

М. М. Талерко^{1,*}, Т. Д. Лев¹, А. В. Носовський¹,
В. М. Рудько¹, А. М. Новіков¹, О. В. Блохіна²

¹ Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна

² Філія "ВП "Атомпроектінжиніринг" АТ "НАЕК "Енергоатом", Київ, Україна

*Відповідальний автор: ntalerko@gmail.com

РОЗРАХУНОК РОЗМІРІВ ЗОНИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ХМЕЛЬНИЦЬКОЇ АЕС З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОБЛОКІВ № 5 ТА 6 З РЕАКТОРНОЮ УСТАНОВКОЮ AP1000

Виконано оцінювання розмірів зони спостереження (ЗС) Хмельницької АЕС (ХАЕС) з урахуванням потенційного впливу запланованих до будівництва енергоблоків № 3 і 4 з реактором типу ВВЕР-1000 та № 5 і 6 з реактором типу AP1000 виробництва Westinghouse Electric Company. Розрахунки проводилися на основі вимог документу НП 306.2.173-2011 «Вимоги щодо визначення розмірів і меж зони спостереження атомної електричної станції». При розрахунках доз опромінення населення в початковий період радіаційної аварії враховувалися внески від інгаляційного надходження радіонуклідів в організм людини та зовнішнього опромінення від хмари викиду та від випадінь на поверхню ґрунту. Розміри ЗС ХАЕС визначалися на основі неперевищення критеріїв уведення невідкладних контрзаходів (нижніх меж виправданості) у випадку запроектованої аварії на одному з енергоблоків. Визначальним для встановлення розмірів ЗС є неперевищення критерію по ефективній дозі опромінення критичної вікової групи «1 рік» при запроектованій аварії на енергоблоках з реакторними установками ВВЕР-1000. Головним шляхом формування ефективної дози опромінення є зовнішнє опромінення людини від випадінь на поверхню ґрунту. Найбільший внесок в ефективну дозу для критичної вікової групи населення «1 рік» дає ¹³¹⁻¹³⁵I. Розмір ЗС ХАЕС, розрахований за умови вводу в експлуатацію всіх шести енергоблоків, становить 13600 м. Зроблено висновок про недоцільність перегляду розмірів ЗС ХАЕС після вводу в експлуатацію нових блоків.

Ключові слова: АЕС, зона спостереження, реакторна установка AP1000, реакторна установка ВВЕР-1000, запроектована аварія, ефективна доза опромінення.

1. Вступ

Необхідність встановлення зони спостереження (ЗС) АЕС визначається Законом України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [1]. Він визначає, що «зона спостереження – територія, на якій можливий радіаційний вплив ядерної установки та об'єктів, призначених для поводження з радіоактивними відходами, на населення, що проживає в цій зоні». Згідно зі статтею 45 цього закону, у місцях розташування ядерної установки чи об'єкта, призначеного для поводження з радіоактивними відходами, встановлюються санітарно-захисна зона (СЗЗ) і ЗС. Розміри і межі зазначених зон визначаються в проекті згідно з нормами та правилами у сфері використання ядерної енергії, а також узгоджуються з органом державного регулювання ядерної та радіаційної безпеки. У СЗЗ і ЗС повинен здійснюватися контроль за радіаційним станом.

Згідно з намірами НАЕК «Енергоатом», на Хмельницькій АЕС (ХАЕС) заплановано до проектування та будівництва чотири нові енергоблоки, включаючи енергоблоки № 3 та 4 з реакторними установками ВВЕР-1000/466Б та енергоблоки № 5 та 6 одиничною електричною потужністю близько 1100 МВт, тепловою потужністю 3400 МВт з реакторами типу AP1000 виробництва Westinghouse Electric Company. Згідно з вимогами нормативних документів у сфері радіаційної безпеки, виникає необхідність зробити переоцінювання розмірів ЗС ХАЕС з урахуванням потенційного впливу викидів з усіх шести блоків (включаючи два працюючі) в умовах їхньої нормальної експлуатації та у випадку радіаційної аварії.

Документ НП 306.2.173-2011 [2] встановлює загальний порядок проведення розрахунків розмірів ЗС АЕС. Положення документа базуються на вимогах законодавства України [3 - 6], врахо-

© Автор(и), 2025

Стаття опублікована ІЯД НАН України за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC 4.0

вують рекомендації Міжнародного агентства з атомної енергії, а також вітчизняний і зарубіжний досвід безпечної експлуатації АЕС. У публікаціях [7, 8] проведено аналіз передумов до необхідності проведення розрахунків ЗС, наведено принципи встановлення СЗЗ, ЗС та зон аварійного планування в різних країнах. На підставі розглянутих вимог і принципів визначення меж СЗЗ та ЗС АЕС показано необхідність підтвердження існуючих або визначення нових розмірів СЗЗ і ЗС відповідно до вимог нормативних документів України.

2. Критерії визначення розмірів ЗС АЕС

Згідно з [2], розміри ЗС визначаються так, щоб при запроектованих аваріях (ЗПА), частота яких дорівнює або перевищує значення показників, встановлених документом «Загальні положення безпеки атомних електростанцій» [4], дози опромінення населення на межі ЗС та за її межами не перевищували критеріїв уведення невідкладних контрзаходів (нижніх меж виправданості) – евакуації та йодної профілактики [5], а саме:

- ефективна доза – 50 мЗв;
- доза на щитоподібну залозу у дітей – 50 мЗв; у дорослих – 200 мЗв;
- доза на шкіру – 500 мЗв.

Неперевищення зазначених доз опромінення повинно бути продемонстровано:

- щодо всіх референтних віків, визначених у НРБУ-97;
- щодо всіх відстаней, що дорівнюють або перевищують відстані від місць можливих викидів до меж ЗС.

При розрахунках неперевищення зазначених доз опромінення мають враховуватися типи місцевості у ЗС, а також імовірні метеорологічні умови під час атмосферного перенесення аварійного викиду.

Необхідно зауважити, що в документі [2], затвердженому в 2011 р., для визначення чисельних значень критеріїв безпеки для енергоблоків АЕС міститься посилання на діючу на той час редакцію «Загальних положень безпеки атомних електростанцій» [4]. На даний час, згідно з новою редакцією «Загальних положень» [9], встановлено нові показники критеріїв, що порівняно зі старою редакцією є більш жорсткими для енергоблоків АЕС, що проєктуються.

3. Загальний опис процедур та методів розрахунку

Відповідно до [2], при встановленні розмірів ЗС розрахунок ефективної дози опромінення

населення для кожного референтного віку проводиться з урахуванням таких шляхів формування дози: а) інгаляційного надходження радіонуклідів та зовнішнього опромінення від хмари викиду; б) зовнішнього опромінення від випадіння радіонуклідів на поверхню ґрунту; в) внутрішнього опромінення від перорального надходження радіонуклідів. Аналогічним чином розраховуються еквівалентні дози на щитоподібну залозу та на шкіру у дітей та дорослих. Значення ефективної та еквівалентних доз опромінення населення розраховуються для періоду 14 діб після початку аварії. Розрахунки ефективної дози опромінення та еквівалентної дози в щитоподібній залозі та шкірі проводяться для шести референтних вікових груп, встановлених у [5].

Загальна схема процедури розрахунку ефективних (еквівалентних) доз опромінення населення згідно з вимогами [2] подібна до тієї, що використовується в [10] для обчислень розмірів СЗЗ АЕС (її короткий опис наведено в [11]).

У подальших розрахунках розмірів ЗС було прийнято важливе уточнення щодо підходів [2]. При розрахунках ефективної та еквівалентних доз опромінення населення в початковий період радіаційної аварії враховувалися лише внески від інгаляційного надходження радіонуклідів в організм людини і зовнішнього опромінення від хмари викиду та від випадіння на поверхню ґрунту. Внесок перорального надходження при подальших розрахунках розмірів ЗС приймався таким, що дорівнює нулю. Такий підхід ґрунтується, насамперед, на досвіді ліквідації великих радіаційних аварій. Зокрема, після аварії у Віндскейлі (Велика Британія, 1957 р.) було введено обмеження на споживання харчових продуктів (у першу чергу молока), що вироблялися на радіоактивно забрудненій території, з метою зменшення надходження радіонуклідів йоду в організм людини [12]. Такий контрзахід є високо-ефективним засобом, який відносно легко може бути реалізований у гострий період великої радіаційної аварії, і не потребує, згідно з НРБУ-97, обґрунтування його виправданості (на відміну від уведення йодної профілактики). Додатковим аргументом на користь виключення внеску перорального шляху при обчисленні розміру ЗС є те, що саме така структура розрахунку доз опромінення людини використовується в міжнародній практиці обчислення зон аварійного планування АЕС [13], аналогом яких у національному законодавстві у сфері радіаційної безпеки є ЗС.

4. Кліматичні умови розповсюдження радіоактивних викидів в атмосфері при ЗПА на ХАЕС

Згідно з [2], розрахунки розповсюдження викидів при ЗПА мають виконуватися для всього діапазону можливих метеорологічних параметрів (швидкості та напрямку вітру, а також категорії стійкості атмосфери), з урахуванням наявності дощових опадів під час розповсюдження викиду. Документ [2] вимагає, щоб моделювання атмосферного розповсюдження аварійного викиду проводилося зі значенням параметра вологого вимивання, яке дорівнює 2 год^{-1} , що еквівалентно наявності дощових опадів з інтенсивністю близько $21,4 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$.

Таблиця 1. Розрахункові значення максимальної інтенсивності дощу j (мм/год) тривалістю τ хвилин для різних значень його середньої повторюваності (1 раз за N років) для метеостанції Шепетівка

N , років	j , мм/год				
	$\tau = 20$ хв	$\tau = 40$ хв	$\tau = 60$ хв	$\tau = 120$ хв	$\tau = 240$ хв
50	102	64,7	49,7	31,7	20,2
20	85,3	54,4	41,8	26,6	17,0
10	72,7	46,3	35,6	22,7	14,5
5	59,8	38,1	29,3	18,6	11,9
2	51,1	32,6	25,0	16,0	10,2
1	41,8	26,6	20,4	13,0	8,3
0,5	22,1	14,1	10,8	6,9	4,4
0,333	17,1	10,9	8,4	5,3	3,4

Період розповсюдження викиду на відстань 30 км від джерела (розмір існуючої ЗС АЕС) при швидкості вітру $2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ триває близько 240 хв. Згідно з табл. 1, для умов розташування майданчика ХАЕС дощ інтенсивністю близько 20 мм/год може тривати до 240 хв з повторюваністю 1 раз на 50 років; дощ інтенсивністю близько 10 мм/год може тривати до 60 хв з повторюваністю 2 рази на рік.

Таким чином, реальні дані вимірювань характеристик дощових опадів у районі розташування ХАЕС, а також оцінювання їх за допомогою статистичних моделей прогнозу опадів, підтверджують допустимість вимог документу [2] щодо використання значення параметра вологого вимивання 2 год^{-1} . Однак повторюваність існування дощу такої інтенсивності та тривалості є доволі малою, що має бути враховано при можливому проведенні ймовірнісного аналізу безпеки АЕС 3-го рівня.

5. Сценарії викидів радіонуклідів з енергоблоків ХАЕС, використані для розрахунків

Для визначення розмірів ЗС ХАЕС розглянуто наслідки розповсюдження радіоактивних викидів в атмосферу внаслідок можливої ЗПА на кожно-

У [14] наведено опис випадків сильних довготривалих злив, при яких спостерігалися максимальні інтенсивності опадів, за даними метеостанції Шепетівка. 8 серпня 1958 р. протягом 30 хв випало 39 мм опадів (середня інтенсивність $1,3 \text{ мм/хв}$). Протягом 5 - 6 вересня 1992 р. сумарно за 24 год випало 86 мм дощових опадів, у тому числі протягом 1 год – 40 мм (інтенсивність $0,7 \text{ мм/хв}$).

Значення максимальної інтенсивності опадів у заданому географічному регіоні може бути розраховане за допомогою методу [15], заснованого на статистичній обробці багаторічних даних метеорологічних спостережень (табл. 1).

му з шести (діючих та запланованих до експлуатації) енергоблоків з реакторними установками ВВЕР-1000 та АР1000.

ЗПА на енергоблоці з реактором типу ВВЕР-1000. Для подальшого аналізу радіаційних наслідків ЗПА розглядався сценарій «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу («холодна» нитка) з накладенням повного знеструмлення енергоблока» [16]. Сценарій передбачає течу «холодної» нитки головного циркуляційного трубопроводу діаметром 850 мм між головним циркуляційним насосом і корпусом реактора (двосторонній розрив) і втрату електропостачання власних потреб із незапуском усіх дизель-генераторів (повне знеструмлення енергоблока). Персонал не виконує жодних дій. Джерелом радіоактивного викиду є витік через захисну оболонку. Величини викидів основних дозоутворюючих радіонуклідів при ЗПА для всіх енергоблоків ХАЕС з реакторами типу ВВЕР-1000 вважалися однаковими.

На рис. 1 наведено оцінювання очікуваних викидів для різних груп радіонуклідів в атмосферу при вибраній ЗПА для енергоблоків № 1 - 4 ХАЕС. Консервативно викид розглядався як короткочасний (тривалість викиду задавалася такою, що дорівнює 1 год). Ефективна висота джерела викиду приймалася такою, що дорівнює 60 м [16].

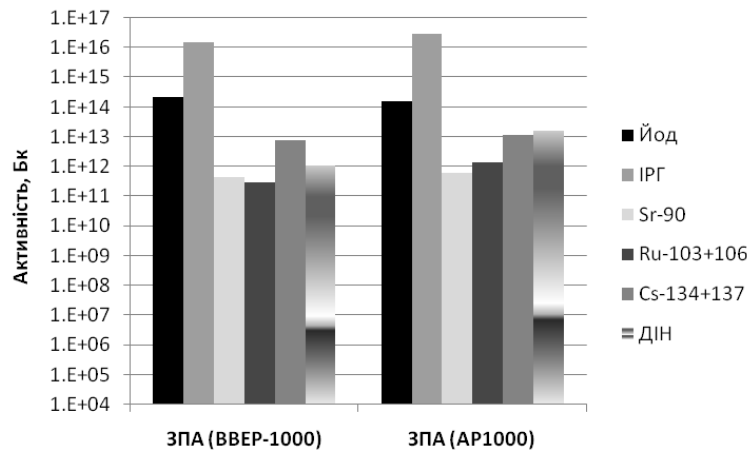


Рис. 1. Активність радіонуклідів у викиді з енергоблоків ХАЕС при ЗПА.

ЗПА на енергоблоці з реактором типу AP1000. В якості ЗПА на енергоблоці з реактором типу AP1000 розглядається аварія з втратою теплоносія (LOCA – Loss-of-coolant accident) з подальшим плавленням активної зони реактора [17]. Хоча аналіз реакції активної зони в реакторній установці AP1000 під час аварії з втратою теплоносія показує, що її цілісність зберігається, для оцінювання радіологічних наслідків аварії припускається, що відбувається значна деградація і розплавлення активної зони.

Радіонуклідний склад та активність кожного з радіонуклідів у викиді в навколишнє середовище при ЗПА задавався відповідно до [17]. У табл. 2 наведено оцінювання викиду активності в навколишнє середовище з контейнеру для різних стадій аварії згідно із загальним сценарієм розвитку гіпотетичної аварії з втратою теплоносія на реакторах типу ВВЕР, який рекомендовано до аналізу документами NUREG-1465 [18] і Керівництвом 1.183 [19].

Таблиця 2. Очікуваний викид активності в навколишнє середовище (Бк) при ЗПА на енергоблоці з реактором типу AP1000 для різних стадій розвитку аварії згідно з [17] та сумарні значення за весь період аварії

Нуклід	0 - 2 год	2 - 8 год	8 - 24 год	24 - 96 год	96 - 720 год	Сума за період 0 - 720 год
¹³³ Xe	2,17·10 ¹⁴	1,17·10 ¹⁵	4,33·10 ¹⁵	7,69·10 ¹⁵	1,52·10 ¹⁶	2,86·10 ¹⁶
^{133m} Xe	1,19·10 ¹²	9,41·10 ¹²	2,44·10 ¹³	4,94·10 ¹³	2,01·10 ¹⁴	2,85·10 ¹⁴
¹³⁷ Cs	3,03·10 ¹²	8,13·10 ¹²	5,07·10 ¹¹	2,59·10 ⁹	2,40·10 ¹⁰	1,17·10 ¹³
¹³¹ I	3,34·10 ¹³	9,27·10 ¹³	9,50·10 ¹²	6,24·10 ¹²	1,87·10 ¹³	1,61·10 ¹⁴
^{131m} Te	7,48·10 ¹¹	2,32·10 ¹²	1,26·10 ¹¹	2,22·10 ⁸	7,40·10 ⁷	3,19·10 ¹²
⁹⁰ Sr	1,37·10 ¹¹	4,51·10 ¹¹	2,82·10 ¹⁰	1,48·10 ⁸	1,33·10 ⁹	6,18·10 ¹¹
¹⁰³ Ru	2,96·10 ¹¹	9,71·10 ¹¹	6,03·10 ¹⁰	2,96·10 ⁸	2,15·10 ⁹	1,33·10 ¹²
¹⁴⁰ La	2,84·10 ¹⁰	8,94·10 ¹⁰	5,03·10 ⁹	1,48·10 ⁷	3,70·10 ⁶	1,23·10 ¹¹
¹⁴¹ Ce	6,54·10 ¹⁰	2,14·10 ¹¹	1,33·10 ¹⁰	7,03·10 ⁷	4,48·10 ⁸	2,93·10 ¹¹
¹⁴⁰ Ba	2,76·10 ¹²	9,01·10 ¹²	5,54·10 ¹¹	2,96·10 ⁹	1,15·10 ¹⁰	1,23·10 ¹³

Для подальших розрахунків наслідків ЗПА на реакторі типу AP1000 було зроблено такі припущення:

1. Загальний викид кожного радіонукліда в модельному джерелі визначався як сума викидів за всі п'ять стадій аварії протягом періоду 0 - 720 год (останній стовпчик у табл. 2).

2. При подальшому моделюванні консервативно приймалося, за аналогією з розрахунками для реакторів типу ВВЕР-1000, що весь сумарний викид є короточасним і відбувається протягом 1 год після початку аварії. Розрахунки роз-

повсюдження викиду проводяться при постійних метеорологічних умовах.

3. Згідно з рекомендаціями [20], викид при такій аварії на енергоблоці з реактором типу AP1000 розглядався як приземний. Значення ефективної висоти викиду приймалося таким, що дорівнює 1 м.

Для обох розглянутих ЗПА співвідношення активності у викиді між різними фізико-хімічними формами радіоїодів ¹³¹⁻¹³⁵I задавалося згідно з [20] і становить 95 % (аерозоль) : 4,85 % (молекулярний) : 0,15 % (органічний).

6. Результати розрахунків розмірів ЗС ХАЕС

ЗПА на енергоблоках № 1 - 4 ХАЕС з реакторами типу ВВЕР-1000. Розрахунки характеристик радіоактивного забруднення, ефективних та еквівалентних доз опромінення шкіри та щитоподібної залози для населення внаслідок ЗПА виконувалися при стаціонарних метеорологічних умовах у точках на осі струменя викиду з кроком 100 м до максимальної відстані 30 км від джерела згідно з методологією розрахунків [2].

Сукупність умов розповсюдження викиду при ЗПА, при яких досягаються максимальні значення ефективної дози становлять швидкість вітру

$1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ на висоті 10 м, категорія стійкості атмосфери F, інтенсивність дощових опадів $21,4 \text{ мм}\cdot\text{год}^{-1}$, значення параметра шорсткості підстильної поверхні $z_0 = 0,01 \text{ м}$. Критичною групою населення є вікова категорія «1 рік».

На рис. 2, а показано залежності величини ефективної дози для вікової категорії «1 рік» від відстані для різних значень категорії стійкості атмосфери. Значення ефективних доз для всіх відстаней від джерела послідовно зростають при зміні стійкості атмосфери від дуже нестійкої (категорія А) до дуже стійкої (категорія F).

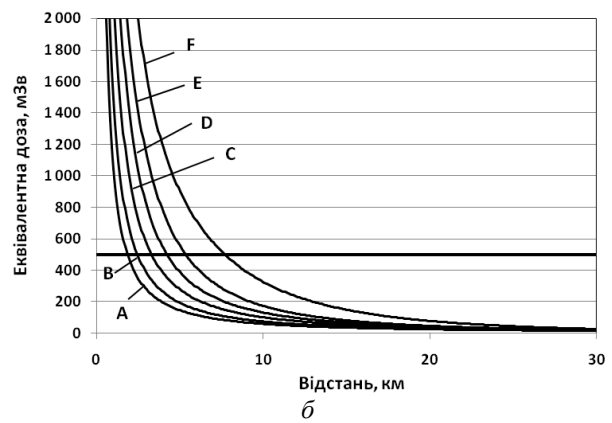
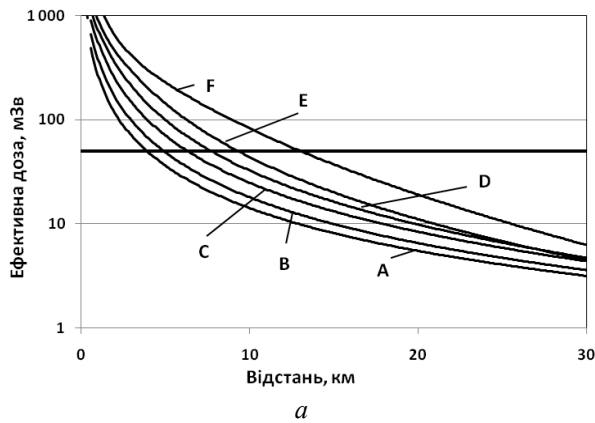


Рис. 2. Залежність розрахункового значення ефективної дози (а) та еквівалентної дози опромінення шкіри (б) для вікової категорії «1 рік» від відстані для різних значень категорії стійкості атмосфери при ЗПА на енергоблоках з ВВЕР-1000. Горизонтальними лініями позначено відповідні дозові нормативи для ЗПА – 50 мЗв (а) та 500 мЗв (б).

Головним шляхом формування ефективної дози опромінення населення є зовнішнє опромінення від випадіння на поверхню ґрунту (93 % для дітей 1 року та 94 % для дорослих). Основна частина ефективної дози для критичної вікової групи населення «1 рік» формується за рахунок внеску радіоїодів ^{131}I - ^{135}I в аерозольній та органічній формах, що становить майже 89 %. Частка довго- та середньоіснуючих радіонуклідів у формі аерозолів становить близько 7,3 %, з яких

6,9 % становить внесок ізотопів цезію. Внесок інертних радіоактивних газів близько 4 %.

Залежності еквівалентної дози опромінення шкіри від відстані до джерела показано на рис. 2, б для різних категорій стійкості атмосфери при швидкості вітру $1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ та значенні параметра шорсткості 0,01 м. При заданих умовах атмосферного розповсюдження викиду розрахункові значення еквівалентної дози опромінення шкіри є однаковими для всіх референтних груп населення.

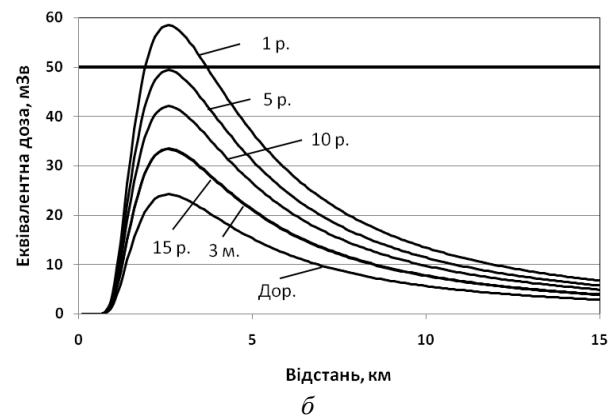
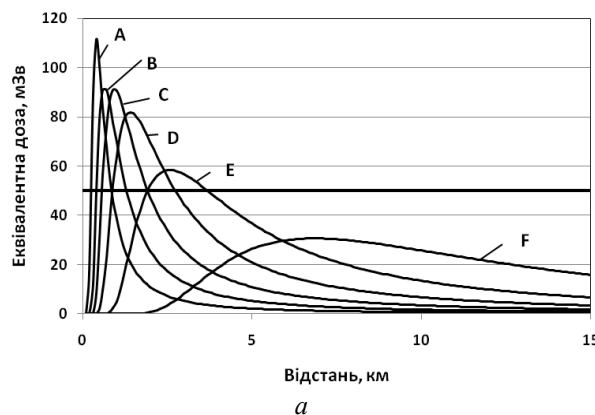


Рис. 3. Залежність розрахункового значення еквівалентної дози опромінення щитоподібної залози від відстані для різних категорій стійкості і референтної вікової категорії «1 рік» (а) та для різних референтних віків і категорії стійкості атмосфери E (б) при ЗПА на енергоблоках з ВВЕР-1000.

На рис. 3, *а* показано залежності еквівалентної дози опромінення щитоподібної залози від відстані до джерела для різних категорій стійкості атмосфери, а на рис. 3, *б* – залежності дози від відстані для різних референтних вікових груп і категорії стійкості атмосфери Е. Критичною групою населення є референтний вік «1 рік». Для дорослих викиди при розглянутій ЗПА не призводять до формування еквівалентної дози опромінення щитоподібної залози, що перевищує встановлений критерій 200 мЗв на всіх відстанях від джерел викиду.

При розповсюдженні викиду в метеорологічних умовах, які характеризуються категорією стійкості атмосфери F, значення дозового критерію опромінення щитоподібної залози для дітей 50 мЗв не досягається для будь-яких відстаней від джерела. Натомість найгіршими метеорологічними умовами в цьому випадку є категорія

стійкості Е. Для неї неперевіщення дозового критерію для всіх референтних вікових категорій забезпечується на відстанях більше 3700 м (див. рис. 3).

ЗПА на енергоблоках № 5 і 6 ХАЕС з реакторами типу AP1000. На рис. 4 показано залежності величини ефективної дози та еквівалентної дози опромінення шкіри для вікової категорії «1 рік» від відстані для різних значень категорії стійкості атмосфери при швидкості вітру 1 м·с⁻¹ та значенні параметра шорсткості підстильної поверхні 1 м. На відстанях до 3,5 км максимальні значення ефективної дози отримано для категорії стійкості F. При збільшенні відстані величина категорії стійкості, при якій спостерігається максимальне значення ефективної дози, послідовно зміщується до категорій Е (у діапазоні відстаней 3,5 - 6 км), D (6 - 25 км) і С (більше 25 км).

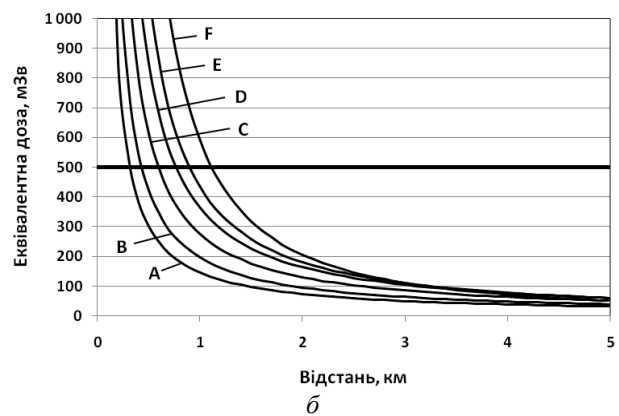
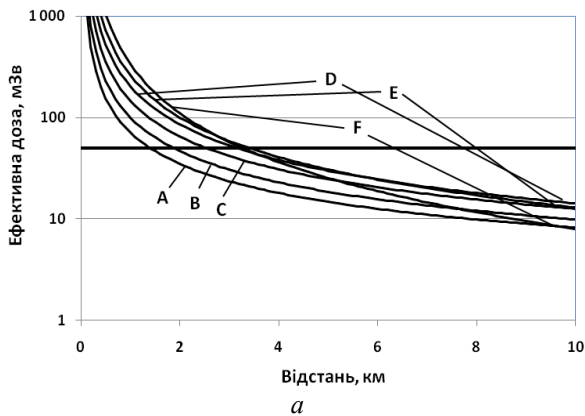


Рис. 4. Залежність значення ефективної дози (*а*) та еквівалентної дози опромінення шкіри (*б*) для вікової категорії «1 рік» від відстані для різних значень категорії стійкості атмосфери при ЗПА на енергоблоках з AP1000. Горизонтальними лініями позначено відповідні дозові нормативи для ЗПА – 50 мЗв (*а*) та 500 мЗв (*б*).

Головним шляхом формування ефективної дози опромінення є зовнішнє опромінення людини від випадіння на поверхню ґрунту (68 % для дітей 1 року та 76 % для дорослих). Найбільший

внесок в ефективну дозу для критичної вікової групи населення «1 рік» дає ¹³¹I – 77 %. Внесок інертних радіоактивних газів становить близько 6 %, а ¹³⁷Cs – 8,7 %.

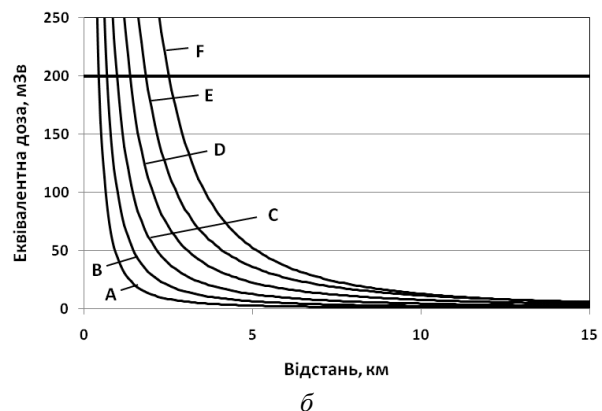
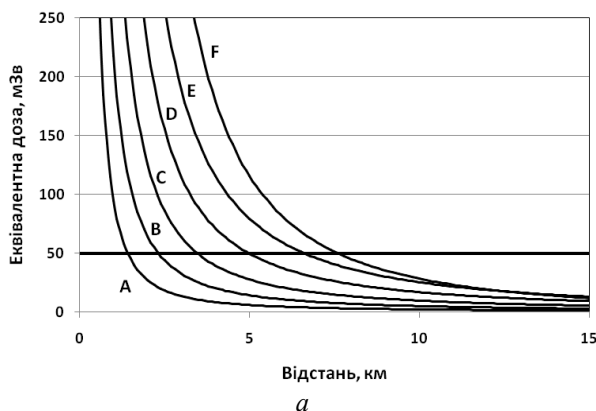


Рис. 5. Залежність розрахункового значення еквівалентної дози опромінення щитоподібної залози від відстані для різних категорій стійкості та референтних вікових категорій «1 рік» (*а*) та «Дорослі» (*б*) при ЗПА на енергоблоках з AP1000. Горизонтальними лініями показано значення дозових критеріїв 50 мЗв для категорії «1 рік» і 200 мЗв для категорії «Дорослі».

На рис. 5 показано результати розрахунків залежності еквівалентної дози опромінення щитоподібної залози від відстані до джерела для різних категорій стійкості атмосфери для двох вікових груп. На відміну від ЗПА для ВВЕР-1000, отримано перевищення дозового критерію опромінення щитоподібної залози в ближній зоні викиду не тільки для дітей, але й для референтної групи «Дорослі».

У табл. 3 наведено результати оцінювання

розмірів ЗС ХАЕС, отримані за результатами розрахунків ефективної дози опромінення населення, а також еквівалентних доз опромінення шкіри та щитоподібної залози. На відстанях, наведених у табл. 3, забезпечується неперевищення відповідного дозового критерію згідно з [2] у випадку розглянутої ЗПА на енергоблоках з реакторними установками ВВЕР-1000 та АР1000 при всіх розглянутих метеорологічних умовах та для всіх вікових груп.

Таблиця 3. Результати розрахунків розмірів ЗС для різних типів реакторів та дозових критеріїв

№	Тип енергоблоків	Критична група населення	Дозовий критерій	Оцінювання розмірів ЗС, м
1	ВВЕР-1000	1 рік	Ефективна доза	13100
2	ВВЕР-1000		Доза на шкіру	7700
3	ВВЕР-1000	1 рік	Доза на ЩЗ	3700
4	АР1000	1 рік	Ефективна доза	3500
5	АР1000		Доза на шкіру	1200
6	АР1000	1 рік	Доза на ЩЗ	7600

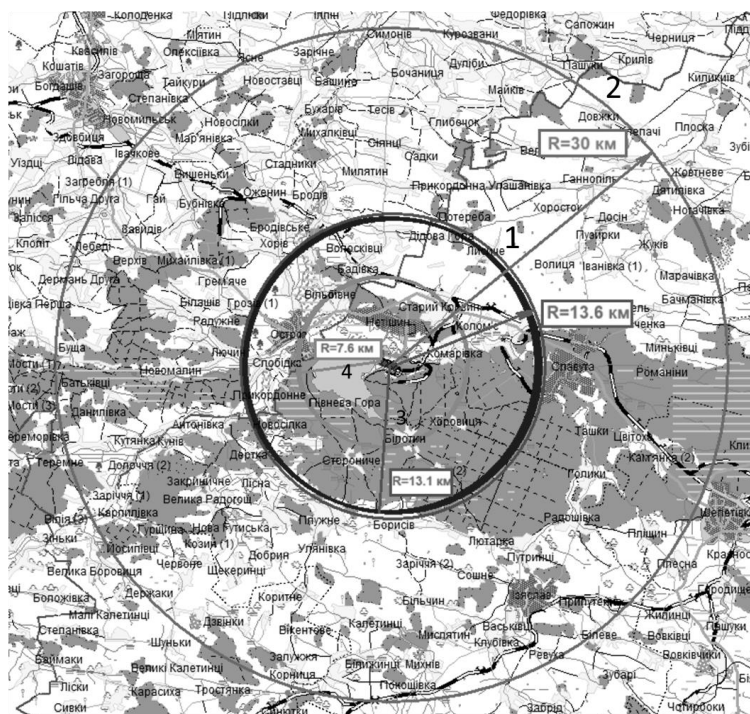


Рис. 6. Межі ЗС ХАЕС, визначені в результаті проведених розрахунків (1), межа існуючої ЗС ХАЕС у вигляді кола $R = 30$ км (2), розраховані області навколо окремих блоків: ВВЕР-1000 $R = 13,1$ км (3) та АР1000 $R = 7,6$ км (4).

Результат об'єднання кіл навколо кожного з енергоблоків № 1 - 6 з радіусами, наведеними в табл. 3, показано на рис. 6. Якщо вважати, що центр ЗС залишається незмінним, то радіус проведеного навколо нього кола, яке охоплює всі шість кіл, дорівнює 13600 м. Саме це значення можна прийняти за величину розміру ЗС, отриману в результаті проведених розрахунків.

7. Висновки

Проведено розрахунки розміру ЗС ХАЕС на основі документу НП 306.2.173-2011 «Вимоги

щодо визначення розмірів і меж зони спостереження АЕС» з врахуванням внесків у дози опромінення людини від інгаляційного надходження радіонуклідів, зовнішнього опромінення від хмари викиду та від випадіння на земну поверхню. За умови вводу в експлуатацію всіх шести енергоблоків, включаючи енергоблоки № 3 і 4 з реакторами типу ВВЕР-1000 та № 5 і 6 з реакторами типу АР1000, розмір ЗС ХАЕС становить 13600 м. Вказане значення забезпечує неперевищення встановлених дозових критеріїв для всіх референтних вікових груп та в усьому розгляну-

тому діапазоні метеорологічних умов розповсюдження радіоактивних викидів в атмосфері та характеристик підстильної поверхні.

Заплановане введення в експлуатацію нових блоків № 3 - 6 не призводить до необхідності переоцінювання розмірів ЗС ХАЕС у бік її збільшення.

Межі ЗС ХАЕС, визначені в результаті даної роботи, повністю укладаються в існуючу зараз ЗС радіусом 30 км, а її площа становить близько 21 % від існуючої. Потрібно враховувати, що у

ЗС здійснюється поточний контроль за забезпеченням радіаційної безпеки та моніторинг радіаційної обстановки. Тому можливе зменшення розмірів ЗС може призвести до зменшення обсягів радіаційного моніторингу і, відповідно, до потенційної втрати частини інформації про радіаційний стан території впливу ХАЕС. Враховуючи зазначене вище, можна зробити висновок про недоцільність перегляду розмірів ЗС ХАЕС після вводу в експлуатацію всіх шести енергоблоків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» від 02.02.95 р. № 39/95-ВР. Відомості Верховної Ради України 12 (1995) ст. 82. / Law of Ukraine “On use of nuclear power and radiation safety” of 02/02/95, No. 39/95VR (1995). Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine 12 (1995) art. 82. (Ukr)
2. НП 306.2.173–2011. Вимоги щодо визначення розмірів і меж зони спостереження атомної електричної станції (Затвердж. наказом Держатомрегулювання України та МОЗ України від 07.11.2011 № 153/766) 22 с. / NP 306.2.173–2011. Requirements for determining the dimensions and boundaries of the observation zone of a nuclear power plant (Approved by the order of the State Committee for Nuclear Regulation of Ukraine and the Ministry of Health of Ukraine dated on 11/07/2011 No. 153/766) 22 p. (Ukr)
3. ДСП 6.177-2005-09-02. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України. Державні санітарні правила (ОСПУ-2005). / State sanitary rules 6.177-2005-09-02. Basic sanitary rules for radiation protection of Ukraine. State sanitary rules (Basic sanitary rules of Ukraine-2005). (Ukr)
4. НП 306.2.141–2008. Загальні положення безпеки атомних станцій (Затвердж. наказом Держатомрегулювання від 19.11.2007 № 162). / Normative provisions 306.2.141–2008. General safety regulations of nuclear power plants (Approved by the order of the State Committee for Nuclear Regulation of 11/19/2007 No. 162). (Ukr)
5. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи ДГН 6.6.1. - 6.5.061-2000. / Radiation Safety Standards of Ukraine (RSSU-97). State hygiene standards 6.6.1. - 6.5.061-2000. (Ukr)
6. Про затвердження Вимог з безпеки до вибору майданчика для розміщення атомної станції (Затвердж. наказом Держатомрегулювання від 07.04.2008 № 68). / On approval the safety requirements for site selection for the placement of a nuclear power plant (Approved by the order of the State Committee for Nuclear Regulation of 04/07/ No. 68). (Ukr)
7. В.И. Богорад и др. Обоснование размеров зоны наблюдения АЭС. Ядерна та радіаційна безпека 2(58) (2013) 39. / V.I. Bogorad et al. Justification of the size of the NPP observation zone. Nuclear & Radiation Safety 2(58) (2013) 39. (Rus)
8. К.В. Грибан и др. Состояние проблемы зонирования территории вокруг АЭС. Ядерна та радіаційна безпека 1(65) (2015) 26. / K.V. Griban et al. State of the territory zoning problem around the NPP. Nuclear & Radiation Safety 1(65) (2015) 26. (Rus)
9. НП 306.2.141–2008. Загальні положення безпеки атомних станцій (Затвердж. наказом Держатомрегулювання 19.11.2007 № 162 в редакції наказу Державної інспекції ядерного регулювання України від 04.03.24 р. № 195). / Normative provisions 306.2.141–2008. General safety regulations of nuclear power plants (Approved by the order of the State Committee for Nuclear Regulation of 11/19/2007 No. 162 as amended by the order of the State Nuclear Regulatory Inspectorate of 03/04/24 No. 195). (Ukr)
10. СОУ НАЕК 023:2014. Забезпечення радіаційної безпеки. Порядок встановлення розмірів санітарно-захисної зони АЕС (Київ, ДП «НАЕК «Енергоатом», 2014) 37 с. / Standard of organization of Ukraine SOU NAEK 023:2014. Radiation safety. The procedure for the establishment of sizes of the NPP sanitary protective zone (Kyiv, SE “NNEGC “Energoatom”, 2014) 37 p. (Ukr)
11. М.М. Талерко та ін. Розрахунок розмірів санітарно-захисної зони Хмельницької АЕС з урахуванням будівництва енергоблоків №№ 5, 6 з реакторною установкою AP1000. Ядерна енергетика та довкілля (2024, прийнято до друку). / M.M. Talerko et al. Assessment of the size of the Khmelnytskyi NPP sanitary protection zone taking into account the construction of power units No. 5, 6 with the AP1000 reactor. Nuclear Power and the Environment. (2024, in press) (Ukr)
12. Б.С. Пристер и др. Проблемы безопасности атомной энергетики. Уроки Чернобыля (Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС, 2013) 200 с. / B.S. Prister et al. Safety Problems of Atomic Energy. Lessons from Chornobyl (Chornobyl: Institute for Safety Problems of NPPs, 2013) 200 p. (Rus)
13. Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor. EPR-NPP Public Protective Actions (Vienna: IAEA, 2013) 133 p.

14. Хмельницька АЕС. Енергоблок № 2. Остаточний звіт з аналізу безпеки. Глава 2. Характеристика району та майданчика АЕС (НАЕК «Енергоатом», ВП «Хмельницька АЕС», 2023) 78 с. / Khmelnytskyi NPP. Power unit No. 2. Final Safety Analysis Report. Chapter 2. Characteristics of the NPP area and site (SE NNEGC “Energoatom”, PE “Khmelnytskyi NPP”, 2023). (Ukr)
15. А.М. Курганов. *Таблицы параметров предельной интенсивности дождя для определения расходов в системах водоотведения* (Москва: Стройиздат, 1984) 112 с. / А.М. Kurganov. *Tables of Parameters of the Maximum Intensity of Rain for Determining the Flow Rates in Drainage Systems* (Moskva: Stroyizdat, 1984) 112 p. (Rus)
16. ХАЕС. Енергоблок № 1. Звіт з аналізу безпеки. Глава 5. Аналіз запланованих аварій. Частина 2. Додаткові розрахункові обґрунтування та розробка фінальних звітів з АЗПА. Книга 4. Рекомендації з протиаварійних дій персоналу. Кінцевий перелік ЗПА. 24.1.42.ОБ.03.02.04 (редакція 2) (ДП «НАЕК «Енергоатом», ВП «Хмельницька АЕС», 2024) 215 с. / Khmelnytskyi NPP. Power unit No. 1. Safety Analysis Report. Chapter 5. Analysis of beyond design basis accidents. Part 2. Additional calculation justifications and development of final reports on analysis of beyond design basis accidents. Book 4. Recommendations for personnel emergency actions. The final list of beyond design basis accidents. 24.1.42.ОБ.03.02.04 (2 edn.) (SE NNEGC “Energoatom”, PE “Khmelnytskyi NPP”, 2024) 215 p. (Ukr)
17. EA Questionnaire Response with AP1000 Overview and Plant Description. Attachment 4. Supporting Tables with detailed information for the EA Questionnaire (Westinghouse Electric Company LLC, 2022) 115 p.
18. L. Soffer et al. *Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants. Final report. NUREG-1465* (Washington, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1995) 38 p.
19. *Alternative Radiological Source Terms for Evaluating Design Basis Accidents at Nuclear Power Reactors. Regulatory Guide 1.183. Revision 1* (Washington, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2023) 87 p.
20. *AP1000 Design Control Document. Revision 19. Chapter 15. Accident Analyses. 15.6 Decrease in Reactor Coolant Inventory* (Westinghouse Electric Company LLC, 2011) 263 p.

**М. М. Talerko^{1,*}, Т. D. Lev¹, А. V. Nosovskyi¹, V. M. Rudko¹,
А. M. Novikov¹, O. V. Blokhina²**

¹ *Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

² *Separate Division "Atomproektengineering" of SE NNEGC "Energoatom", Kyiv, Ukraine*

*Corresponding author: ntalerko@gmail.com

ASSESSMENT OF THE SIZE OF THE KHMELNYTSKYI NPP OBSERVATION ZONE TAKING INTO ACCOUNT POWER UNITS No. 5 AND 6 WITH THE AP1000 REACTOR

An assessment of the size of the observation zone (OZ) of the Khmelnytskyi NPP was carried out, taking into account the potential impact of power units No. 3 and 4 with the VVER-1000 reactor and No. 5 and 6 with the AP1000 reactor manufactured by the Westinghouse Electric Company. The calculations were carried out based on the requirements of the document NP 306.2.173-2011 “Requirements for determining the dimensions and boundaries of the observation zone of a nuclear power plant”. When calculating the radiation doses to the population in the initial period of the radiation accident, contributions from the inhalation of radionuclides into the human body and external radiation from the cloud and fallout on the soil surface were taken into account. The size of the observation zone of the Khmelnytskyi NPP was determined based on not exceeding the criteria for the introduction of urgent countermeasures (lower limits of justification) in the event of a beyond-basis design accident at one of the power units. The determining factor for determining the OZ size is not exceeding the criterion for the effective radiation dose for the critical age group “1 year” in the event of an accident at power units with VVER-1000 reactors. The main way of forming an effective dose of radiation is external exposure from depositions on the ground (93 % for 1-year-old children and 94 % for adults). The main part of the effective dose for the critical age group “1 year” is formed due to the contribution of ¹³¹⁻¹³⁵I in aerosol and organic forms, which is almost 89 %. The share of long- and medium-lived radionuclides in the form of aerosols is about 7.3 %, of which 6.9 % is the contribution of cesium isotopes. The contribution of inert radioactive gases is about 4 %. The size of the observation zone of the Khmelnytskyi NPP, calculated on the condition that all six power units are put into operation, is obtained to be 13.600 m. A conclusion was made that re-establishment of the dimensions of the observation zone of the Khmelnytskyi NPP is not advisable after the commissioning of the new units No. 3 and 4 with VVER-1000 reactors and No. 5 and 6 units with AR1000 reactors.

Keywords: nuclear power plant, observation zone, AP1000 reactor, VVER-1000 reactor, beyond design basis accident, effective radiation dose.

Надійшла / Received 21.10.2024