклідів склала 40 м. Вихід активності під час аварій з однієї ВТВЗ (паливо РВПК-1000) був прийнятий наступний, Бк ( $\times 10^{10}$ ):  $^{103}\text{Ru}$  – 86,21;  $^{106}\text{Ru}$  – 13,32;  $^{134}\text{Cs}$  – 477,3;  $^{144}\text{Ce}$  – 186,11;  $^{140}\text{La}$  – 161,32;  $^{90}\text{Sr}$  – 7,4;  $^{137}\text{Cs}$  – 363,34;  $^{85}\text{Kr}$  – 189,07.

За консервативним підходом максимальне додаткове радіоактивне забруднення прилеглих територій ізотопами цезію за 30-річний період експлуатації СВЯП-1 не перевищить 12 Бк/м<sup>2</sup>. На найближчому кордоні ЧЗВ (12 км в південно-західному напрямку) в залежності від метеорологічних умов

поверхнєве забруднення ґрунту  $^{137}\text{Cs}$  складе (10–90) Бк/м<sup>2</sup>, що відповідає (30–50)% від сучасного фонового рівня забруднення ґрунтового покриву і не призведе до зміни статусу цих територій.

Під час моделювання запроектованої аварії (далі – ЗПА) було прийнято сценарій падіння літака (заправка паливом 50%) безпосередньо на залізобетонні модулі повністю заповнені ВТВЗ з подальшим горінням авіаційного палива. Аналіз радіаційного впливу в разі ЗПА показав, що максимальне додаткове поверхнєве забруднення ґрунтового покриву  $^{137}\text{Cs}$  може досягати величини 50,0 кБк/м<sup>2</sup> (13,5 Кі/км<sup>2</sup>) і буде спостерігатися на відстані (2000–2400) м від об'єкта, тобто в разі розміщення СВЯП-1 не на території ЧЗВ, а в іншому районі України, такий розвиток подій призвів би до радіоактивного забруднення призначених для забудови територій і значних збитків.

БВ ВЯП є складною ієрархічною системою, представленою у вигляді множини рівнів підсистем, компонентів і елементів. Ієрархія БВ ВЯП є базовою посилкою для подання у вигляді ієрархії методів оцінки його безпеки. Послідовність оцінки безпеки БВ ВЯП, запропонований в рамках даного підходу, наведено на рис. 20. Критичність стану як оцінка безпеки БВ ВЯП розглядалась послідовно як:

- 1) блок нечіткого логічного висновку для оцінювання безпеки БВ ВЯП на основі параметрів станів її компонентів;
- 2) блок застосування байєсових мереж довіри (далі – БМД) для оцінювання безпеки БВ ВЯП;
- 3) блок зворотного нечіткого логічного висновку (низхідні висновки);
- 4) блок застосування БМД для оцінювання безпеки систем БВ;
- 5) блок зворотнього нечіткого логічного висновку для прогнозування параметрів стану компонентів БВ.

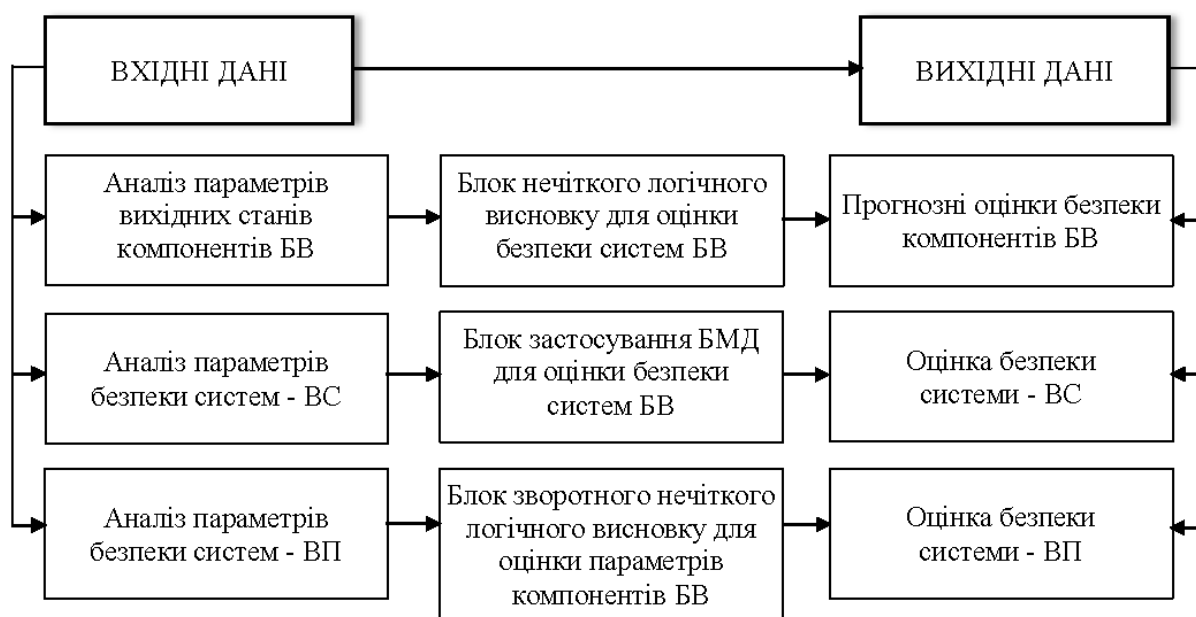


Рис. 20. Послідовність аналізу і оцінки безпеки БВ ВЯП

Для зазначеного об'єкта використовували такі функції розподілення (далі – ФР): дифузійне монотонне (DM); логнормальне (LN); Вейбулла (W).

Таблиця 6  
Залежність ПН від вибору виду функції розподілу

ФР	$P(t)$	$T_{cp}$
DM	$P(t) = \Phi \left[ \frac{a-t}{\sigma\sqrt{at}} \right]$	$T_{cp} = a \left( 1 + \frac{\sigma^2}{2} \right)$
LN	$P(t) = \Phi \left[ \frac{\ln(a/t)}{\sigma} \right]$	$T_{cp} = a \exp \left( \frac{\sigma^2}{2} \right)$
W	$P(t) = \exp \left[ -\left( t/a \right)^{\frac{1}{\sigma}} \right]$	$T_{cp} = a \Gamma(1 + \sigma)$

Примітки:  $a$  – параметр масштабу;  $\sigma$  – параметр форми;  $\Gamma()$  – гамма-функція;  $\Phi()$  – інтеграл ймовірності.

Функціональний вигляд DM-, LN- та W-розподілень наведений в табл. 6. Таким чином, можливо запропонувати такий алгоритм розрахунку кінетики показника надійності (далі – ПН): вибір ФР (табл. 8, графа 1); вибір чисельного значення параметру форми  $\sigma \leq 1$ ; розрахунок середнього значення ПН  $T_{cp}$  (табл. 8, графа 3); розрахунок та побудова графічної залежності ймовірності безвідмовної роботи  $P(t)$ , пов'язаної з ФР (табл. 8, графа 2).

В ході розрахунку ФР значення параметру  $\sigma$  приймалося таким:  $\sigma=1$  (режим нормальної роботи,  $t=0\dots30$  років) та  $\sigma=0,5$  і  $0,1$  (режим старіння  $t>30$  років). Результати розрахунку наведені в табл. 7.

Таблиця 7

Розрахунок показника масштабу та середнього строку служби  $T_{cp}$ 

$\sigma$	DM-розподілення		LN-розподілення		W-розподілення	
	$a$	$T_{cp}$	$a$	$T_{cp}$	$a$	$T_{cp}$
1	1003	1505	1081	1782	1258	1947
0,5	563,6	634,0	569,5	645,3	724,2	819,6
0,1	341,0	342,7	349,0	356,8	346,3	357,4

Для дослідження структурної надійності БВ в умовах впливу різного роду внутрішніх вихідних подій (негативних факторів) використовувався апарат імітаційного моделювання (рис. 21).

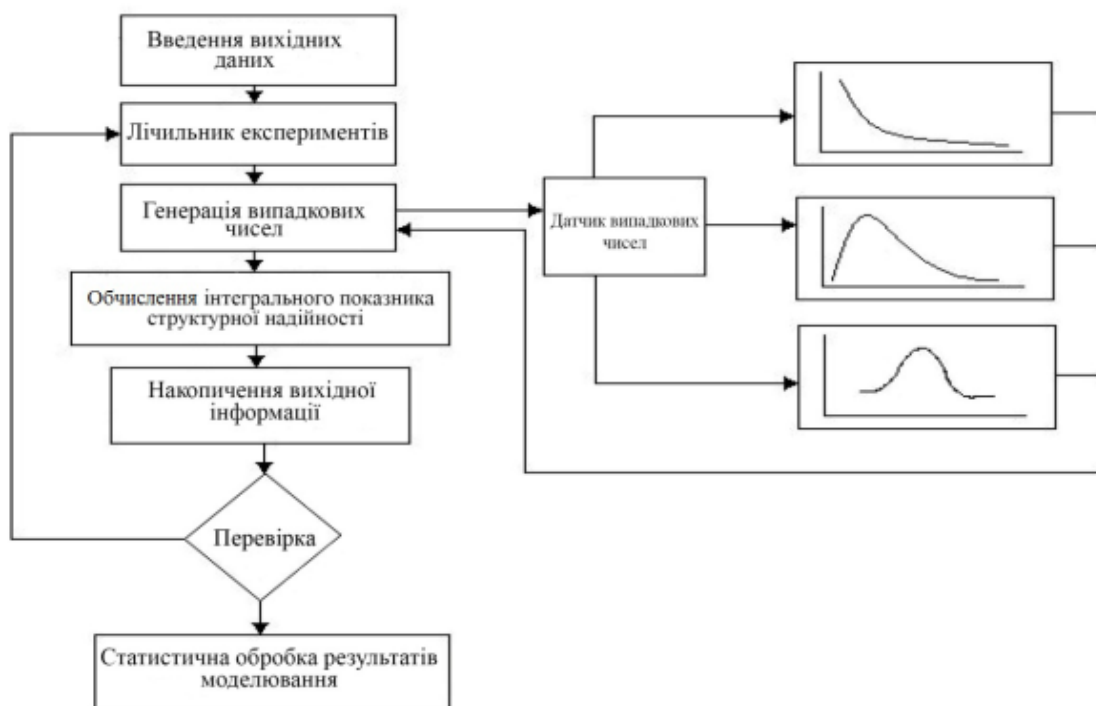


Рис. 21. Етапи імітаційного моделювання



Графічно оформлені результати розрахунків наведені на рис. 22 та рис. 23.

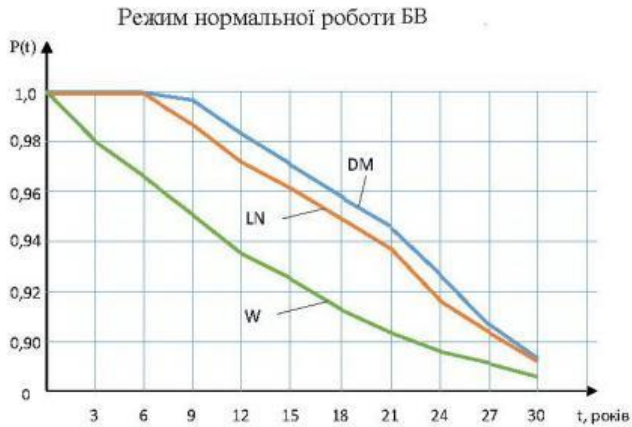


Рис. 22. Імовірність безвідмовної роботи БВ в перші 30 років експлуатації в режимі нормальної роботи



Рис. 23. Імовірність безвідмовної роботи БВ в наступні роки експлуатації

Під час оцінки вибухопожежної небезпеки в процесі зберігання ВЯП отримано діаграму детонації та горіння водню (рис. 24).

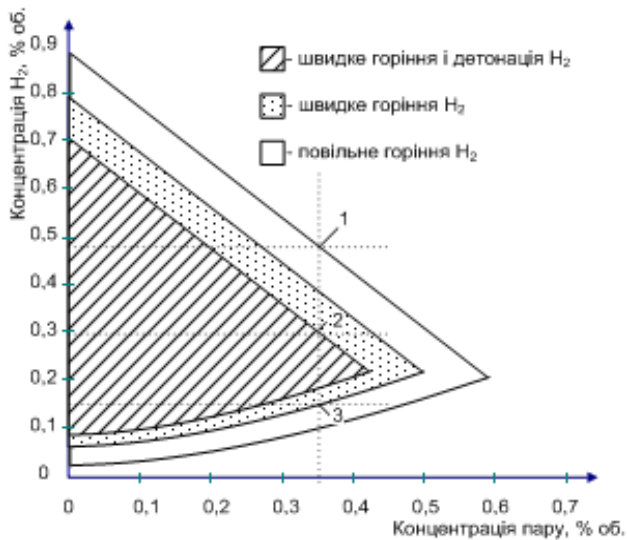


Рис. 24. Діаграма детонації та горіння водню

Температура самоспалахування водню у присутності водяної пари складає 970 К, а вибухонебезпечні властивості водневої суміші характеризуються межами спалаху 4,12–75% об'єму. З даних, наведених на рис. 28, видно, що у випадку 1 відбудеться повільне горіння водню, для випадків 2 та 3 – швидке горіння водню. Ступінь пошкодження будівельних конструкцій будівлі СВЯП-1 буде визначатися тими деформаціями і руйнуваннями, які вони отримали під час вибуху водню.

Проблеми поводження з РАВ – комплексні та вимагають врахування численних чинників. Для вирішення таких проблем доцільно використовувати системний підхід, що має загальнонаукове значення. Системний підхід в аналізі у сфері поводження з РАВ базується на виділенні та дослідженні структури систем. Суттєвою перевагою системно-структурної парадигми є те, що вона дає змогу чітко виділити системоутворюючі критерії та зумовлені ними морфологічні ознаки системи поводження з РАВ, що досягається за рахунок зміни ракурсу дослідження з ендогенного на екзогенний. В результаті такого розподілу системи поводження з РАВ (декомпозиції системи в просторі) її можна представити у вигляді деревовидної ієрархічної структури (рис. 25).

Розподіл системи поводження з РАВ на функціональні підсистеми – групи об'єктів, на яких здійснюється поводження з РАВ.

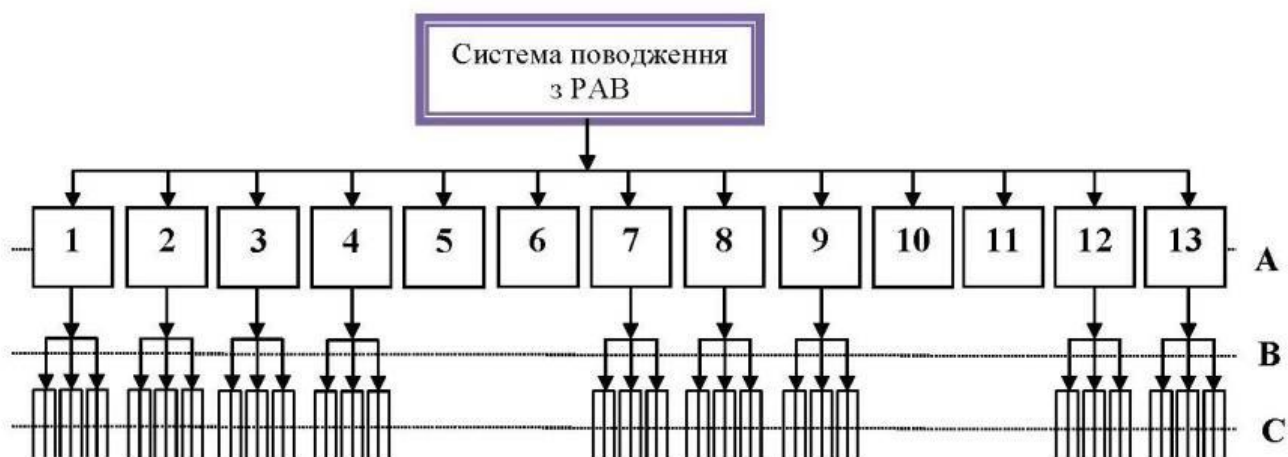


Рис. 25. Ієрархічна структура системи поводження з РАВ: де А – групи об'єктів, на яких накопичуються РАВ; В – види РАВ (агрегатний стан, рівень активності); С – способи поводження з РАВ, що потребують регламентації

В результаті аналізу 13 підсистем було визначено, що для регулювання безпеки всієї системи поводження з РАВ в Україні потрібно понад 20 напрямів прийняття рішень за видами РАВ та понад 45 напрямів для прийняття рішень за способами поводження з ними. Це означає, що необхідно створення такої ж кількості нормативних документів. Такий процес поводження з РАВ був би роздробленим, некерованим і практично не врегульованим. Системний аналіз дав змогу перейти від вербального (словесного) опису проблеми до формального – створення концептуальної моделі системи безпечного поводження з РАВ, що є формалізованим представленням початкової мети – «моделі бажаного майбутнього» (рис. 26).

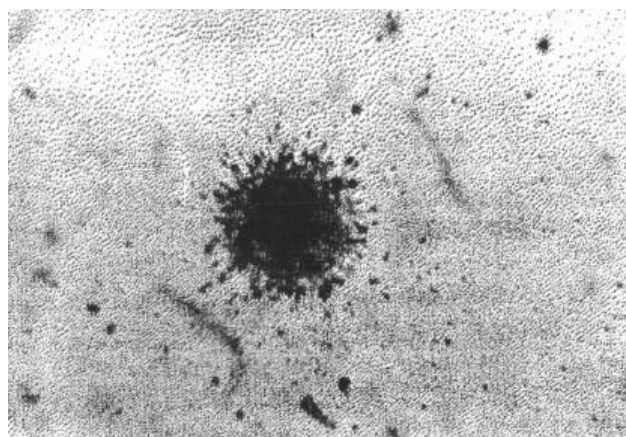
У **шостому розділі** здійснено комплексне оцінювання радіаційних небезпек лісових пожеж та їх екологічних наслідків. Після завершення формування зон радіоактивного забруднення в результаті аварії на 4-му блоці ЧАЕС радіоактивність приземного шару атмосфери в основному визначається процесами вторинного підйому та перенесення радіоактивних частинок, що випали на поверхню землі. Пожежі в лісах, забруднених техногенними радіонуклідами, поряд з дефляційними процесами й антропогенними факторами, сприяють підвищенню радіаційного забруднення як приземного шару повітря в районах пожеж, так і атмосфери в цілому. Середній радіонуклідний склад димових частинок склав у %:  $^{134}\text{Cs}$  – 5,3,  $^{137}\text{Cs}$  – 54,1,  $^{90}\text{Sr}$  – 30,8,  $^{239+240}\text{Pu}$  – 0,4.

Натуральні дослідження проводились у польових умовах у ЧЗВ на різних відстанях (7 та 15 км) від центру лісової пожежі. На рис. 27 наведено зовнішній вигляд димових частинок у повітрі, що були відібрані на різних віддальх від місця лісової пожежі, а на рис. 28 – їх розподіл за діаметром.

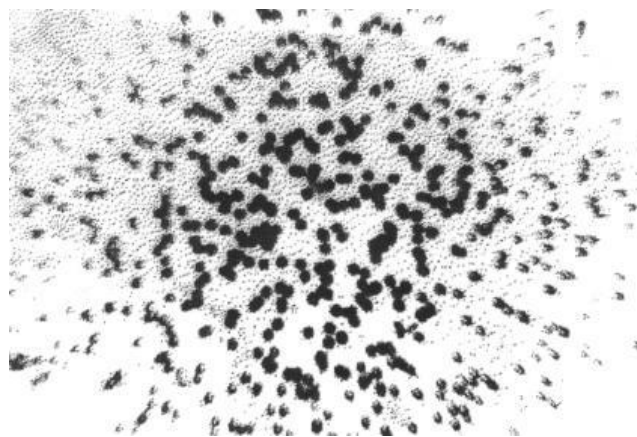
На рис. 29 наведено зміни вмісту концентрації диму в атмосферному повітрі в усіх фазах лісової пожежі, а на рис. 30 розподіл об'ємної активності (концентрації) радіонуклідів у повітрі для різних фаз розвитку лісової пожежі. З даних наведених на рис. 30 видно, що об'ємна активність РПЗ в основному обумовлена  $^{137}\text{Cs}$ , що складає 82% загальної активності,  $^{90}\text{Sr}$  – 7%, а ТУЕ – <1,0%.



Рис. 26. Концептуальна модель системи безпечного поводження з РАВ



а) відстань 7,0 км



б) відстань 15,0 км

Рис. 27. Зовнішній вигляд димових частинок у повітрі під час лісових пожеж

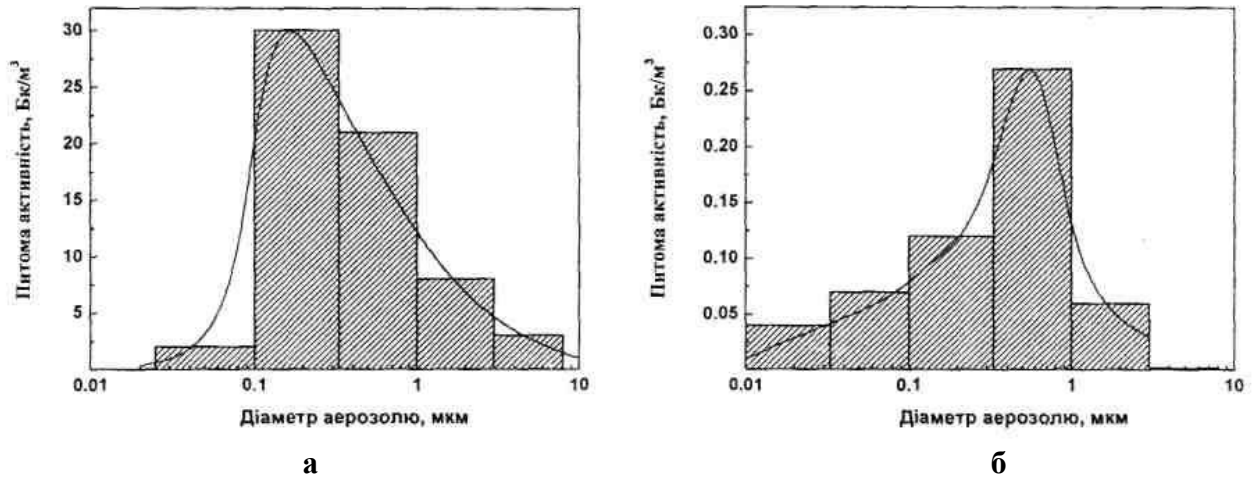


Рис. 28. Розподіл аерозольних частинок продуктів згоряння за діаметром у залежності від концентрації  $^{137}\text{Cs}$  в них на відстані 7,0 км (а) та 15 км (б) від місця пожежі

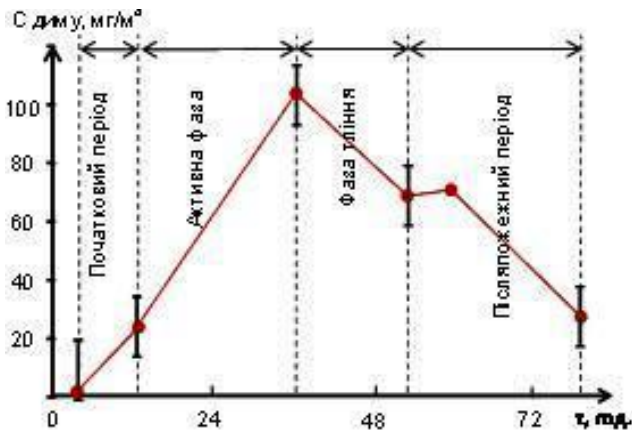


Рис. 29. Показник вмісту концентрації диму у повітрі у місці лісової пожежі

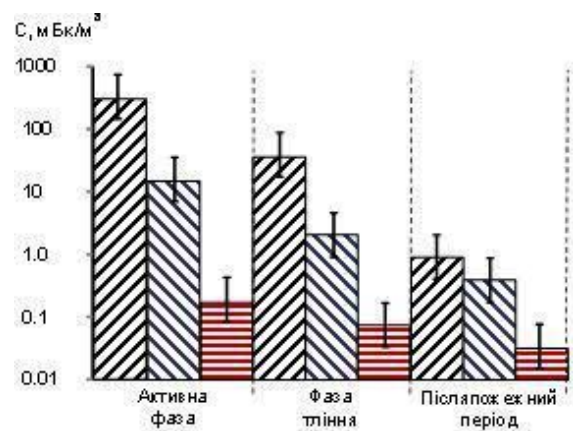


Рис. 30. Об'ємна активність радіонуклідів у атмосферному повітрі під час різних фаз лісової пожежі

Під час експериментальних лабораторних досліджень проби лісової підстилки відбирали на глибині до 5 см. Визначали час згоряння зразка:

$$\tau = \frac{m_0^{1/3}}{6K_B \rho^{2/3}} \left[ 1 - b(\tau)_{1/3} \right]^3, \quad (6)$$

де  $b(\tau) = m(\tau)/m_0$ ;  $m_0$  – початкова маса зразка;  $K_B$  – коефіцієнт масової швидкості вигорання;  $m(\tau)$  – маса зразка після час  $\tau$ .

На рис. 31 наведено дані про кількість  $^{137}\text{Cs}$ , що виділився у повітря за повного згоряння в печі 1 кг лісового горючого матеріалу взятого в районі «Рудого лісу» і біля сіл Лельов і Сахани.

Встановлено, що максимальну кількість складають димові частинки з аеродинамічними діаметрами в інтервалі (0,5–1,0) мкм, в цьому разі радіус медіан і стандартне відхилення за логнормального розподілу склали для  $R_0=0,6$  мкм –  $\sigma_\delta=1,2$ , для  $R_0=0,8$  мкм  $\sigma_\delta=1,0$ . Інтенсивність осідання  $^{137}\text{Cs}$  склала  $2,3 \cdot 10^{-3}$  Бк/(м·с), а швидкість осідання – 2,6 см/с для лісової підстилки.

На рис. 32 наведено результати порівняльних вимірювань концентрації і густини випадіння  $^{137}\text{Cs}$ , що отримані під час натуральних вогневих досліджень ( $S_n=25$  га) та під час лісової пожежі в ЧЗВ в залежності від відстані та місця пожеж, які відбувалися в різний час. Рисунок підтверджує відповідність

отриманих експериментальних і реальних даних під час лісової пожежі в ЧЗВ.

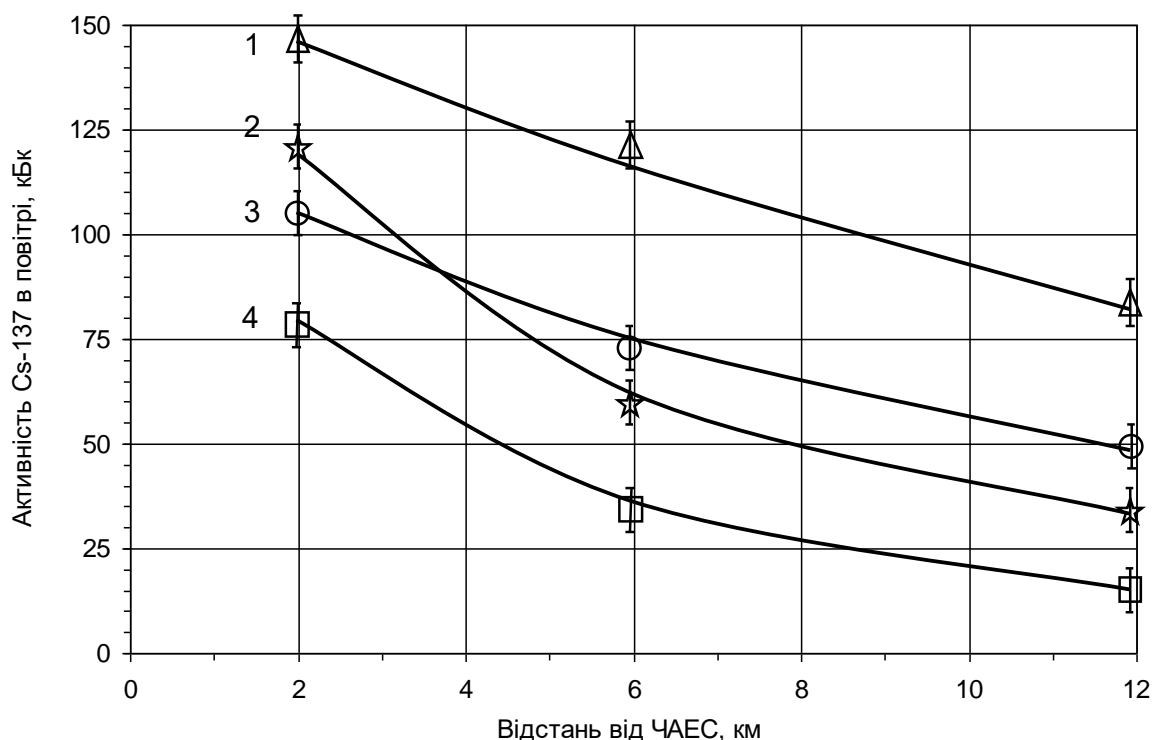


Рис. 31. Кількість  $^{137}\text{Cs}$ : 1 – лісна підстилка; 2 – суха трава; 3 – хвоя сосни; 4 – кора сосни

На рис. 33 наведено результати порівняльних вимірювань інтенсивності та швидкості осідання  $^{137}\text{Cs}$  під час контрольованої лісової пожежі ( $S_n=60\times 60\text{ м}^2$ ) і під час лісової пожежі в ЧЗВ, що відбулися в різний час.

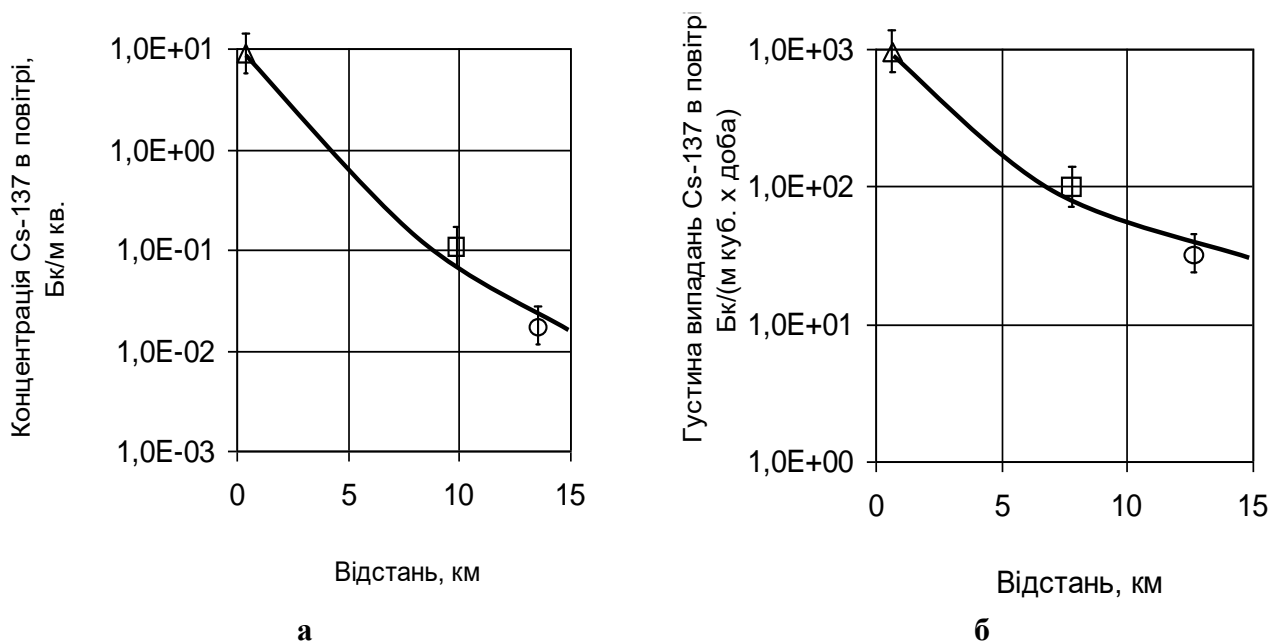


Рис. 32. Результати порівняльних вимірювань концентрації (а) та густини випадіння (б)  $^{137}\text{Cs}$  під час натурального вогневого експерименту і під час лісової пожежі в ЧЗВ в залежності від відстані від місця пожежі:  $\Delta$  – Новозибівка, Брянська обл., РФ;  $\square$  – Прип'ять;  $\circ$  – Чорнобиль



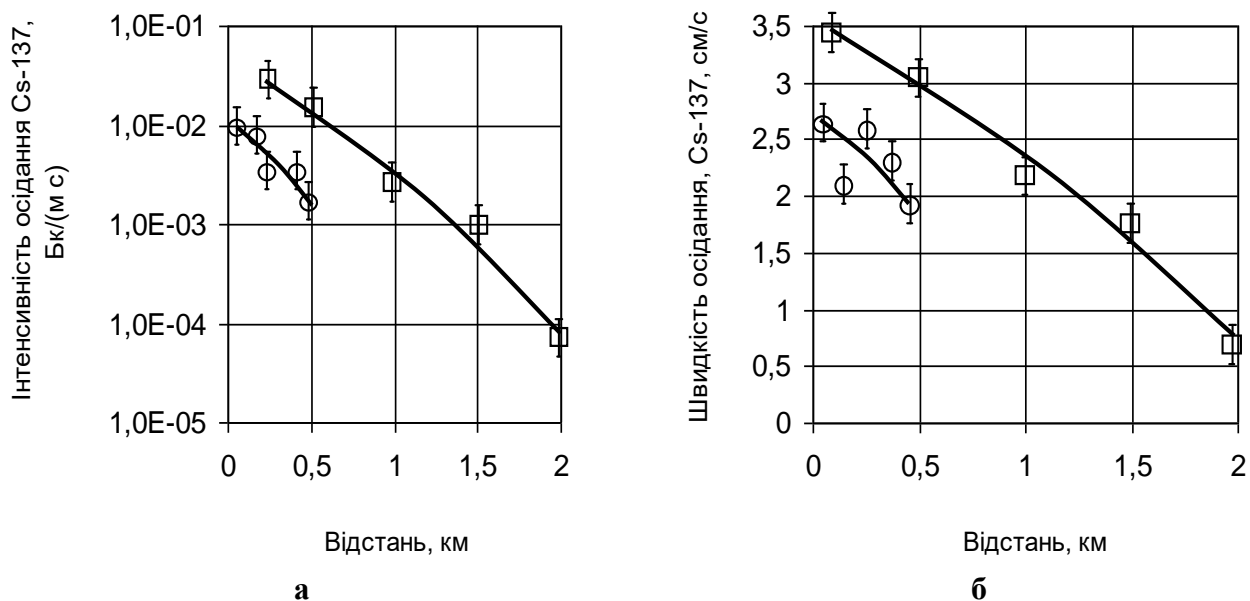


Рис. 33. Результати порівняльних вимірювань інтенсивності осідання (а) та швидкості осідання (б)  $^{137}\text{Cs}$  під час лісових пожеж у ЧЗВ в залежності від відстані від місця пожежі:

□ – північно-західний напрям, 10 км від ЧАЕС; ○ – Новошеполічи, 5 км на  $280^\circ$  від ЧАЕС

Таблиця 8

У табл. 8 наведено

Розрахунковий радіаційний ризик у разі зовнішнього  $R_{ext}$  та внутрішнього  $R_{inhal}$  опромінення РПЗ пожежного різними радіонуклідами

розрахований радіаційний ризик для пожежних, які задіяні у гасінні пожеж у ЧЗВ. З наведених у табл. 10 даних бачимо, що межа радіаційного ризику для пожежного, який задіяний у гасінні пожежі у ЧЗВ, може перевищувати межу граничного індивідуального радіаційного ризику –  $10^{-3}$ , тому необхідно застосувати спеціальні міри і заходи захисту.

Радіонуклід	Клас всмоктування	Радіаційний ризик, рік <sup>-1</sup>	
		$R_{ext}$	$R_{inhal}$
$^{137}\text{Cs}$	F	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
$^{90}\text{Sr}$	S	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-3}$
$^{238}\text{Pu}$	M	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$
$^{239,240}\text{Pu}$	M	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$
$^{241}\text{Am}$	M	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$

У сьомому розділі розглянуто концептуальні основи створення нових систем моніторингу і менеджменту еколого-радіаційних небезпек ЧЗВ. Проведення комплексної оцінки аварійного і післяаварійного стану забруднених територій в реальному масштабі часу і прогнозування розвитку надзвичайних радіаційно та екологічно небезпечних ситуацій і передумов щодо їх виникнення потребують проведення всебічного і постійного оперативного моніторингу радіаційного та екологічного стану довкілля з отриманням необхідного об'єму достовірної наукомісткої інформації міждисциплінарного характеру.

Запропонована система виявлення та сигналізації про лісові пожежі призначена для дистанційного контролю параметрів пожежної, радіаційної та метеорологічної обстановки; прогнозу та забезпечення можливості швидкого реагування і регулювання пожежонебезпечної та радіаційної обстановки; видачі рекомендацій з локалізації та ліквідації пожеж. В організаційно-технічному плані система побудована за принципом розподіленого багаторівневого інформаційно-вимірювального комплексу, що функціонує в реальному масштабі часу. На

відміну від відомих засобів дистанційного контролю (телевізійні, інфрачервоні та ін.), НВЧ радіометр дозволяє отримувати інформацію про пожежонебезпечну обстановку незалежно від погодних умов, часу доби, умов освітленості, орієнтації та потужності димового шлейфу, а також визначати положення кромки, що горить, і протяжності активної зони горіння (рис. 34, 35).

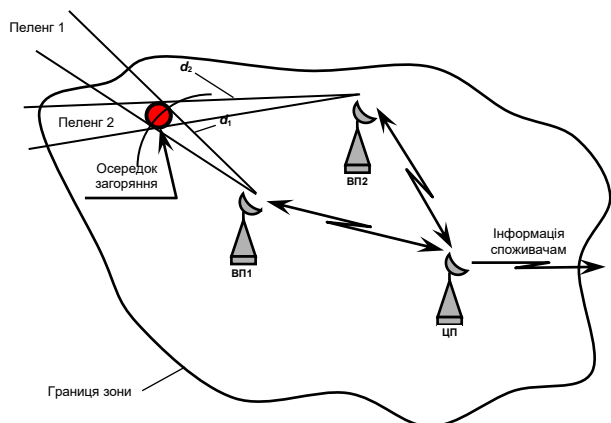


Рис. 34. Структура трипозиційної пасивної системи з НВЧ радіометром

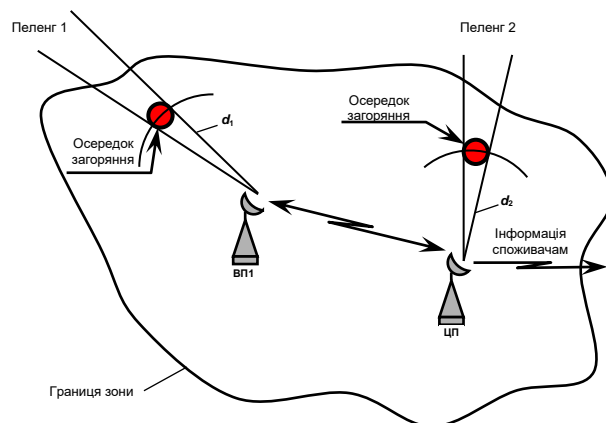


Рис. 35. Структура двопозиційної кутомірної-далекомірної активно-пасивної системи

Системи складаються з трьох рознесених у просторі пунктів: одного центрального і два винесених, розташовані у вершинах рівностороннього трикутника із стороною 10 км. На рис. 36 представлено структурну схему радіометричного комплексу пожежної сигналізації.

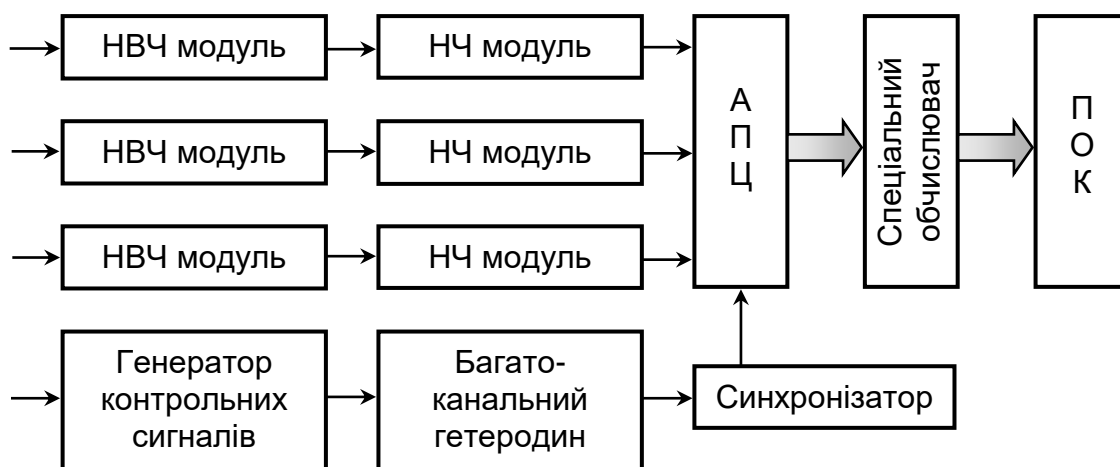


Рис. 36. Структурна схема радіометричного комплексу пожежної сигналізації

Архітектура центрального пункту системи має 3-рівневу структуру. Нижній рівень побудований на основі контролерів, що виконують функції збору й обробки інформації. Система ділиться офісну і технологічну.

Прогнозування та ліквідація наслідків радіаційних аварій повинно ґрунтуватися на комплексній системі організаційних і технічних заходів. Одним з найбільш важливих заходів є необхідність створення вітчизняних МЛК загальної оперативної оцінки радіаційного і радіологічного стану довкілля. Основним завданням таких МЛК є оперативний контроль радіаційної обстановки та контроль рівнів радіоактивного забруднення в атмосферному повітрі, ґрунті, воді, продуктах харчування, кормах тощо. Головна мета – інтегральна оцінка ризиків та

прогнозування можливості виникнення і розвитку радіаційних аварій з подальшою розробкою першочергових оперативних заходів щодо їх ліквідації і пом'якшенню можливих екологічних наслідків.

Доцільно в комп'ютерній базі даних МЛК мати розроблену за ГІС-технологіями комп'ютерну карту з розташованими на ній РНО, ділянками місцевості з техногенно високими ступенями ризику (з ідентифікацією їхньої історії і стану на даний момент часу), з урахуванням ліній високовольтних передач, газо- і нафтопроводів тощо. Базовий варіант МЛК повинен включати наступні основні підсистеми (далі – ПС) (рис. 37): 1) комплексного наземного радіаційного контролю (рис. 38); 2) експресного наземного радіологічного контролю; 3) дистанційного комплексного повітряного (якісного і кількісного) контролю параметрів радіаційного та хімічного забруднення навколишнього середовища з урахуванням впливу метеопараметрів; 4) контактного контролю і виміру радіонуклідів в об'єктах навколишнього середовища; 5) супутникової навігації; 6) оперативного зв'язку; 7) бортовий обчислювальний комплекс.

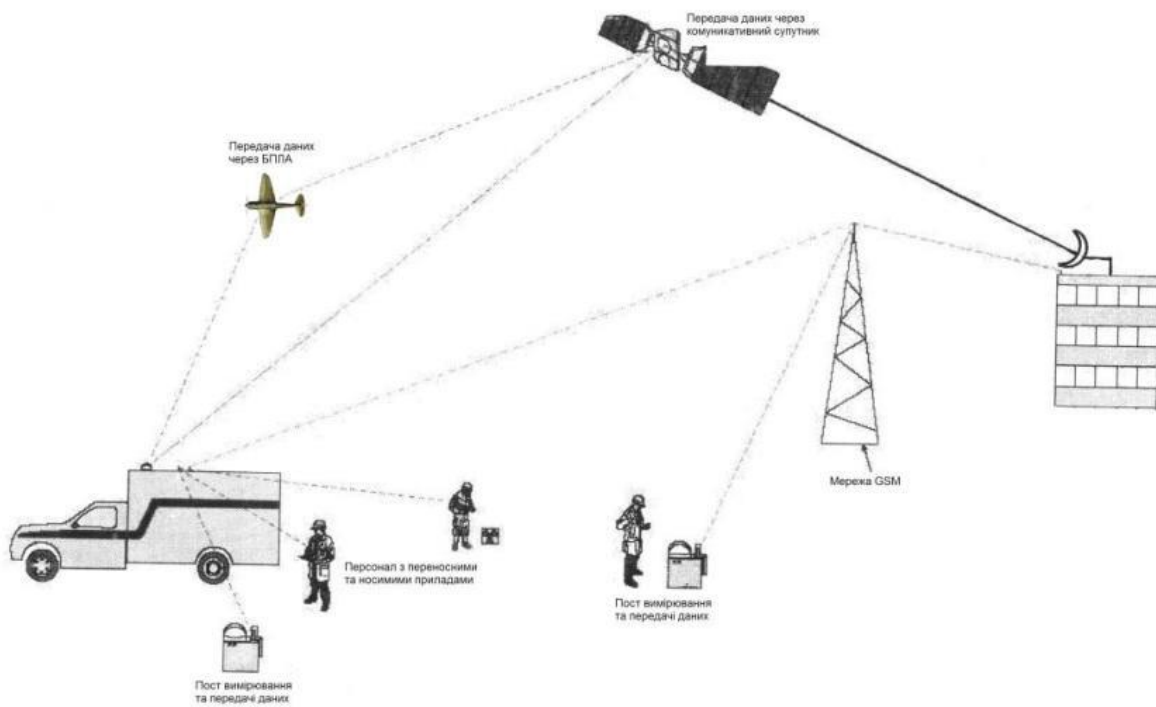


Рис. 37. Системна інтеграція засобів вимірювання радіаційної обстановки на основі МЛК і програмно-апаратного середовища ViewPoint

Важливе значення має система менеджменту еколого-радіаційних небезпек ЧЗВ, що дає змогу забезпечити інформаційно-технічну підтримку ступеня обґрунтованості прийняття управлінських рішень в критичних ситуаціях.

На рис. 39 наведено структурну схему контролю і керування важкими радіаційними аваріями, що складається з комплексу заходів організаційно-виробничого та інженерно-технічного спрямування. Ризик важкої радіаційної аварії інтерпретувався як імовірнісна міра виникнення події або явища, зокрема, радіаційної аварії на РНО і на спричиненому в цьому разі збитку в екологічній, соціальній та економічній сферах.



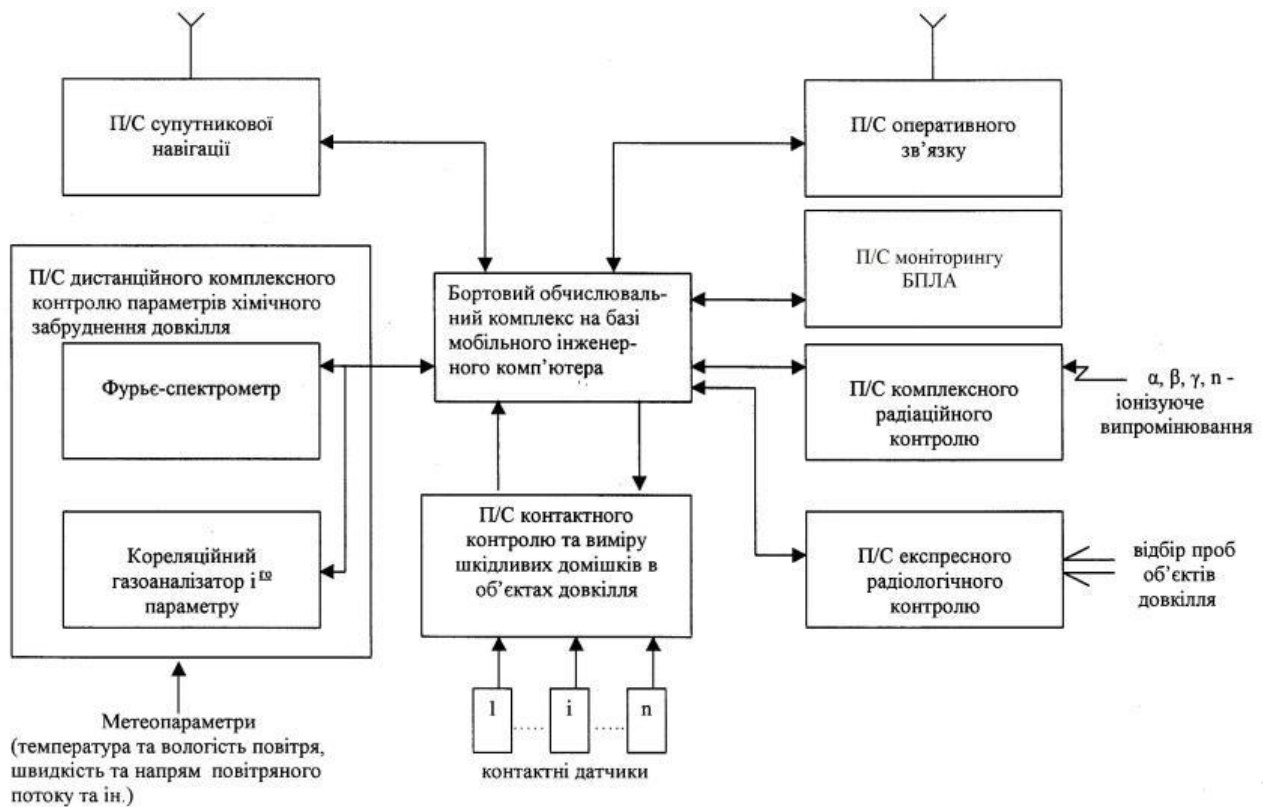


Рис. 38. Структурна схема апаратного оснащення МЛК загальної оцінки та прогнозування радіоекологічних наслідків радіаційних аварій

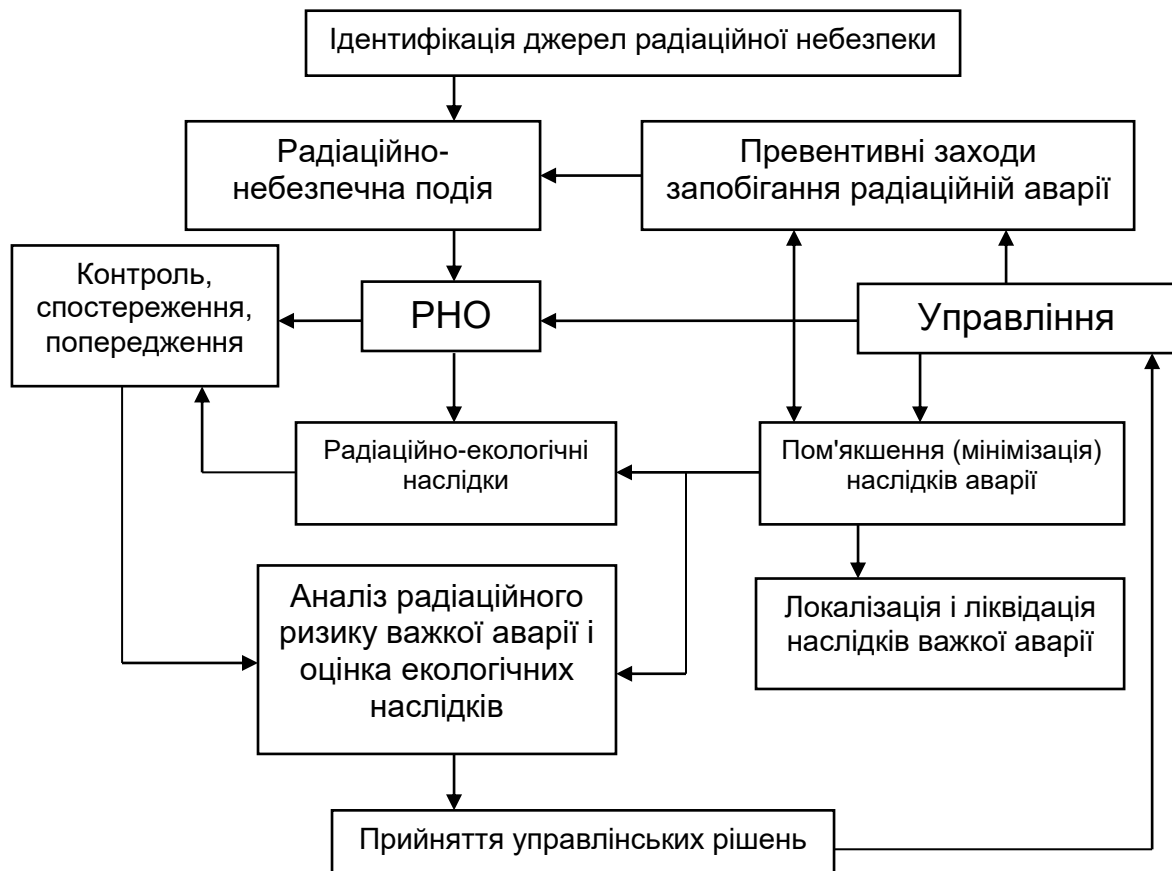


Рис. 39. Структурна схема контролю і керування важкими радіаційними аваріями

На рис. 40 приведено розрахована залежність протяжності зон радіоактивного забруднення в момент радіаційної аварії на РНО уздовж осі сліду від висоти аварійного викиду і погодних умов.

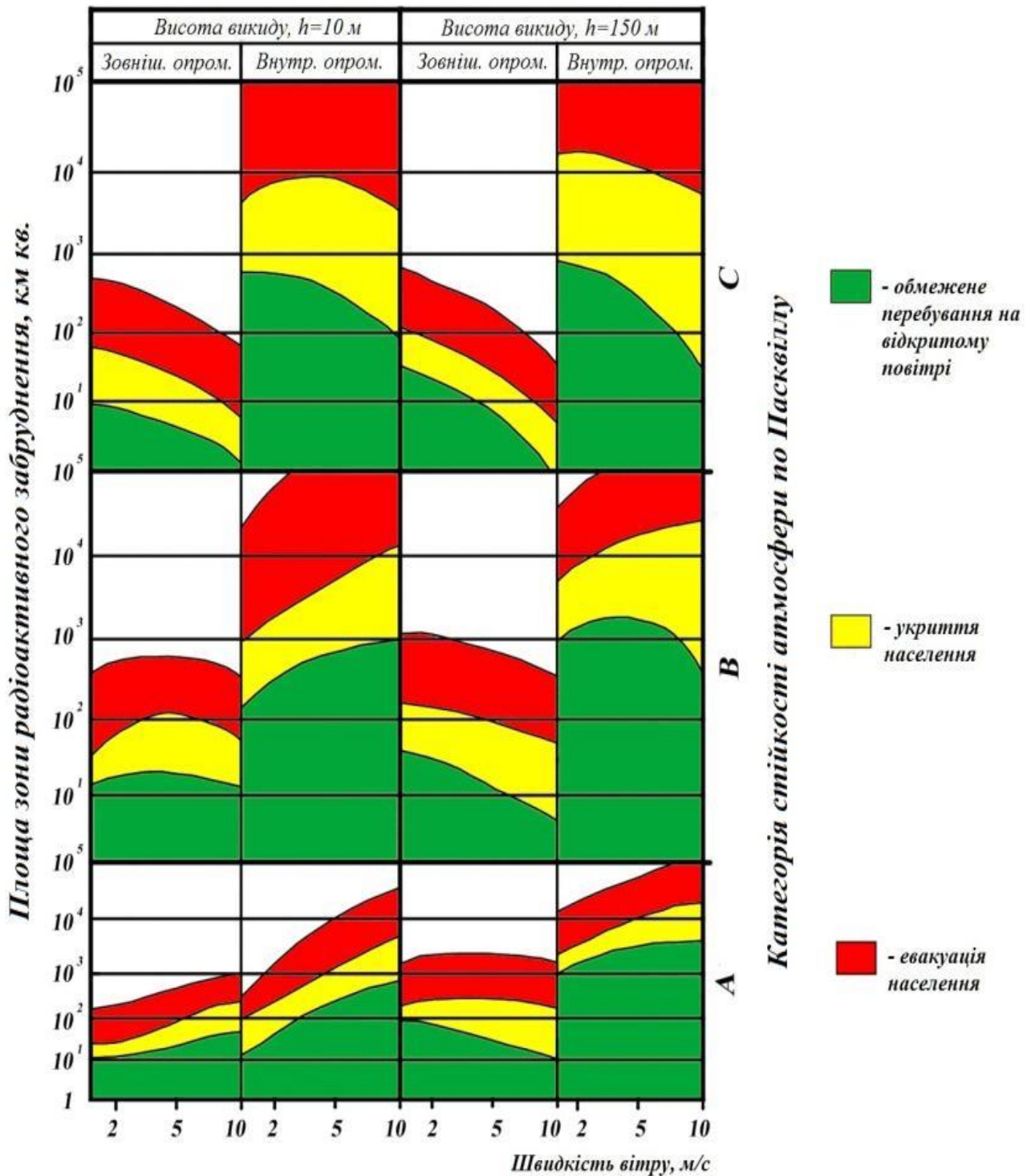
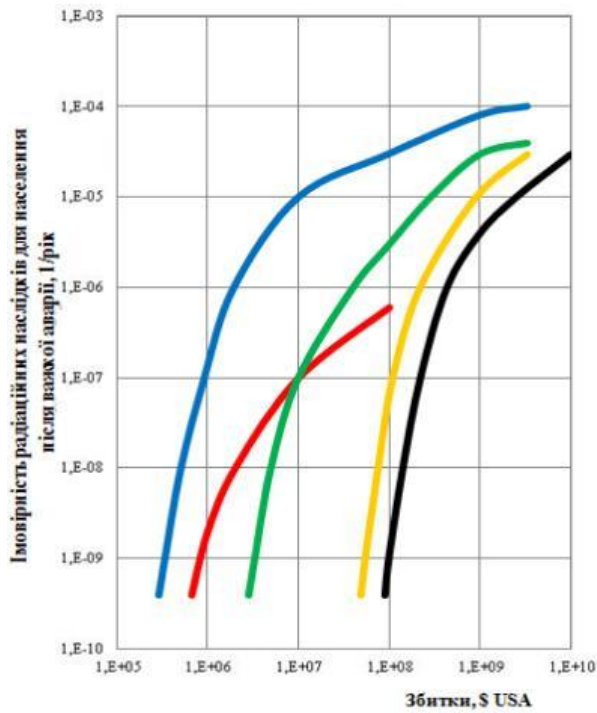


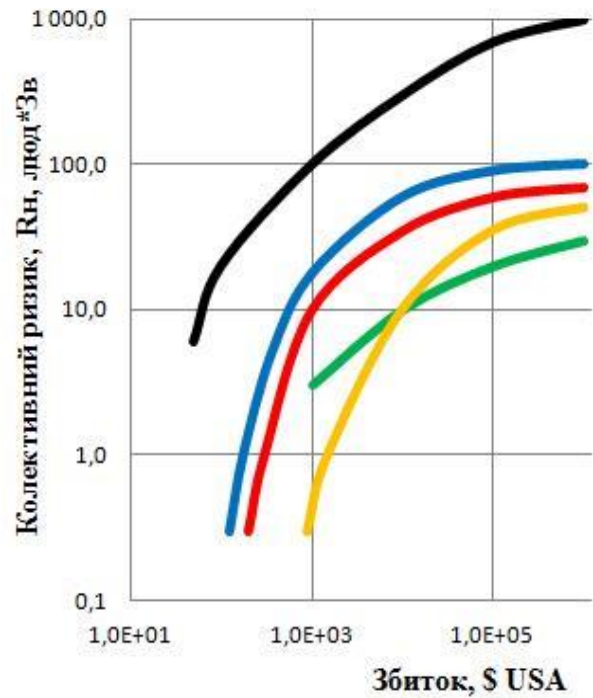
Рис. 40. Залежність протяжності зон радіоактивного забруднення в момент радіаційної аварії на ОУ уздовж осі сліду від висоти аварійного викиду і погодних умов

На рис. 41 наведено розраховані значення відповідно індивідуального і колективного ризиків для людей, що можуть постраждати від радіаційної аварії в залежності від збитків.



(а)

- генетичні ефекти
- випадки захворювання щитовидної залози
- ранні смертельні випадки
- віддалені смертельні випадки
- сумарний збиток від радіоактивного забруднення



(б)

Рис. 41. Потенційний індивідуальний (а) і колективний (б) ризик для людей, постраждалих від радіаційної аварії

У додатках наведено допоміжні і довідкові таблиці, рисунки, графіки, схеми, фотографії, текстовий матеріал, 6 актів впровадження результатів роботи та 2 акти впровадження результатів науково-дослідних робіт.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на основі абстрагування й узагальнення результатів проведених теоретичних та експериментальних наукових досліджень надано нове розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми комплексного вирішення певних аспектів захисту довкілля від техноприродних загроз, що створюють РНО і явища у ЧЗВ, що в сукупності забезпечує належний рівень моніторингу і менеджменту екологічної безпеки зазначеної території. Отже, одержані нові наукові і практичні результати викладено нижче.

1. Аналіз сучасного стану еколого-радіаційного забруднення лісів та території ЧЗВ показав, що близько 1 млн га лісу залишаються забрудненими радіонуклідами техногенного походження, особливо ліси полісся України, Житомирської, Рівненської, Київської областей. Еколого-радіаційну загрозу навколишньому середовищу становить і РНО, що розташовані у ЧЗВ, особливо ОУ та СВЯП-1, на яких можливо виникнення аварії з викидом радіоактивних речовин. Існує проблема поводження з РАВ у ЧЗВ. Потребують пильної уваги питання протипожежного стану лісів у ЧЗВ, розробки та впровадження спеціалізованої більш ефективної системи протипожежної охорони, так як щороку

у ЧЗВ відбуваються лісові пожежі, що негативно впливають на рівень екологічної безпеки зазначеної території. Тому одним із головних завдань є раннє виявлення причин виникнення лісових пожеж, мінімізація їх наслідків та забезпечення радіаційного захисту як учасників гасіння цих пожеж, так і населення від негативного впливу радіоактивної хмари. Основними причинами виникнення пожеж на території ЧЗВ є навмисний підпал (47%) і необережне поводження з вогнем (26%).

2. Розроблено методику дослідження виникнення та розвитку пожежі в приміщеннях ОУ, за допомогою якої можна визначити пожежну небезпеку ОУ з подальшим її впливом на довкілля. Розроблено методологічні засади наукового обґрунтування рівня екологічної небезпеки ОУ, що надало змогу прогнозувати ступінь впливу небезпечних радіаційних подій на довкілля. Доповнено, уточнено та конкретизовано принципи виконання аналізу безпеки СВЯП-1 з урахуванням міжнародного досвіду. Запропоновано алгоритм виконання аналізу безпеки експлуатації та критерії прийняття рішень з безпеки СВЯП-1. Доведено, що рішення про підвищення рівня безпеки СВЯП-1 має враховувати всі можливі аспекти, (нормативні, детерміністичні, ймовірнісні, радіаційні, експлуатаційні, економічні тощо). Набув подальшого розвитку метод аналізу ієрархій для ухвалення зваженого та обґрунтованого рішення, запропоновано вагові коефіцієнти з розглянутих аспектів, розроблено базові шкали і матриця для ухвалення рішень. Удосконалено методику дослідження лісових пожеж у ЧЗВ та радіаційно-екологічних наслідків від них. Застосовано метод чисельного моделювання поширення димової хмари з використанням чисельних моделей, що достатньо адекватно описують динаміку її утворення. Також визначено методику вимірювань РПЗ та контрольно-вимірювальне обладнання для проведення натуральних (польових) і лабораторних досліджень. Розроблено методику оцінки впливу радіаційних факторів під час лісових пожеж на організм людини.

3. Проведено моделювання викиду у повітря радіонуклідів під час пожежі на ОУ. Розраховано значення густини випадіння РПЗ під час локальної пожежі на ОУ. Знайдено характерні залежності хмари РПЗ. Візуалізовано густину поверхневого забруднення. Запропонована модель процесу тепломасообігу в СВЯП дає можливість із заданим значенням розрахувати теплотехнічну надійність об'єкта. Одержано результати досліджень основних аварійних процесів в БВ СВЯП-1. Проведено теплофізичний аналіз безпеки запроектої аварії з тривалим знеструмленням і накладенням некомпенсованої течії для басейну витримки СВЯП. Доведено, що без здійснення заходів з управління аварією вона може перейти у важко аварійну стадію. Розроблено інформаційну модель виникнення і розвитку лісової пожежі та схематичну структуру зони лісової пожежі. Отримано результати моделювання низової лісової пожежі хвойних лісів і розрахунку основних характеристик у залежності від маси ЛГМ. Підтверджено правильність вибору базової система рівнянь мезомасштабної моделі в атмосферному пограничному шарі для відтворення локальних атмосферних процесів на обмеженій території. Змодельовано динаміку переміщення димової хмари в просторі та зміни густини випадіння легких частинок РПЗ на сліді димового шлейфу.

4. Розроблено схему надходження РПЗ в організм людини та оцінено їх вплив. Отримані результати показують, що максимальна доза не перевищує 50 мЗв, а розмір ризику  $5 \cdot 10^{-5} \text{ рік}^{-1}$  під час локальної пожежі в ОУ. Прямі вимірювання аварійних викидів РПЗ під час пожежі в прим. 402/3 показали, що середні величини об'ємної активності радіонуклідів перевищували допустимі концентрації для персоналу категорії А, а під час пожежі в прим. 805/3 не перевершували нормативи. Встановлено, що ефективна інгаляційна доза, під час пожежі в прим. 402/3, може скласти 3,39 Зв, що більше допустимої індивідуальної дози внутрішнього опромінення персоналу категорії А, а під час пожежі в прим. 805/3 – на порядок менше. Доповнено, уточнено та конкретизовано принципи виконання аналізу безпеки ОУ з урахуванням міжнародного досвіду і досягнутого рівня безпеки. Запропоновано алгоритм виконання аналізу безпеки експлуатації та критерії прийняття рішень з безпеки ОУ. Рішення про підвищення рівня безпеки ОУ має враховувати всі можливі аспекти, (нормативні, детерміністичні, ймовірнісні, радіаційні, експлуатаційні, економічні тощо). В цьому разі необхідно звертатися до математичних моделей підтримки ухвалення рішень. Тому набув подальшого розвитку метод аналізу ієрархій для ухвалення зваженого та обґрунтованого рішення, запропоновано вагові коефіцієнти з розглянутих аспектів, розроблено базові шкали і матриця для ухвалення рішень. Запропонована методологія математичного моделювання технічного стану складного комплексу НБК–ОУ дозволяє з обґрунтованим ступенем точності оцінити основні показники його надійності.

5. Проведено оцінювання радіаційних небезпек СВЯП «мокрого» типу та їх екологічних наслідків, а саме: екологічних наслідків під час експлуатації об'єкта, безпеки басейну витримки в умовах невизначеності, надійності конструкції і теплофізичної безпеки басейну витримки, вибухопожежної небезпеки в процесі зберігання відпрацьованого ядерного палива.

6. Науково обґрунтовано доцільність застосування методології прикладного системного аналізу (системно-структурної парадигми) для дослідження процесу поведінки з РАВ, що надало змогу розуміти цей процес як систему зі статичними і динамічними властивостями та враховувати її в загальній системі комплексної екологічної безпеки.

7. Проведені натуральні дослідження лісових пожеж у ЧЗВ за допомогою сучасного аналітичного обладнання дозволили отримати показники радіоактивного забруднення навколишнього середовища. За результатами лабораторних досліджень змодельовані процеси високотемпературної сублімації горючого лісового матеріалу та виносу  $^{137}\text{Cs}$  у повітря. Проведений порівняльний аналіз результатів натуральних і лабораторних досліджень з відомими вогневими контрольованими лісовими пожежами показав незначну відмінність отриманих даних. Розраховано колективні дози опромінення критичної групи населення. Отримано дані про колективний радіаційний ризик ураження для населення в місцях, що піддалися забрудненню техногенними радіонуклідами. Визначено збиток від радіації для населення України від пожеж у лісах, забруднених техногенними радіонуклідами.

8. Розроблено концепцію побудови технічної системи екологічного

моніторингу ЧЗВ на основі НВЧ радіометра, що зможе забезпечити раннє виявлення небезпечних подій і ситуацій на території, що контролюється, та вчасно проводити превентивні заходи. Сформовано стратегічні напрями вдосконалення мобільної лабораторії комплексної оцінки та прогнозування надзвичайних ситуацій для забезпечення оперативного контролю радіаційного стану навколо РНО в аварійних і післяаварійних ситуаціях. Обґрунтовано концептуальні основи системи менеджменту еколого-радіаційних небезпек ЧЗВ, що дає змогу забезпечити інформаційно-технічну підтримку ступеня обґрунтованості прийняття управлінських рішень в критичних ситуаціях.

9. Окремі результати дисертаційної роботи (в основному методики та рекомендації) впроваджено в діяльність організацій і установ, що прямо або побічно мають відношення до проблеми екологічної безпеки ЧЗВ. Результати зазначених досліджень можуть бути застосовані і для інших РНО і не тільки ЧЗВ.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

– *статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:*

1. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Єременко С.А., Бикова О.В. Концепція мобільної лабораторії комплексної оцінки та прогнозування надзвичайних ситуацій. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2011. Т. 4.1, № 5. С. 7–9.

2. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Руденко О.В., Пруський А.В. Дослідження знаходження  $^{137}\text{Cs}$  в повітря при лісових пожежах в Чорнобильській зоні. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2011. Вип. 9. С. 5–10.

3. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Руденко О.В. Вивчення процесу надходження радіонуклідів у повітря при пожежах у лісах зони відчуження ЧАЕС. *Проблеми пожежної безпеки*. 2011. Вип. 30. С. 16–23.

4. Азаров С. І., Сидоренко В.Л., Литвинов Ю.В. Проблемні питання запобігання незаконного поводження з радіоактивними матеріалами в Україні. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2012. Вип. 2(54). С. 23–29. **Scopus**.

5. Азаров С.І., Руденко О.В., Сидоренко В.Л., Єременко С.А. Радіаційний ризик для населення від пожеж в лісах, забруднених чорнобильськими радіонуклідами. *Екологічна безпека і природокористування*. 2012. Вип. 9. С. 19–25.

6. Литвинов Ю.В., Азаров С.І., Сидоренко, В.Л. Оцінка радіаційного впливу при гасінні пожеж на об'єкті "Укриття". *Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості*. 2013. Вип. 2(46). С. 125–133.

7. Азаров С.І., Литвинов Ю.В., Сіднев О.Б., Сидоренко В.Л. Мобільний лабораторний комплекс радіаційного контролю. *Екологічні науки*. 2013. Вип. 4. С. 36–44.

8. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Серета Ю.П. Оцінка радіоактивного ризику при гасінні пожежі в Чорнобильській зоні. *Екологічна безпека і*



*природокористування*. 2015. Вип. 18. С. 12–20.

9. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Серета Ю.П. Радіаційні наслідки лісових пожеж в Україні. *Екологічні науки*. 2015. Вип. 2/2015(9). С. 148–153.

10. Сидоренко В.Л., Азаров С.І., Серета Ю.П. Оцінка радіаційної ситуації у Чорнобильській зоні відчуження після лісової пожежі. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2016. № 13. С. 122–128.

11. Ващенко В.М., Сидоренко В.Л., Кордуба І.Б. Методика розрахунку вивування  $^{137}\text{Cs}$  у Чорнобильській зоні відчуження після природних пожеж. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: *Механіко-технологічні системи та комплекси*. 2016. № 7(1179). С. 100–105.

12. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Демків А.М. Методика розрахунку вивування  $^{137}\text{Cs}$  у Чорнобильській зоні відчуження після природних пожеж. *Екологічні науки*. 2016. Вип. 3–4/2016(14–15). С. 18–24.

13. Сидоренко В.Л., Азаров С.І. Концептуальні засади розробки системи комплексного моніторингу зони радіаційної аварії. *Вісник Кременчуцького Національного університету імені Михайла Остроградського*. 2017. Вип. 1(2017). № 102. С. 82–87.

14. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Радіаційні та екологічні наслідки пожеж в Чорнобильській зоні відчуження. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2017. № 2(10)/2017. С. 26–34.

15. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Оцінка вибухопожежної небезпеки в процесі зберігання відпрацьованого ядерного палива. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2018. № 18. С. 81–87.

16. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Аналіз сценарію важкої аварії в басейні витримки відпрацьованого ядерного палива СВЯП-1. *Техногенно-екологічна безпека*. 2018. № 4(2/2018). С. 33–40.

17. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Застосування системного аналізу в сфері поводження з радіоактивними відходами. *Проблеми загальної енергетики*. 2018. № 2(53). С. 28–35.

18. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Моделювання процесу тепломасообміну в сховищі відпрацьованого ядерного палива. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія: *Технічні науки*. 2018. Том 29(68). № 3, 2018. Частина 2. С. 56–60.

19. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Оцінка теплофізичної безпеки басейну витримки СВЯП-1. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія: *Технічні науки*. 2018. Том 29(68). № 5, 2018. Частина 2. С. 100–103.

20. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Аналіз пожежної безпеки під час зберігання відпрацьованого ядерного палива. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2018. № 3/2018. С. 5–12.

21. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Оцінка безпеки об'єкта «Укриття» в процесі перетворення на екологічно безпечну систему. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. № 3(58). С. 55–59.

– статті у наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію:

22. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Методика оцінки надійності конструкції басейну витримки СВЯП-1 Чорнобильської АЕС. *Magyar Tudományos Journal* (Budapest, Hungare). 2018. № 18 (2018). С. 43–49.

23. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Оцінка екологічних наслідків під час експлуатації мокрого сховища відпрацьованого ядерного палива. *East European Scientific Journal* (Warsaw, Poland). 2018. № 8(36) 2018 part 1. С. 45–52.

24. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Розробка методу оцінки безпеки басейну витримки в умовах невизначеності. *Magyar Tudományos Journal*. (Budapest, Hungare). 2018. № 19 (2018). С. 44–51.

– **колективні монографії:**

25. Наукові засади захисту населення і територій від наслідків лісових пожеж з радіаційно небезпечними факторами: монографія / С.І. Азаров, С.А. Єременко, В.Л. Сидоренко, О.М. Смірнова, М.В. Білошицький, Є.А. Власенко, А.В. Пруський, Ю.П. Середя; за заг. ред. П.Б. Волянського. Київ: ТОВ "Інтердрук", 2016. 203 с.

26. Мінімізація радіаційних наслідків лісових пожеж після Чорнобильської катастрофи на основі еколого-інформаційного моніторингу: монографія / О.І. Бондар, С.І. Азаров, В.М. Ващенко, В.І. Паламарчук, В.Л. Сидоренко; за заг. наук. ред. О.І. Бондаря. Херсон: Гринь Д.С., 2016. 300 с.

27. Техногенно-екологічні наслідки Чорнобильської катастрофи: монографія / С.І. Азаров, С.А. Єременко, В.Л. Сидоренко, М.В. Білошицький, Є.А. Власенко, А.В. Пруський; за заг. ред. П.Б. Волянського. Київ: МПБП "Гордон", 2019. 455 с.

28. Чорнобиль четверте десятиліття: монографія / О.І. Бондар, В.М. Ващенко, С.І. Азаров, В.Л. Сидоренко, Є.А. Лоза, І.Б. Кордуба, В.О. Тарасов, О.А. Улицький, В.М. Єрмаков, Ж.І. Патлашенко, О.В. Луньова. Київ: Підприємство "НАІР", 2019. 407 с.

– **публікації, в інших виданнях:**

29. Сидоренко В.Л., Середя Ю.П., Шевченко І.О., Азаров С.І. Оцінка можливого радіаційного ризику при гасінні пожежі у Чорнобильській зоні відчуження. *Науковий збірник Інституту державного управління у сфері цивільного захисту*. 2015. № 3. С. 105–117.

30. Сидоренко В.Л., Середя Ю.П., Мінська Ю.Ю., Азаров С.І. Теоретичні основи розробки системи комплексного моніторингу зони радіаційної аварії. *Науковий збірник Інституту державного управління у сфері цивільного захисту*. 2015. № 3. С. 117–131.

31. Азаров С., Сидоренко В., Єременко С., Бикова О. Концепція мобільної лабораторії комплексної оцінки та прогнозування надзвичайних ситуацій. *Надзвичайна ситуація*. 2014. № 6(199). С. 48–49.

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

32. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Руденко О.В. Дослідження надходження радіонуклідів при лісових пожежах в Чорнобильській зоні. *Двадцять п'ять років чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього: зб. доп. міжнар. конф. Ч. 2.* (Київ, 20–22 квітня 2011 р.). Київ, 2011. С. 273–277.

33. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Єременко С.А., Бикова О.В. Концепція



мобільної лабораторії комплексної оцінки та прогнозування надзвичайних ситуацій. *Техногенна безпека: теорія, практика, інновації*: зб. тез другої міжнар. наук.-прак. конф. (Львів, 12–13 травня 2011 р.). Львів, 2011. С. 3–5.

34. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Руденко О.В. Оцінка коефіцієнту ресуспензії радіонуклідів при лісових пожежах в Чорнобильській зоні. Тез. доп. XXII щоріч. наук. конф. ІЯД НАН України. (Київ, 25–28 січня 2011 р.). Київ, 2011. С. 189–190.

35. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Єременко С.А. Аналіз математичних моделей прогнозування екологічних наслідків забруднення довкілля при аварійних викидах. *Можливості використання методів механіки для розв'язання питань безпеки в умовах надзвичайних ситуацій*: XI наук.-прак. конф. (Харків, 7 грудня 2012 р.). Харків, 2012. С. 76–78.

36. Азаров С.І., Литвинов О.Ю., Сидоренко В.Л., Єременко С.А. Оцінка радіаційного ризику для населення від пожеж в лісах, забруднених радіонуклідами чорнобильського походження. *Радіоекологія-2013. Чорнобиль–Фукусіма. Наслідки*: матер. наук.-прак. конф. (Київ, 26–28 квітня 2013 р.). Київ, 2013. С. 184–186.

37. Азаров С.І., Сидоренко В.Л. Комплексний екологічний моніторинг навколишнього середовища в регіоні за допомогою мобільної лабораторії. *Ідеї академіка В.І. Вернадського та проблеми сталого розвитку регіонів*: матер. XV міжнар. наук.-прак. конф. (Кременчук, 7–8 червня 2013 р.). Кременчук, 2013. С. 62.

38. Єременко С.А., Сидоренко В.Л., Азаров С.І., Білошицький М.В., Смірнова О.М., Власенко Є.А., Пруський А.В. Радіоекологічні аспекти лісових пожеж чорнобильської зони. *Радіоекологія-2014*: зб. матер. наук.-прак. конф. з міжнар. уч. (Київ, 24–26 квітня 2014 р.). Київ, 2014. С. 240–244.

39. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Серeda Ю.П. Радіаційні наслідки лісових пожеж в Україні. Тез. доп. XXII щоріч. наук. конф. ІЯД НАН України. (Київ, 26–30 січня 2015 р.). Київ, 2015. С. 189–190.

40. Серeda Ю.П., Сидоренко В.Л., Азаров С.І. Сучасний стан радіоактивного забруднення лісів. *Екологія і природокористування в системі оптимізації відносин природи і суспільства*: зб. тез. II міжнар. наук.-прак. інтер.-конф. (Тернопіль, 19–20 березня 2015 р.). Тернопіль, 2015. С. 121–123.

41. Серeda Ю.П., Сидоренко В.Л. Аналіз лісопожежної ситуації та стану протипожежної охорони лісів Чорнобильської зони. *Екологічна безпека держави*: Зб. тез доп. IX всеукр. наук.-прак. конф. молод. учених та студ. (Київ, 16 квітня 2015 р.). Київ: НАУ, 2015. С. 110–111.

42. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Серeda Ю.П. Аналіз методів моделювання розвитку лісових пожеж, забруднених технологічними радіонуклідами. *Радіоекологія-2015*: зб. матер. наук.-прак. конф. (Київ, 24–26 квітня 2015 р.). Київ, 2015. С. 146–149.

43. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Серeda Ю.П., Демків А.М., Власенко Є.А. Огляд існуючих методів досліджень радіаційних наслідків від пожеж в лісах, забруднених техногенними радіонуклідами: *Радіоекологія-2015*: зб. матер. наук.-прак. конф. (Київ, 24–26 квітня 2015 р.). Київ, 2015. С. 154–159.

44. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Серeda Ю.П. Оцінювання радіаційного ризику при гасінні пожеж у лісах Чорнобильській зоні. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи*: матер. II міжнар. наук.-прак. конф. (Львів, 4–6 листопада 2015 р.). Львів, 2015. С. 117–120.

45. Сидоренко В.Л., Азаров С.І., Серeda Ю.П. Концепція системи контролю за лісопожежною ситуацією у зоні Чорнобильській зоні. Зб. наук. праць V всеукр. з'їзд екологів з міжнар. уч. (Вінниця, 23–26 вересня 2015 р.). Київ, 2015. С. 221.

46. Сидоренко В.Л., Азаров І.С., Мінська Ю.Ю. Екологічний моніторинг зони надзвичайної ситуації за допомогою безпілотного літального апарату. Зб. наук. праць V всеукр. з'їзд екологів з міжнар. уч. (Вінниця, 23–26 вересня 2015 р.). Київ, 2015. С. 249.

47. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Серeda Ю.П. Результати експериментальних лабораторних досліджень розповсюдження  $^{137}\text{Cs}$  при згорянні зразків лісової біомаси. Тези доп. XXIII щоріч. наук. конф. ІЯД НАН України. (Київ, 1–5 лютого 2016 р.). Київ, 2016. С. 200–201.

48. Серeda Ю.П., Сидоренко В.Л. Охорона лісів в системі забезпечення якісного життя суспільства. *Екологія і природокористування в системі оптимізації відносин природи і суспільства*: матер. III міжнар. наук.-прак. конф. Ч. 1. (Тернопіль, 24–25 березня 2016 р.). Тернопіль, 2016. С. 170–172.

49. Серeda Ю.П., Сидоренко В.Л. Аналіз загроз лісам України. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*: зб. тез. 4-ої міжнар. конгр. (Львів, 21–23 вересня 2016 р.). Львів, 2016. С. 55.

50. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Демків А.М. Розробка радіоекологічної ГІС у районі розташування радіаційно небезпечних об'єктів. *Проблеми екологічної безпеки*: зб. тез доп. XIV міжнар. наук.-техн. конф. (Кременчук, 12–14 жовтня 2016 р.). Кременчук, 2016. С. 13.

51. Демків А.М., Сидоренко В.Л. Системний підхід до управління екологічними ризиками на об'єктах підвищеної екологічної небезпеки. *Екологічна безпека держави*: Зб. тез доп. XI всеукр. наук.-прак. конф. молод. учених та студ. (Київ, 20 квітня 2017 р.). Київ: НАУ, 2017. С. 43.

52. Серeda Ю.П., Сидоренко В.Л. Про можливість використання НВЧ-радіометра для захисту лісів від пожеж. *Екологічна безпека держави*: Збір. тез доп. XI всеукр. наук.-прак. конф. молод. учених та студ. (Київ, 20 квітня 2017 р.) Київ, 2017. С. 225–226.

53. Азаров І.С., Сидоренко В.Л., Демків А.М., Серeda Ю.П. Аналіз методів математичного моделювання екологічної безпеки. *Проблеми екологічної безпеки*: тези доп. XV міжнар. наук.-техн. конф. (Кременчук, 11–13 жовтня 2017 р.). Кременчук, 2017. С. 11.

54. Сидоренко В.Л., Серeda Ю.П., Демків А.М., Азаров І.С. Існуючі підходи до аналізу екологічного ризику. *Проблеми екологічної безпеки*: тези доп. XV міжнар. наук.-техн. конф. (Кременчук, 11–13 жовтня 2017 р.). Кременчук, 2017. С. 66.

55. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Комплексний аналіз

техногенної безпеки сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП-1) на ЧАЕС. *Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація*: матер. наук.-прак. сем. (Харків, 7 лютого 2018 р.). Харків: НУЦЗУ, 2018. С. 6–8.

56. Сидоренко В.Л., Задунай О.С., Азаров І.С. Аналіз існуючих методів оцінки ризику аварій на потенційно небезпечних об'єктах. *Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація*: матер. наук.-прак. сем. (Харків, 7 лютого 2018 р.). Харків: НУЦЗУ, 2018. С. 59–61.

57. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Пожежна безпека сховища відпрацьованого ядерного палива. *Пожежна безпека: проблеми та перспективи*: зб. тез доп. Всеукр. наук.-прак. конф. (Харків, 1–2 березня 2018 р.). Харків: НУЦЗУ, 2018. С. 153–155.

58. Сидоренко В.Л., Задунай О.С., Азаров І.С. Система інформаційної підтримки процедур прийняття управлінських рішень щодо попередження пожеж у Чорнобильській зоні відчуження. *Пожежна безпека: проблеми та перспективи*: зб. тез доп. Всеукр. наук.-прак. конф. (Харків, 1–2 березня 2018 р.). Харків: НУЦЗУ, 2018. С. 200–203.

59. Сидоренко В.Л., Азаров С.І., Власенко Є.А. Удосконалення національної системи контролю за аварійно-радіаційним станом об'єктів Чорнобильської зони відчуження. *Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України*: матер. IV Всеукр. заоч. наук.-прак. конф. (Київ, 20 квітня 2018 р.). Київ: НПУ імені М.П. Драгоманова, 2018. С. 116–117.

60. Сидоренко В.Л., Азаров С.І. Питання техногенної безпеки в процесі зняття ЧАЕС з експлуатації. *Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища (INUDECО 18)*: матер. III міжнар. конф. (Славутич, 25–27 квітня 2018 р.). Чернігів: ЧНТУ, 2018. С. 327–330. — 1.2.1.

61. Сидоренко В.Л., Азаров С.І. Оцінка стану пожежної безпеки об'єкта "Укриття". *Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики і відновлення навколишнього середовища (INUDECО 18)*: матер. III міжнар. конф. (Славутич, 25–27 квітня 2018 р.). Чернігів: ЧНТУ, 2018. С. 331–335.

62. Сидоренко В.Л., Серета Ю.П., Азаров С.І. Радіоекологічні наслідки пожеж в Чорнобильській зоні відчуження. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: зб. наук. ст. XIV міжнар. наук.-прак. конф. (Харків, 10–14 вересня 2018 р.). Харків, 2018. С. 283–288.

63. Азаров С.І., Сидоренко В.Л. Оцінка ймовірності виникнення лісових пожеж в Чорнобильській зоні відчуження. *Актуальні питання техногенної та цивільної безпеки України*: матер. I всеукр. наук. конф. (Миколаїв, 21–22 вересня 2018 р.). Миколаїв, 2018. С. 114–117.

64. Сидоренко В.Л., Азаров С.І. Багатопараметрична модель зміни технічного стану складного комплексу «Новий безпечний конфайнмент – об'єкт "Укриття"». *Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища (INUDECО 2019)*: матер. IV міжнар. конф. (Славутич, 24–26 квітня 2019 р.). Чернігів: ЧНТУ, 2019. С. 221–227.

**Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації:**

65. Азаров С.І., Литвинов Ю.В., Паламарчук В.І., Сидоренко В.Л. Забезпечення життєдіяльності населення у складних радіологічних умовах. *Науковий збірник Інституту державного управління у сфері цивільного захисту*. 2013. № 1. С. 117–125.

66. Азаров С.І., Паламарчук В.І., Сидоренко В.Л. Деякі аспекти охорони здоров'я населення в складних радіоекологічних умовах. *Екологічні науки*. 2014. Вип. 5. С. 5–11.

67. Азаров І., Сидоренко В., Серeda Ю. Використання безпілотного літального апарата як засобу дистанційного моніторингу надзвичайних ситуацій. *Безпека життєдіяльності*. 2015. № 2. С. 30.

68. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Серeda Ю.П. Оцінка можливого токсичного ураження при гасінні пожеж у Чорнобильській Зоні відчуження. *Проблеми техногенної безпеки в Україні та світі (до 30-ї річниці аварії на Чорнобильській АЕС)*: зб. наук. праць міжнар. наук.-прак. конф. (Запоріжжя, 1 березня 2016 р.). Запоріжжя, 2016. С. 13–20.

69. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Серeda Ю.П. Порівняльний аналіз радіоекологічних наслідків аварій на ЧАЕС та «Фукусіма-1». *Радіоекологія-2017*: зб. ст. наук.-прак. конф. з міжнар. уч. (Київ, 24–26 квітня 2017 р.) Київ, 2017. С. 29–32.

70. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Порівняльний аналіз радіаційно-екологічних наслідків важких аварій на ЧАЕС та Фукусіма-1. *East European Scientific Journal*. (Warsaw, Poland). 2018. № 10(38), 2018 part 2. С. 59–67.

71. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Перспективи використання безпілотних літальних апаратів під час проведення ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Том 29(68). № 1, 2018. Частина 1. С. 11–16.

72. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Система контролю вибухопожежонебезпечних ситуацій в приміщеннях сховища відпрацьованого ядерного палива. *Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика*: матер. V міжнар. наук.-прак. конф. (Херсон, 13–15 вересня 2018 р.). Херсон, 2018. С. 127–132.

73. Сидоренко В.Л., Серeda Ю.П., Азаров С.І. Деякі аспекти імітаційного моделювання екологічних систем. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. європейський досвід і перспективи*: Матер. III міжнар. наук.-прак. конф. (Львів, 14 вересня 2018 р.). Львів, 2018. С. 74.

74. Сидоренко В.Л., Серeda Ю.П., Азаров І.С. Применение авиационной системы для патрулирования и мониторинга лесных пожаров в Чернобыльской зоне. *Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: методы, технологии, проблемы и перспективы*: сб. матер. II Междунар. заоч. науч.-прак. конф. (Беларусь, Минск, 28 июня 2018 г.). Минск, 2018. С. 151–155.

75. Азаров С.І., Єременко С.А., Сидоренко В.Л. Весняний період – початок пожежонебезпечного сезону. *Надзвичайна ситуація+*. 2018. № 4. С. 18–20.

## АНОТАЦІЯ

**Сидоренко В. Л. Екологічна безпека Чорнобильської зони відчуження: техноприродні загрози від радіаційно небезпечних об'єктів і явищ.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 «Екологічна безпека» (технічні науки). – Національний авіаційний університет, Київ, 2020.

В результаті проведення комплексу теоретичних і експериментальних досліджень у дисертаційній роботі запропоновано та обґрунтовано нові наукові положення, висновки та рекомендації, що розкривають особливості та закономірності впливу техноприродних загроз від радіаційно небезпечних об'єктів і явищ на рівень екологічної безпеки Чорнобильської зони відчуження.

Проаналізовано еколого-радіаційний стан Чорнобильської зони відчуження та загрози його погіршення, методики дослідження впливу радіаційно небезпечних об'єктів і явищ Чорнобильської зони відчуження на довкілля та математичні моделі прогнозування їх екологічних наслідків. Виконано моделювання викиду у повітря радіонуклідів під час пожежі на об'єкті «Укриття», небезпечних процесів у сховищі відпрацьованого ядерного палива, викиду радіоактивних продуктів згоряння із зони лісової пожежі.

Проведено оцінювання радіаційних небезпек об'єкта «Укриття», техногенно-екологічних небезпек сховища відпрацьованого ядерного палива «мокрого» типу, радіаційних небезпек лісових пожеж та їх екологічних наслідків. Науково обґрунтовано доцільність застосування методології прикладного системного аналізу для дослідження процесу поведінки з радіоактивними відходами. Розроблено наукові засади систем моніторингу і менеджменту еколого-радіаційних небезпек Чорнобильської зони відчуження.

**Ключові слова:** екологічна безпека, Чорнобильська зона відчуження, техноприродні загрози, лісові пожежі, радіаційно небезпечні об'єкти.

## ANNOTATION

**Sydorenko V.L. Ecological safety of the Chornobyl Exclusion Zone: techno-natural threats from radiation-hazardous objects and phenomena.** – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 21.06.01 «Ecological safety» (technical sciences). – National Aviation University, Kyiv, 2020.

As a result of a set of theoretical and experimental studies the dissertation proposed and substantiated new scientific provisions, conclusions and recommendations that reveal the peculiar features and patterns of impact of techno-natural threats from radiation-hazardous objects and phenomena on the level of environmental safety of the Chernobyl Exclusion Zone. This makes it possible to develop a scientific basis for the creation of new modern systems of environmental monitoring and management of the study area. The materials of the work have been tested, implemented and confirmed by the relevant acts. The main results of the work are as follows.

The ecological and radiation conditions of the Chornobyl Exclusion Zone and the

threat of its deterioration are analyzed. It has been determined that the greatest ecological and radiation threat to the environment is posed by potentially dangerous objects located in the Chernobyl Exclusion Zone, especially such objects as «the Shelter» and the Spent Fuel Storage Facility, where an accident involving the release of radioactive substances is possible. It is noted that one of the main tasks is an early detection of the causes of forest fires, minimization of their consequences and ensuring radiation protection of the population from the negative effects of radioactive clouds.

A method for studying the occurrence and spreading of fire in the premises of «the Shelter» has been developed. The decision-making algorithm is implemented, which in the general case includes the stages of object safety identification, determination and analysis of decisions for compliance with the established requirements and criteria, implementation and monitoring of the effectiveness of decisions. The method of analysis of hierarchies for decision-making and informed decision-making is applied, weight factors of the considered aspects are offered, basic scales and a matrix for decision-making are developed. The method of research of forest fires in the Chernobyl Exclusion Zone as well as ecological and radiation consequences from them is determined. Also, the methods of measuring radioactive combustion products and control and measuring equipment for natural (field) and laboratory research are determined.

A mathematical modeling of radionuclide emissions during a fire at «the Shelter» facility was performed. A model of the heat and mass circulation process in the spent nuclear fuel storage is proposed, which makes it possible to calculate the thermal reliability of objects under the influence of different types of loads with a given value. Model results of ground forest fires of coniferous forests and calculations of basic characteristics depending on the mass of forest combustible materials are obtained. The dynamics of smoke cloud movement in space and changes in the density of precipitation of volatile particles of radioactive combustion products on the trail of the smoke plume are modeled.

According to the developed model of accumulation of radioactive combustion products in the human body, an assessment of their impact on the environment was carried out. The methodology for mathematical modeling of the technical condition of the complex «New safe confinement – the "Shelter"» is offered, which makes it possible to estimate the basic indicators of its reliability with a reasonable degree of accuracy, namely: probability and average time of trouble-free operation, gamma-percent resource or operating time during which the object does not reach the limit state with a given probability, the intensity of failures.

The assessment of radiation hazards of the spent nuclear fuel storage of the «wet» type and their environmental consequences, namely: environmental consequences during the facility's operation, safety of the fuel pool in conditions of uncertainty, structural reliability and thermophysical safety of the fuel pool, explosion hazards during the storage of spent nuclear fuel. The expediency of using the methodology of applied systems analysis to improve the process of radioactive waste management has been scientifically substantiated, which makes it possible to understand this process as a system with static and dynamic properties and take it into account in the general system of integrated environmental safety.

The natural research of forest fires in the Chernobyl Exclusion Zone was carried out with the help of modern analytical equipment, which made it possible to obtain the values of radioactive contamination of the environment. According to the results of laboratory research, the processes of high-temperature sublimation of combustible forest material and removal of radioactive cesium into the air are modeled. A comparative analysis of the results of natural and laboratory studies with controlled forest fires was carried out. Radiation risk assessment during firefighting was performed. The radiation risk and the dose load for the population during forest fires with a radiation hazard factor are determined.

Conceptual foundations for the development of special systems of control over the forest fire situation in the Chernobyl exclusion zone by means of an ultrahigh-frequency radiometer have been formed. A variant of creating a mobile laboratory complex for operational control over radiation conditions around radiation-hazardous objects in emergency and post-emergency situations, remote and contact control over radionuclides in air, soil, water, etc. to make management decisions to minimize the consequences of radiation accidents and emergencies related to radiation-hazardous factors have been proposed. Conceptual foundations of ensuring ecological and radiation safety on the basis of the created structural scheme of control and management of heavy radiation accidents have been developed.

The practical significance of the obtained results lies in the implementation of the developed or improved methods, strategic directions and concepts for the monitoring and management of the state of ecological safety in the Chernobyl Exclusion Zone. With the direct participation of the author some results of the dissertation were implemented in the activities of organizations and institutions that are directly or indirectly related to the problem of environmental safety of the territory.

**Key words:** ecological safety, Chernobyl Exclusion Zone, techno-natural threats, forest fires, radiation-hazardous objects.