

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ
РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ КАК ОСНОВНОЙ ЭЛЕМЕНТ
ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ.**

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ РАДІАЦІЙНОЇ
ОБСТАНОВКИ ЯК ОСНОВНИЙ ЕЛЕМЕНТ ДЛЯ БЕЗПЕКИ
НАСЕЛЕННЯ.**

**AUTOMATED RADIATION MONITORING SYSTEM AS BASIC ELEMENT
FOR POPULATION SAFETY.**

Научный руководитель – кафедра АЭС; доцент, кандидат технических наук -
Высоцкий.Ю.И, магистр – Шеховцов Р.О

Науковий керівник - кафедра АЕС; доцент, кандидат технічних наук -
Висоцький.Ю.І, магістр – Шеховцов Р.О

Supervisor - department of NPP; associate professor, candidate of technical sciences - Y.I
Vysotsky, master - R.O. Shekhovtsov

Аннотация. В настоящее время в Украине радиационный контроль обеспечивается Системой экологического мониторинга АЭС. Одной из ее составляющих является сеть автоматизированных систем контроля радиационной обстановки в районе расположения АЭС (АСКРО), которая функционирует при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации и авариях. Необходимость АСКРО стала очевидной после аварии на Чернобыльской АЭС, когда решения по защите населения принимались в отсутствие исчерпывающей информации о радиационной обстановке на местности. Авария дала импульс к развитию систем поддержки принятия решений, основанных на модельных расчетах и автоматизированном контроле радиационной обстановки на местности, как в нашей стране, так и за рубежом.

Именно поэтому в статье рассмотрена автоматизированная система контроля радиационной обстановки в зоне наблюдения АЭС. Сформулированы задачи системы в соответствии с документами и нормами МАГАТЭ, а также направления ее дальнейшего развития с учетом опыта эксплуатации подобных зарубежных систем, в частности, системы поддержки принятия решений SPEEDI на АЭС «Фукусима-1» (Япония). В статье описан

подход к защите населения с использованием АСКРО АЭС, основанный в соответствии с документами ДП НАЕК Энергоатом и стандартами МАГАТЭ. Приведены рекомендации к постановке измерительной задачи для выполнения основных функций АСКРО АЭС как системы поддержки принятия решений.

Ключевые слова: радиационный мониторинг, система контроля, атомная электростанция.

Анотація. В даний час в Україні радіаційний контроль забезпечується Системою екологічного моніторингу АЕС. Однією з її складових є мережа автоматизованих систем контролю радіаційної обстановки в районі розташування АЕС (АСКРО), яка функціонує при нормальній експлуатації, порушеннях нормальної експлуатації і аваріях. Необхідність АСКРО стала очевидною після аварії на Чорнобильській АЕС, коли рішення по захисту населення приймалися за відсутності вичерпної інформації про радіаційну обстановку на місцевості. Аварія дала імпульс до розвитку систем підтримки прийняття рішень, заснованих на модельних розрахунках і автоматизованому контролю радіаційної обстановки на місцевості, як в нашій країні, так і за кордоном.

Саме тому в статті розглянута автоматизована система контролю радіаційної обстановки в зоні спостереження АЕС. Сформульовано завдання системи відповідно до документами і нормами МАГАТЭ, а також напрямки її подальшого розвитку з урахуванням досвіду експлуатації подібних зарубіжних систем, зокрема, системи підтримки прийняття рішень SPEEDI на АЕС «Фукусіма-1» (Японія). У статті описано підхід до захисту населення з використанням АСКРО АЕС, заснований відповідно до документами ДП НАЕК Энергоатом і стандартами МАГАТЭ. Наведено рекомендації до постановки вимірювальної завдання для виконання основних функцій АСКРО АЕС як системи підтримки прийняття рішень.

Ключові слова: радіаційний моніторинг, система контролю, атомна електростанція.

Annotation. At present, in Ukraine, radiation monitoring is provided by the NPP Environmental Monitoring System. One of its components is a network of automated systems for monitoring the radiation situation in the area of the NPP (ASKRO), which operates during normal operation, violations of normal operation and accidents. The need for ASKRO became apparent after the Chernobyl accident, when decisions to protect the population were made in the absence of comprehensive information about the radiation situation on the ground. The accident gave an impetus to the development of decision support systems based on model calculations and automated monitoring of the radiation situation on the ground, both in our country and abroad.

That is why the article considers an automated system for monitoring the radiation situation in the observation zone of nuclear power plants. The objectives of the system are formulated in accordance with the IAEA documents and standards, as well as the directions for its further development, taking into account the experience of operating such foreign systems, in particular, the SPEEDI decision support system at the Fukushima-1 NPP (Japan). The article describes the approach to protecting the population using ASKRO NPP, based in accordance with the documents of the NEAK Energoatom Subsidiary and IAEA standards. Recommendations are given for the

formulation of the measurement task for the implementation of the basic functions of ASKRO NPP as a decision support system.

Key words: radiation monitoring, control system, nuclear power plant.

Аварія на АЕС «Фукусіма-1» (Японія), яка призвела до радіаційного забруднення навколишнього середовища і евакуації населення, підтвердила необхідність функціонування в районі розміщення АЕС системи контролю радіаційної обстановки, яка оперативно і автономно реєструє радіаційні показники, необхідні для прийняття рішень про захист людей в випадку аварій. Аналіз цієї аварії встановив додаткові вимоги до розробки подібних систем, які повинні бути враховані.

ВСТУП.

Аварія на АЕС «Фукусіма-1» (Японія), яка призвела до радіаційного забруднення навколишнього середовища і евакуації населення, підтвердила необхідність функціонування в районі розміщення АЕС системи контролю радіаційної обстановки, яка оперативно і автономно реєструє радіаційні показники, необхідні для прийняття рішень про захист людей в випадку аварій. Аналіз цієї аварії встановив додаткові вимоги до розробки подібних систем, які повинні бути враховані.

Задачі АСКРО і напрямки її розвитку. Основними завданнями АСКРО відповідно до національно регулюючих документів та рекомендаціями МАГАТЕ є:

-вимір в автоматизованому режимі параметрів, що характеризують радіаційний стан в зоні спостереження АЕС (радіаційний контроль навколишнього середовища) при всіх режимах експлуатації і аваріях;

-отримання інформації, яка необхідна для відновлення активності радіонуклідів, що надійшли за межі АЕС при запроектних аваріях;

-інформаційна підтримка груп радіаційної розвідки;

-аналіз метеорологічного і радіаційного контролю навколишнього середовища для складання карт щільності радіоактивних випадінь і дози опромінення населення з використанням відповідних моделей і комп'ютерних засобів;

-виявлення областей, які потребують евакуації, переселення населення або обмежень в споживанні продуктів харчування.

Згідно з рекомендаціями МАГАТЕ первинні заходи захисту населення при аварії приймаються в зонах аварійного планування, виходячи зі стану реакторної установки (системи класифікації аварії). Подальше втручання ґрунтується на даних про зміну радіаційної обстановки.

Таким чином, автоматизованої паспортної системи радіаційного контролю та заснованої на її даних системі підтримки прийняття рішень відводиться роль виявлення пріоритетних (першочергових) напрямків втручання і уточнення рекомендацій для захисту населення за межами аварійних зон.

Даний підхід узгоджується з галузевим документом ДП НАЕК Енергоатом, згідно з яким на першому етапі рішення про захисні заходи приймаються на основі аналізу порушень безпеки енергоблоку і оцінки очікуваного викиду радіонуклідів в навколишнє середовище. На другому етапі підготовки захисних заходів параметри джерела викиду уточнюються за даними АСКРО.

Система аварійного реагування на АЕС «Фукусіма» (Японія). Системи підтримки прийняття рішень про захист населення в разі радіаційної аварії, засновані на спільному використанні модельних розрахунків і даних автоматизованої мережі постів контролю, отримали широке застосування за кордоном (RODOS, ARGOS, NARAC, MACCS2, SPEEDI).

До аварії на АЕС «Фукусіма-1» такі системи відпрацьовувалися тільки в тестовому режимі або під час протиаварійних тренувань і навчань. Після 11 березня 2011 році одна з таких систем підтримки прийняття рішень SPEEDI використовувалася системою аварійного реагування Японії на практиці.

Відповідно до національної системою аварійного реагування Японії рішення про захист населення повинні були ґрунтуватися на оцінках прогнозованої дози опромінення, що розраховується за допомогою програмно-технічного комплексу SPEEDI (рис. 1, а).

До землетрусу система налічувала 218 постів спостереження на всій території, 23 з них розташовувалися в префектурі Фукусіма. За допомогою комплексу SPEEDI в автоматичному режимі на серверах Технологічного центру ядерної безпеки моделювалося поширення радіоактивної хмари на основі параметрів, отриманих з використанням допоміжної системи аварійного реагування, і даних постів радіаційного моніторингу.

В результаті землетрусу 11 березня 2011 магнітудою 9 балів за шкалою Ріхтера стався втрата зовнішнього електропостачання енергоблоків.

Перші три енергоблоки були зупинені, енергопостачання внутрішніх потреб АЕС здійснювалося за допомогою резервних дизель-генераторів. Землетрус викликав цунамі з висотою хвилі на узбережжі близько 15 м, що призвело до затоплення і відмови в роботі всіх систем резервного електропостачання.

Апаратура системи радіаційного контролю, розташована на проммайданчику АЕС «Фукусіма-1», продовжувала функціонувати після землетрусу і до впливу цунамі. Однак після обвалення на об'єкти АЕС цунамі майже всі стаціонарні технічні засоби радіаційного і метеоконтроля стали непрацездатні внаслідок втрати джерел живлення. За рахунок автономних джерел живлення окрема апаратура проводила вимірювання до 12 березня.

В результаті аварії дані допоміжної системи аварійного реагування з інформацією про стан реакторної установки АЕС «Фукусіма-1», що включають оцінку джерела викиду, перестали надходити в Технологічний центр ядерної безпеки внаслідок втрати зовнішнього електропостачання і відсутності підключення до автономного джерела живлення. Крім того, менш ніж через 2 години після землетрусу з невідомої причини сталася відмова каналу зв'язку між АЕС «Фукусіма-1» і комплексом SPEEDI на ділянці між внастанційним аварійним центром і допоміжною системою аварійного реагування.

Це призвело до нестачі вихідних даних для виконання розрахунків. Проблеми з електропостачанням також порушили функціонування вимірювальної апаратури, встановленої на постах спостереження системи SPEEDI. 11 березня 2011 р безпосередньо після землетрусу жоден з датчиків, розташованих в префектурі Фукусіма і пов'язаною з нею префектурі Міягі, не передавав інформацію в систему.

З урахуванням масштабів стихійного лиха не можна виключати, що масова відмова технічних засобів на постах спостереження системи SPEEDI був обумовлений в тому числі пошкодженням вимірювальної апаратури і обладнання для передачі даних в результаті сейсмічного впливу. Відмова роботи системи SPEEDI привів до того, що рішення про евакуацію і укритті населення приймалися на основі стану станції, а не на прогнозованої дозі.

Аналіз аварії на АЕС «Фукусіма-1» показав, що система підтримки прийняття рішень, заснована на комплексі SPEEDI, виявилася непрацездатною через відсутність надійних і автономних засобів електроживлення постів радіаційного моніторингу, а також резервування каналів зв'язку і передачі даних між цими постами і сервером обробки даних. Отже, одним з пріоритетних напрямків розвитку систем підтримки прийняття рішень є підвищення надійності і стійкості АСКРО до природних і техногенних подій. Вимоги щодо підвищення надійності АСКРО до природних і техногенних подій знайшли своє

відображення у вітчизняній нормативній базі, згідно з якою вона відноситься до систем, важливих для безпеки.

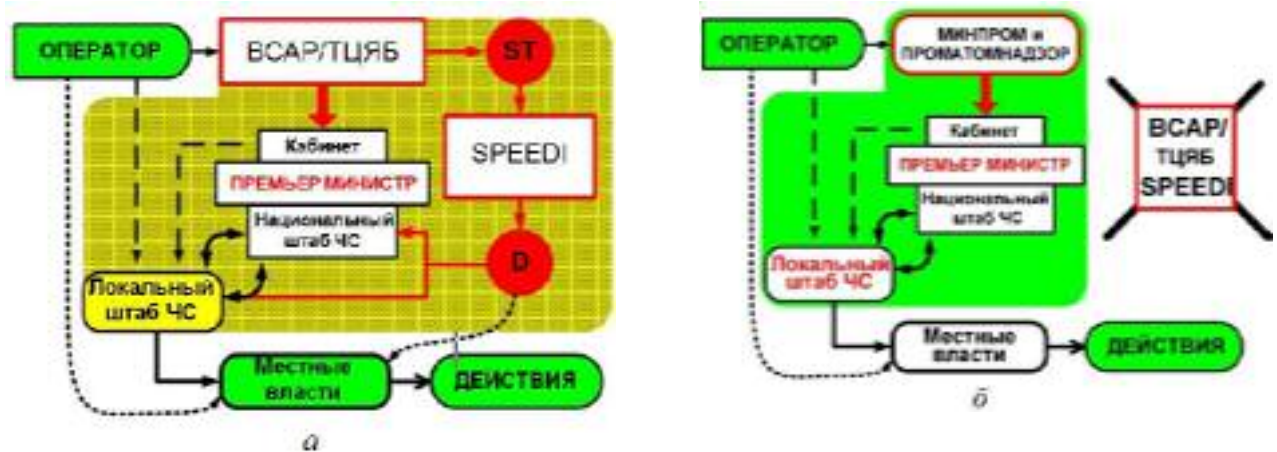


Рис. 1. Система аварійного реагування до (а) і во время розвитку аварії на АЕС «Фукусима» (Японія) (б)

Ці системи повинні бути стійкі до природних (землетруси, урагани, смерчі, повені) і техногенним подій, а також інших дій, можливим в разі виникнення аварії на АЕС. Принципово важливий аспект функціонування АСКРО- обробка отриманої вимірювальної інформації з метою вироблення рекомендацій для захисту населення і орієнтації груп аварійного реагування. Для цього необхідна розробка відповідного методичного та програмно-технічного забезпечення підтримки прийняття рішень щодо захисту населення, що використовує дані АСКРО.

Реалізація такого моніторингу можлива тільки при стратегічному розташуванні автоматичних постів контролю з передачею даних в аварійний центр і наявності моделей прогнозування, що використовують результати радіаційного та метеорологічного контролю в районі розташування АЕС. Не менш важливий при проектуванні і експлуатації АСКРО правильний вибір вимірювальної завдання. В даний час єдиною величиною, вимірюваною на всіх постах контролю АСКРО, є потужність дози γ -випромінювання, що, очевидно, недостатньо для вирішення сформульованих п'яти основних завдань.

Необхідний і достатній перелік вимірюваних радіаційних параметрів навколишнього середовища встановлено документами потужність еквівалентної дози γ -випромінювання; щільність потоку іонізуючих частинок; об'ємна активність радіоактивного аерозолу (парів) в повітрі; об'ємна активність радіоактивних газів; питома (об'ємна) активність радіонуклідів в різних об'єктах навколишнього середовища; щільність випадіння радіонуклідів на ґрунт; енергетичне розподіл іонізуючого випромінювання (спектрометричні вимірювання).

При цьому для контролю території вимірюються потужність еквівалентної дози і щільність випадіння радіонуклідів, атмосферного повітря - об'ємна активність газів і аерозолів, води, ґрунту, рослинності, продуктів харчування - питома або об'ємна активність радіонуклідів. Виміряні величини можуть доповнювати одна одну для підвищення оперативності та / або достовірності контролю, розширення діапазонів і зниження невизначеності вимірювань: для визначення потужності еквівалентної дози можливе

застосування γ -спектрометричних вимірювань, що враховують фактичне енергетичний розподіл випромінювання; результати вимірювань потужності дози можуть використовуватися для визначення об'ємної або питомої активності радіонуклідів при наявності відповідної калібрування; щільність потоку частинок вимірюється при контролі щільності випадінь α - і β випромінюючих радіонуклідів.

В автоматизованому режимі з урахуванням сучасних засобів і методів в навколишньому середовищі можуть вимірюватися потужність еквівалентної дози, щільність потоку частинок, об'ємна активність аерозолів і газів, енергетичний розподіл випромінювання, щільність випадінь радіонуклідів з атмосфери (при наявності необхідних коштів відбору проб). Безперервний контроль радіаційної обстановки на місцевості і координатія дій мобільних груп мають на увазі вимір об'ємної активності аерозолів і газів в приземному шарі атмосфери і потужності дози на постах контролю за умови їх достатньої кількості і рівномірного розміщення по території зони спостереження АЕС.

Завдання, пов'язані з підтримкою прийняття рішень про захист населення, вимагають, крім вимірювання потужності дози та об'ємної активності, вимірювань щільності випадінь радіонуклідів, їх питомої активності в ґрунті, воді, продуктах харчування. При цьому питома активність радіонуклідів в зазначених об'єктах в автоматизованому режимі може лише оцінюватися за результатами вимірювання щільності випадінь. Найбільш складною з точки зору метрології є визначення активності радіонуклідів, що надійшли за межі АЕС з аварійним викидом.

Для цього можуть використовуватися вимірювання спектра γ -випромінювання радіоактивного хмари за допомогою блоку детектування гамма-спектрометра, оснащеного коліматором, для виключення впливу випромінювання інших об'єктів. Для вимірювання зазначених параметрів необхідно оснащення АСКРО радіометрами і спектрометрами випромінювання, а також спеціалізованими засобами відбору проб. При наявності інформації про співвідношення активності радіонуклідів у викиді АЕС можна обмежитися неруйнівними γ -спектрометричними методами.

Оцінка ефективності застосування γ -спектрометричних вимірювальних каналів в складі АСКРО. Для оцінки ефективності застосування γ -спектрометричних вимірювальних каналів в складі АСКРО виконано порівняння спектрометричного та дозиметричного методів по чутливості до реєстрації радіоактивної хмари (викиду) з використанням двох розрахункових моделей. Перша спрощена модель представляється точковими джерелами ^{137}Cs (^{137}Ba), які по черзі розташовуються на відстані від 10 до 100 м від детектора. Необхідно відзначити, що відстань від детектора до хмари залежить як від висоти, так і від напрямку викиду. Як чутливості методу приймалася величина, зворотна мінімально реєстрованій активності хмари. Нижня межа вимірювань над фонова потужності еквівалентної дози дозиметричним методом приймалася рівним $0,1 \text{ мкЗв / год}$. Активність ^{137}Cs , відповідна виміряній потужності дози:

$$A = Dr^2 / \Gamma_G \exp(-\mu r), \quad (1)$$

де D - потужність еквівалентної дози γ -випромінювання, яка вимірюється дозиметром, Зв / год ; Γ_G - γ -постійна ^{137}Cs (^{137}Ba), $\text{Зв} \cdot \text{м}^2 / (\text{с} \cdot \text{Бк})$;

μ - лінійний коефіцієнт ослаблення γ випромінювання радіонукліда в повітрі в залежності від енергії,;

r - відстань від джерела до детектора, м.

Нижня межа вимірювання активності радіонукліду в хмарі викиду спектрометричним методом (шляхом реєстрації спектра γ -випромінювання від хмари) розраховувався за формулою:

$$A_{\min} = \frac{k f_q}{\epsilon Y_{\gamma} G} \left[\left(2 N_{\phi} t + \frac{f_q^2}{4} \right)^{1/2} + \frac{f_q}{2} \right], \quad (2)$$

де k - коефіцієнт охоплення (для нормального розподілу $k = 2$ при довірчій ймовірності $P = 0,95$); f_q визначається з виразу $1 / qf\sigma =$ де σ - відносна стандартна невизначеність вимірювань над фонова швидкість рахунку для даного радіонукліда, обумовлена ймовірнісним характером випромінювання;

ϵ - ефективність реєстрації радіонукліда; Y_{γ} - квантовий вихід; t - час вимірювання, с;

G - коефіцієнт, що залежить від геометрії вимірювань, в даному випадку визначається як $2 + 2/4$, $G r R =$ де r - радіус вікна детектора;

R - відстань від джерела до детектора;

N_{ϕ} - швидкість рахунки імпульсів в піку повного поглинання, s^{-1} .

Розрахунками за формулами (1), (2) отримано, що для моделі точкового джерела відношення чутливості спектрометричного та дозиметричного методів становить кілька сотень разів при відстані до хмари менше 100 м.

Зі збільшенням відстані до хмари різниця між ними зменшується (перевага спектрометричного методу нівелюється). У другій розрахунковій моделі радіоактивна хмара уявлялося у вигляді циліндра з котра утворює 7,5 км. Розміри хмари приймалися, виходячи з категорії стійкості атмосфери D, швидкості вітру 5 м/с, тривалості викиду 25 хв. Перелік γ -випромінюючих радіонуклідів прийнятий, виходячи з типового складу аварійного викиду. Оцінка чутливості спектрометричного та дозиметричного методів до реєстрації хмари в моделі об'ємного джерела виконана методом Монте-Карло за допомогою розрахункового коду MCNP (рис. 2).

За результатами порівняння зроблено висновок, що спектрометричний метод на відміну від дозиметричного більш чутливий до реєстрації викиду при відстані менше 100 м від хмари до детектора або невеликому розмірі хмари (точкове джерело або циліндр діаметром ~ 100 м). Для великої відстані $i /$ або розміру хмари відмінності в чутливості методів нівелюються в зв'язку з переважанням в реєстрованому спектрі розсіяного γ -випромінювання.

Таким чином, спектрометричні вимірювальні канали можуть мати перевагу при реєстрації радіоактивного викиду АЕС в порівнянні з дозиметричними тільки при їх розташуванні поблизу джерела викиду (~ 1 км від джерела) - розмір і висота хмари при цьому складають ~ 100 м. Для обґрунтування можливості реєстрації радіоактивної хмари з допомогою спектрометричних каналів в складі АСКРО необхідні експериментальні дослідження, що підтверджують розрахункові оцінки. Потрібне ретельне опрацювання методики розміщення постів АСКРО в районі розміщення АЕС з урахуванням можливих

активності, радіонуклідного складу та конфігурації викиду, а також вимірювальних каналів для різної відстані від радіоактивної хмари.

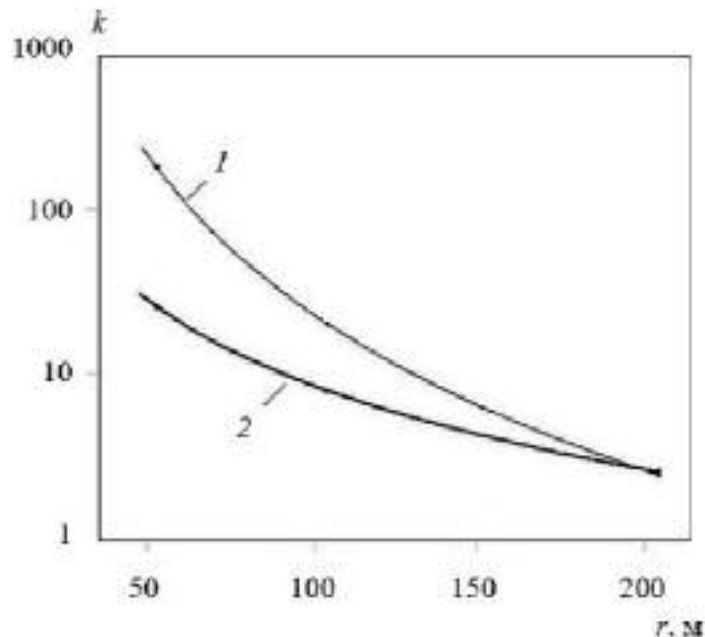


Рис. 2. Залежність відносини чутливості дозиметричного і спектрометричного методу k від відстані радіоактивної хмари діаметром 150 (1) і 400 м (2) до детектора r .

Висновок

Розвиток автоматизованої системи контролю радіаційної обстановки повинно бути направлено як на моніторинг навколишнього середовища, так і на підтримку прийняття рішень про захист населення при аваріях.

Відповідно до сучасних стандартів МАГАТЕ інформація з постів радіаційного контролю повинна використовуватися для уточнення первинних захисних заходів, що вживаються на підставі стану реакторної установки.

Виходячи з досвіду експлуатації АСКРО в нашій країні, вимог вітчизняних регулюючих документів, стандартів МАГАТЕ, принципово важливим є вирішення наступних завдань:

- функціонування в умовах проектних,запроектних і важких аварій на АЕС і екстремальних зовнішніх впливів (надійність);
- працездатність системи в цілому навіть при відмові окремих елементів (гнучкість);
- обґрунтування конфігурації розташування постів радіаційного контролю, що забезпечує достатній обсяг даних про радіаційну обстановку на місцевості і гарантоване отримання необхідної інформації для прийняття рішень про захист населення (ефективність);
- наявність програмно-технічних комплексів для підтримки прийняття рішень при радіаційних аваріях на АЕС на основі вимірювальної інформації (оснащеність).

Найбільш складною вимірювальною завданням АСКРО є реєстрація хмари радіоактивного викиду АЕС для уточнення параметрів викиду.

Вирішення цього завдання можливе з застосуванням гамма-спектрометричних вимірювань, для чого необхідна розробка вимірювальних процедур і їх оформлення у вигляді методичного документа.

Розвиток АСКРО як ефективного інструменту контролю радіаційної обстановки та

підтримки прийняття рішень про захист населення в разі радіаційної аварії дозволить підвищити не тільки рівень безпеки населення при експлуатації АЕС, а й конкурентоспроможність вітчизняних АЕС на світовому ринку.

Література

1. Висоцький. Ю.І, Лукін А.О. Захист навколишнього середовища. - АО БАХВА, Одеса. - 2002. – 70с.
2. Висоцький Ю.І, Кравченко В.П., Серета Р.Н., Чжоу Сяолун, Сидаш С.В., Парфьонова С.В. Гідравлічний розрахунок прямооточного парогенератора з точки зору зниження приведених витрат /Ядерна енергетика та доквілля. 2018. №2(12). С. 66-74.
3. Заходи щодо захисту населення в разі тяжкої аварії на легководних реакторі. EPR-NPP 2013. Відень: МАГАТЕ, 2013.
4. Моніторинг навколишнього середовища і джерел для цілей радіаційного захисту. RS-G-1.8. Відень: МАГАТЕ, 2016.
5. Керівництво з моніторингу при ядерних або радіаційних аваріях. IAEA-TECDOC-1092 / R. Відень: МАГАТЕ, 2002.
6. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. GSR-3. Vienna: IAEA, 2014.
8. Положення про підвищення точності прогностичних оцінок радіаційних характеристик радіоактивного забруднення навколишнього середовища і дозових навантажень на персонал і населення. РБ-053-10. Федеральна служба з екологічного, технологічного і атомного нагляду, 2010 року.
9. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Павловський О.А. Актуальні завдання вдосконалення готовності до реагування на надзвичайні ситуації радіаційно го характеру. - В сб .: Аварія на АЕС «Фукусіма-1». Досвід реагування та уроки. Праці ІБРАЕ. Вип. 13. М .: Наука, 2013.
12. Корольов С.А., Лаврухин Ю.Є., Румянцев О.В. Метрологічне забезпечення спектрометричного каналу АСКРО. - Атомна енергія, 2010 т. 109, вип. 1, с. 29-33.
13. Крупнейшие радиационные аварии и катастрофы в мире. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://ria.ru/jpquake_info/20110312/347505544.html.
14. Аварии на атомных электростанциях. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.gr-obor.narod.ru/p661.htm>.
15. Витько В. И. Радиационная безопасность исследовательской ядерной установки ННЦ ХФТИ «Источник нейтронов, основанный на подкритической сборке, управляемой линейным ускорителем электронов» / В. И. Витько, Л. И. Гончарова, В. В. Карташев, Г. Д. Коваленко, Е. И. Петряченко // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: VII Міжнар. наук.-практ. конф. — Х.: Райдер, 2011. — Т. 1. — С. 131—140.