

О. В. Михайлов*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна*
ORCID 0000-0002-9344-3550**М. І. Павлюченко***Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна*
ORCID 0000-0003-1291-1154**А. О. Дорошенко***Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна*
ORCID 0000-0001-6285-2610

Результати аналізу кореляцій між відносною вологістю повітря та щільністю потоку нейтронів у приміщеннях комплексу нового безпечного конфайнмента та об'єкта «Укриття»

Ключові слова:

об'єкт «Укриття»,
паливовмісні матеріали,
відносна вологість повітря,
щільність потоку нейтронів,
коефіцієнт кореляції,
часовий лаг

Представлено результати систематизації та аналізу результатів вимірювань відносної вологості повітря (RH) та щільності потоку нейтронів (Ф), виміряних у приміщеннях комплексу нового безпечного конфайнмента та об'єкта «Укриття» в період із вересня 2022 р. по грудень 2025 р. Установлено, що середньомісячні значення RH у приміщеннях об'єкта «Укриття», розташованих у межах будівельних позначок 0,00–9,00, в осях 44–48, рядах К–Л мають синхронні сезонні коливання та дуже високий коефіцієнт лінійної кореляції Пірсона ($r > 0,9$). Показано, що зменшення RH супроводжується збільшенням Ф у підконтрольних приміщеннях об'єкта «Укриття» і навпаки. За результатами крос-кореляційного аналізу встановлено, що між часовими рядами середньомісячних значень RH та Ф може існувати помірний та високий ступінь зв'язку за умови їхнього календарного зсуву на величину часового лагу від трьох тижнів до двох календарних місяців.

Вступ

Стан ядерної безпеки комплексу нового безпечно-го конфайнмента та об'єкта «Укриття» (НБК-ОУ) оцінюється за результатами аналізу даних щодо щільності потоку нейтронів (Ф) і потужності експозиційної дози γ -випромінювання (Х) навколо зони локалізації скупчень паливовмісних матеріалів (ПВМ) у приміщенні 305/2. Вимірювання Ф та Х здійснюється за допомогою системи контролю ядерної безпеки (СКЯБ) та інтегрованої автоматизованої системи контролю

(ІАСК) [1]. В автоматичному режимі СКЯБ виконує безперервний збір, обробку, зберігання та надання експлуатаційному персоналу комплексу НБК-ОУ даних щодо Ф у діапазоні енергій від теплової до 1 МеВ та Х у діапазоні енергій від 0,1 до 4 МеВ [2, 3].

Після встановлення арки НБК у проектне положення (листопад 2016 р.) відповідно до Програми моніторингу ПВМ [4] за допомогою автономного метеорологічного обладнання виконуються дослідження динаміки температури, відносної вологості повітря, швидкості та напрямку повітряних потоків

у приміщеннях об'єкта «Укриття». Основна мета таких досліджень — отримати інформацію про зміни мікроклімату в просторі НБК та оцінити його вплив на ядерний і радіаційний стан ПВМ, розробити та впровадити коригувальні заходи щодо роботи систем вентиляції. У 2026 р. буде затверджена нова програма, яка передбачає продовження досліджень метеопараметрів в об'єкті «Укриття».

У роботах [5, 6] було вперше згадано про наявність впливу періодичних змін вологості в приміщеннях об'єкта «Укриття» у вигляді появи конденсату на сезонні коливання середньомісячних значень Φ навколо скупчень ПВМ. Однак це була лише гіпотеза без математичного обґрунтування та проведення кількісного аналізу даних із визначенням ступеня взаємозв'язку між явищами, що спостерігалися.

Після початку воєнних дій у 2022 р. дослідження метеопараметрів в об'єкті «Укриття» було припинено. Унаслідок перебування російських військ у м. Чорнобиль було пошкоджено комп'ютерне обладнання, що залишилося в будівлях Інституту проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України (ІПБ АЕС НАН України), і втрачено електронний архів інформації з даними вимірювання метеопараметрів. Роботи було поновлено лише у вересні 2022 р., але проблема з відновленням архіву з результатами раніше проведених досліджень досі залишається невирішеною.

Метою роботи був пошук та математичне обґрунтування наявності або відсутності взаємозв'язку між відносною вологістю повітря та щільністю потоку нейтронів у приміщеннях об'єкта «Укриття», де знаходяться скупчення ПВМ, за даними відновленого моніторингу до грудня 2025 р. включно.

Матеріали і методи

Вимірювання відносної вологості повітря (RH) у приміщеннях об'єкта «Укриття» 006/2, 012/7, 210/4, 210/7 та 318/2, розміщених у межах будівельних позначок 0,00–9,00, виконували з використанням автономних метеостанцій типу PCE FWS та логерів типу RC-4HC (рис. 1), характеристики яких наведено в [7, 8]. Вимірювання Φ у різних приміщеннях об'єкта «Укриття» виконували за допомогою вимірювальних каналів СКЯБ [2, 3] та експертної дослідної системи (ЕДС) [9]. Координати розташування датчиків RH та блоків детектування (БД) Φ , обраних у роботі для проведення статистичного та кореляційного аналізу даних вимірювань, наведено в табл. 1.

Дослідження ступеня взаємозв'язку між часовими рядами результатів вимірювань RH та Φ проводили для середньомісячних значень показників контролю із застосуванням методів статистичного аналізу даних. Наявність або відсутність кореляції встановлювали за величиною коефіцієнта лінійної кореляції (КК, r) Пірсона з оцінкою його статистичної значущості за тестом Стюдента. Оцінку щільності зв'язку між часовими рядами RH та Φ у різних точках контролю проводили за шкалою Чеддока. Для аналізу та порівняння особливостей динаміки у часових рядах RH та Φ було використано поняття часового лагу (time-lag value) [10] як показника, що кількісно відображає затримку (відставання) появи наслідків у часі одного фізичного явища (Φ) порівняно з іншим (RH). Метод визначення часового лагу було застосовано у припущенні, що між змінною RH у приміщеннях об'єкта «Укриття» та появою сезонних коливань у динаміці Φ існує причинно-наслідковий зв'язок. Для пар «RH– Φ » була побудована



а



б

Рис. 1. Зовнішній вигляд метеостанції типу PCE FWS (а) та логера типу RC-4HC (б)

Таблиця 1. Місця розташування точок контролю RH та Φ у приміщеннях об'єкта «Укриття»

Параметр контролю, одиниці вимірювання	Назва датчика та систем контролю	Зона контролю (приміщення, висотна позначка)	Координати датчика / блоку детектування (вісь; рядок)
RH, %	логер	012/7, 006/2, +0,00	50–47; Г–И
RH, %	логер	210/7, 207/4, +6,00	47–50; Г–К
RH, %	логер	318/2, +9,00	44–45; Ж–И
Φ , н · см ⁻² · с ⁻¹	БД 2 ЕДС	305/2, +12,00	46 ₊₁₀₀ ; И ₊₈₀₀
Φ , н · см ⁻² · с ⁻¹	БД 1 СКЯБ	305/2, +12,00	46 ₊₂₈₅₀ ; И ₊₁₇₅₀
Φ , н · см ⁻² · с ⁻¹	БД 4 СКЯБ	304/3, +9,85	47 ₋₁₄₀₀ ; И ₋₂₀₀₀
Φ , н · см ⁻² · с ⁻¹	БД 9 СКЯБ	505/3, +19,00	44 ₊₂₀₀₀ ; К ₊₁₄₀₀
Φ , н · см ⁻² · с ⁻¹	БД 10 СКЯБ	210/6, +6,24	47 ₋₁₈₀₀ ; И ₊₂₄₀₀

крос-кореляційна функція від часового лагу для визначення часу (календарного зсуву), коли досягається максимальне значення КК між часовими рядами.

Результати та обговорення

Результати статистичної обробки результатів вимірювань RH та Φ , отриманих за період моніторингу з вересня 2022 р. по грудень 2025 р. у точках контролю (див. табл. 1), наведено в табл. 2 та 3. Ілюстрацію визначеної динаміки середньомісячних значень RH у приміщеннях об'єкта «Укриття» на фоні її усередненого за різними приміщеннями значення наведено на рис. 2. Отримані дані свідчать про те, що середньомісячні значення RH у різних приміщеннях на нижніх позначках об'єкта «Укриття» несуттєво відрізняються за статистичними параметрами розподілу (див. табл. 2), а за формою сезонних коливань мають синхронний характер щодо змін у часі (див. рис. 2). Упродовж дослідженого періоду моніторингу будь-якого тренда до збільшення або зменшення середньорічних значень RH не встановлено. Коефі-

цієнт кореляції між середньомісячними значеннями RH має дуже вузький діапазон (r становить від 0,91 до 0,99 за рівня значимості $\alpha = 0,001$). З огляду на те, що усереднене за різними приміщеннями значення середньомісячного показника (RH_сер, див. табл. 2) з високою точністю відтворює динаміку RH в окремих приміщеннях (див. рис. 2), кореляційний аналіз між часовими рядами RH та Φ та побудову крос-кореляційної функції проводили тільки для RH_сер.

Результати кореляційного аналізу часових рядів RH та Φ , наведені в табл. 4 у вигляді матриці КК ($r_{RH, \Phi}$), дають підстави зробити висновок про те, що впродовж дослідженого періоду моніторингу ступінь кореляції між Φ у різних точках контролю знаходився в діапазоні від дуже слабкого до середнього, а між RH та Φ — від слабкого до середнього. Для БД 4 СКЯБ кореляція за Φ була встановлена лише з БД 10 СКЯБ. Зазначимо, що за результатами аналізу даних СКЯБ у попередні роки [3] було відомо, що значення КК за Φ у різних точках контролю СКЯБ може суттєво відрізнятися залежно від обраного періоду статистичної обробки даних та віддаленості БД відносно границь зони локалізації

Таблиця 2. Параметри розподілу значень RH у приміщеннях об'єкта «Укриття», %

Параметр	Приміщення			RH_сер
	318/2	210/7, 207/4	012/7, 006/2	
Мінімальне	41,0	40,0	41,0	41,0
Максимальне	96,0	98,0	98,4	97,3
Середнє	66,5	70,4	72,8	69,9
Медіана	65,7	67,8	71,1	68,6
Стандартне відхилення	18,2	19,2	19,9	18,7
Коефіцієнт варіації, %	27,7	28,3	28,0	27,3

Таблиця 3. Параметри розподілу значення Φ у приміщеннях об'єкта «Укриття», $\text{н} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$

Параметр	Блок детектування Φ				
	БД 2 ЕДС	БД 1 СКЯБ	БД 4 СКЯБ	БД 9 СКЯБ	БД 10 СКЯБ
Мінімальне	10,3	526,4	374,9	780,3	342,9
Максимальне	23,4	560,7	440,0	840,0	370,5
Середнє	15,3	545,3	389,0	807,6	352,9
Медіана	15,3	545,9	384,9	806,1	351,3
Стандартне відхилення	3,1	9,2	15,6	17,1	8,1
Коефіцієнт варіації, %	20,2	1,7	4,1	2,1	2,3

Таблиця 4. Матриця коефіцієнтів кореляції між середньою відносною вологістю повітря у приміщеннях об'єкта «Укриття» ($RH_{\text{сер}}$) та Φ для вхідної вибірки даних та вибірки з лагом (часовим зсувом), наведених у дужках

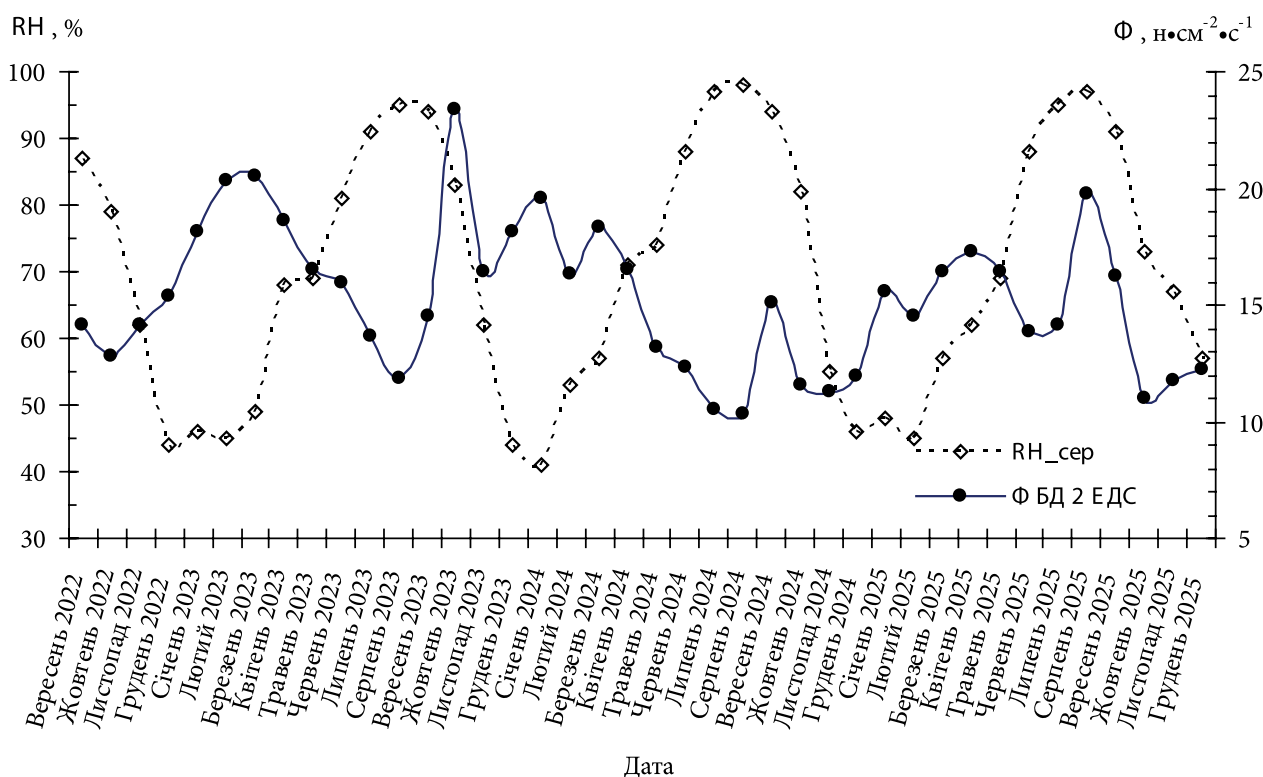
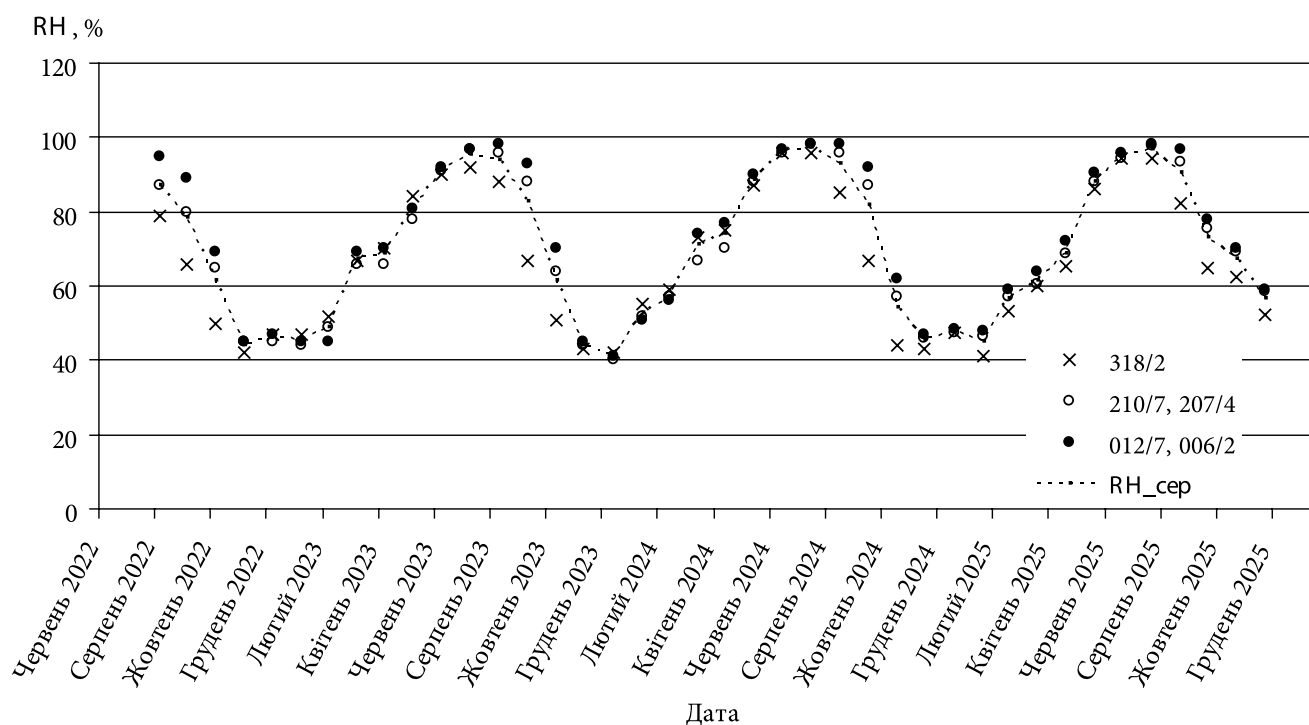
$RH_{\text{сер}} / \Phi$	$RH_{\text{сер}}$	Φ (БД 2 ЕДС)	Φ (БД 1 СКЯБ)	Φ (БД 4 СКЯБ)	Φ (БД 9 СКЯБ)	Φ (БД 10 СКЯБ)
$RH_{\text{сер}}$	1	-0,34 (-0,41/-0,42)	-0,28 (-0,59/-0,67)	-0,54 (-0,56/-0,63)	-0,50 (-0,73/-0,88)	-0,56 (-0,75/-0,82)
Φ (БД 2 ЕДС)	-0,34	1	0,34	-0,06	0,51	0,23
Φ (БД 1 СКЯБ)	-0,28	0,34	1	-0,03	0,67	0,53
Φ (БД 4 СКЯБ)	-0,54	-0,06	-0,03	1	-0,01	0,50
Φ (БД 9 СКЯБ)	-0,50	0,51	0,67	-0,01	1	0,40
Φ (БД 10 СКЯБ)	-0,56	0,23	0,53	0,50	0,40	1

ядерно небезпечних скупчень ПВМ у приміщенні 305/2. Це пов'язано з тим, що потік нейтронів, що реєструється БД, є інтегральним показником, на величину якого впливають багато факторів, таких як: фізичний стан ПВМ, потужність джерела нейтронів, відстань від їхньої поверхні до БД, наявність фонові складової потоку від інших скупчень ПВМ, внесок якої може змінюватись з часом. У результаті в різних точках контролю динаміка Φ має свої індивідуальні тренди та параметри сезонних коливань [3]. Таким чином, отримані в роботі дані у цілому підтверджують раніше зроблені висновки щодо особливостей формування динаміки Φ у точках контролю СКЯБ, а також доповнюють загальну картину полів кореляції сучасними даними та оцінками ступеня взаємозв'язку між часовими рядами RH та Φ у різних приміщеннях об'єкта «Укриття».

Результати порівняльного аналізу часових рядів, наведені на рис. 2–7, показали, що сезонні коливання

$RH_{\text{сер}}$ не збігаються з динамікою Φ та мають протилежну тенденцію за характером змін (r від -0,28 до -0,54, див. табл. 4). Відомо, що збільшення вологості середовища, що розмножує нейтрони, призводить до зменшення потоку нейтронів витоків і навпаки [5, 6]. Дані, наведені на рис. 2–7, не тільки підтверджують цей факт, але й свідчать про наявність явно вираженого календарного зсуву між часовими рядами RH та Φ : зменшення Φ запізнюється на зміну RH у часі. Результати кількісного аналізу цього явища між часовими рядами $RH_{\text{сер}}$ та Φ представлено на рис. 8 у вигляді крос-кореляційної функції від часового лагу.

На підставі даних, отриманих після послідовного зміщення часових рядів з дискретністю один місяць для Φ відносно RH з лагом від одного до 18, для кожної пари даних « $RH_{\text{сер}}$ — Φ » на графіку цієї функції було визначено три точки з найбільшими абсолютними значеннями КК. Перша точка відповідає першому максимуму КК між часовими рядами RH та Φ , що



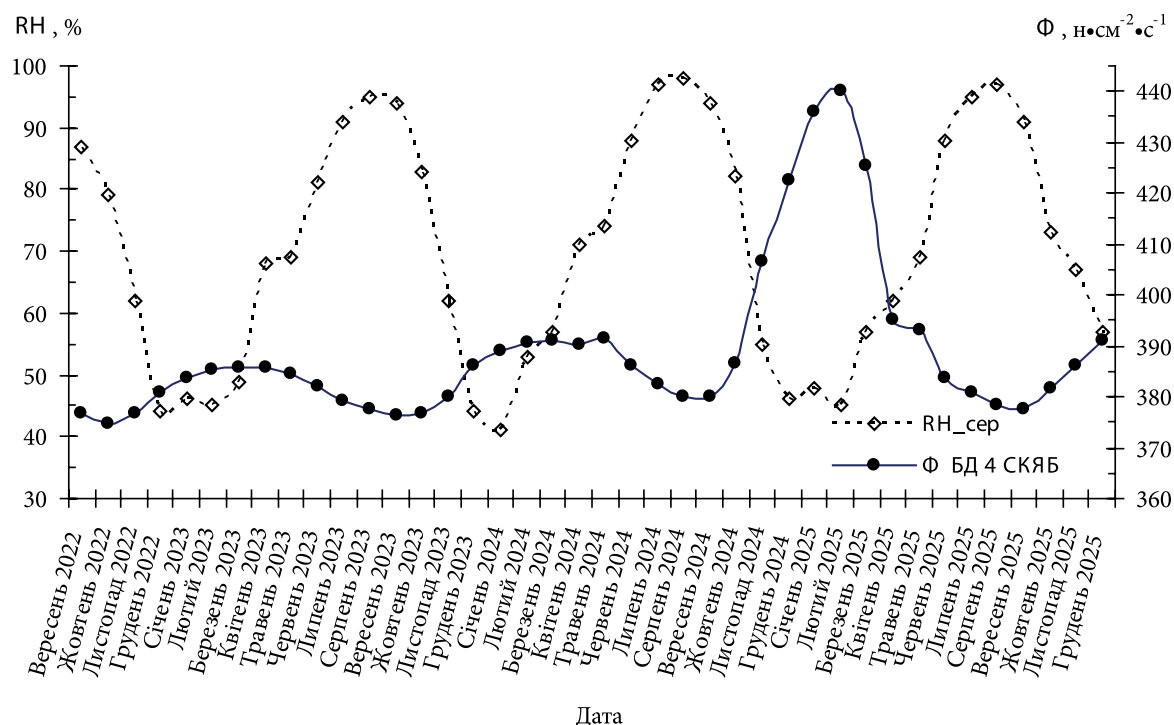


Рис. 4. Динаміка середньомісячних значень усередненої відносної вологості ($RH_{сер}$) повітря у приміщеннях об'єкта «Укриття» та Φ у місці розташування БД 4 СКЯБ (позначка +9,85)

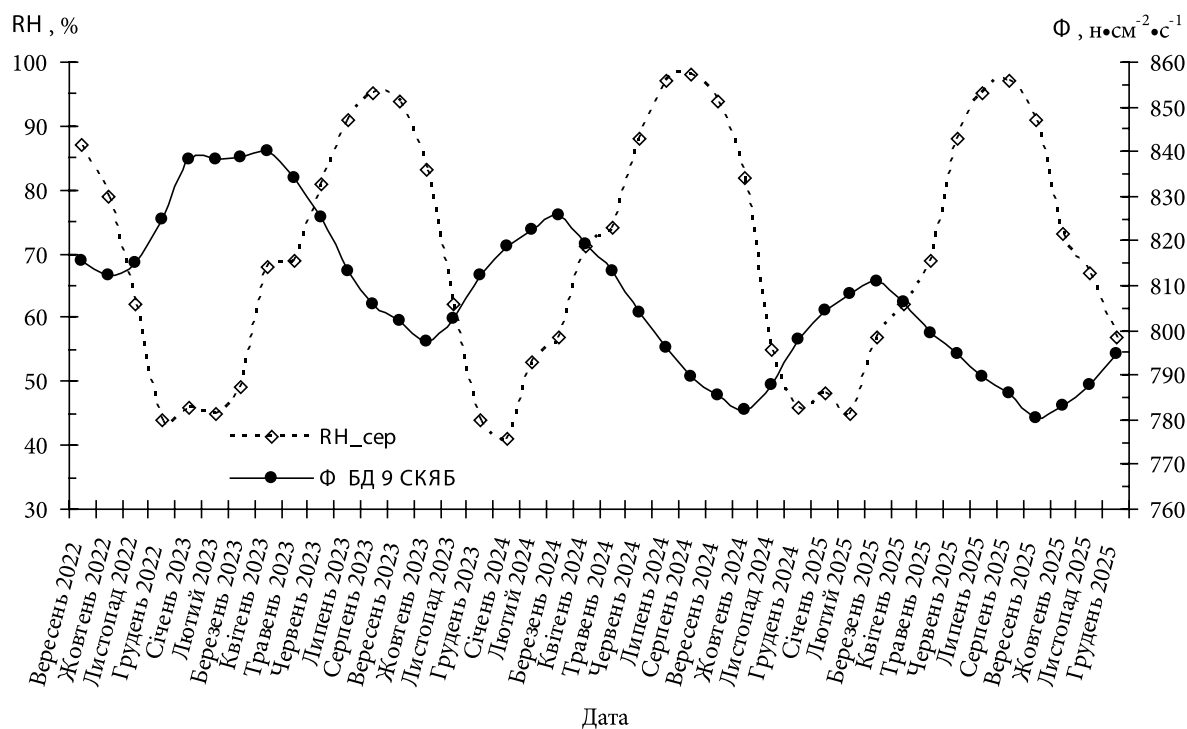


Рис. 5. Динаміка середньомісячних значень усередненої відносної вологості ($RH_{сер}$) повітря у приміщеннях об'єкта «Укриття» та Φ у місці розташування БД 1 СКЯБ (позначка +12,00)

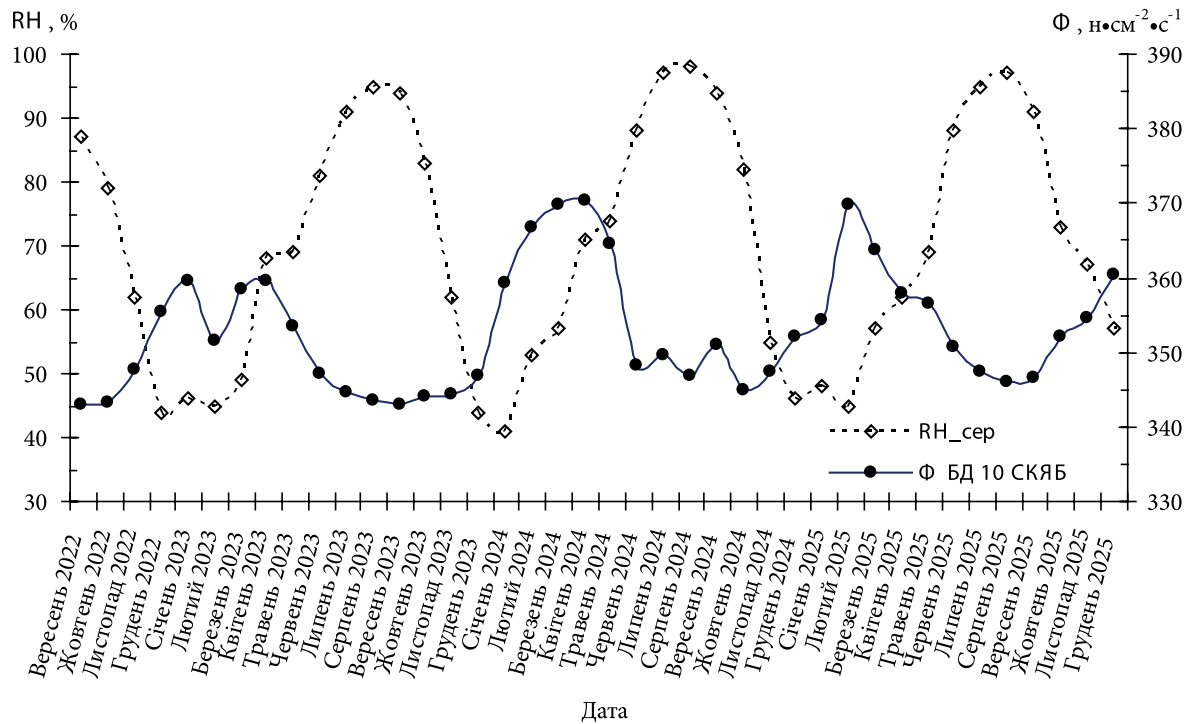


Рис. 6. Динаміка середньомісячних значень усередненої відносної вологості (RH_сер) повітря у приміщеннях об'єкта «Укриття» та Φ у місці розташування БД 9 СКЯБ (позначка +19,00)

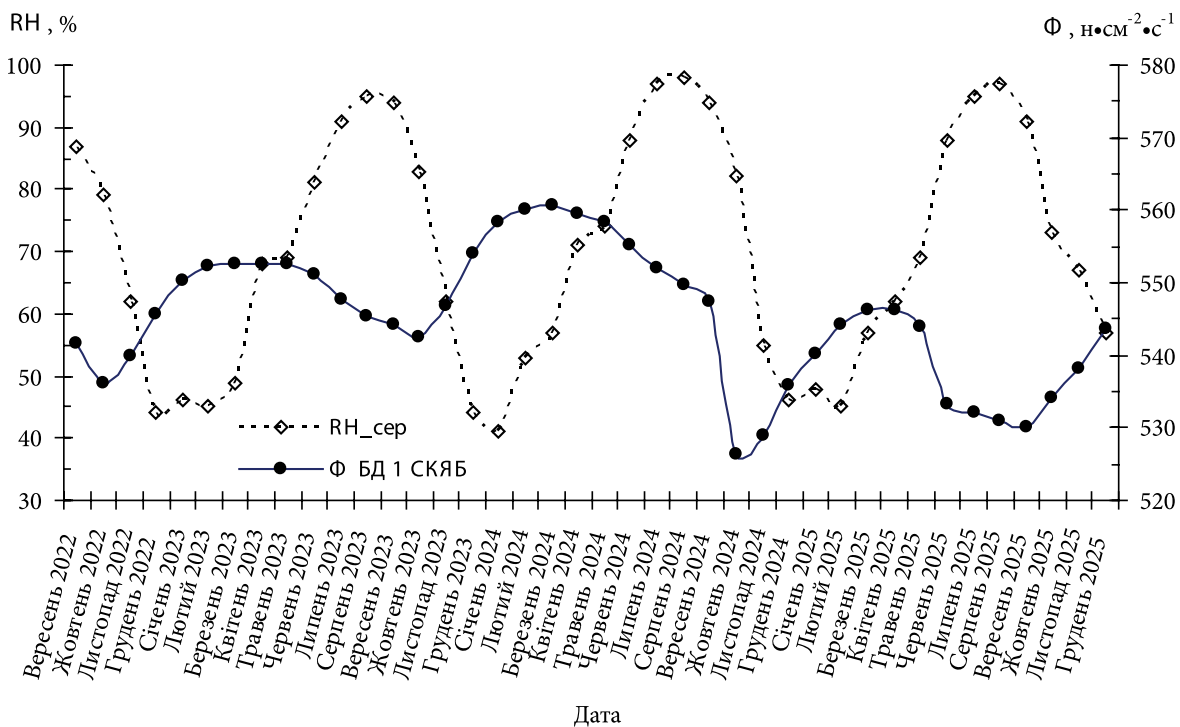


Рис. 7. Динаміка середньомісячних значень усередненої відносної вологості (RH_сер) повітря у приміщеннях об'єкта «Укриття» та Φ у місці розташування БД 10 СКЯБ (позначка +6,24)

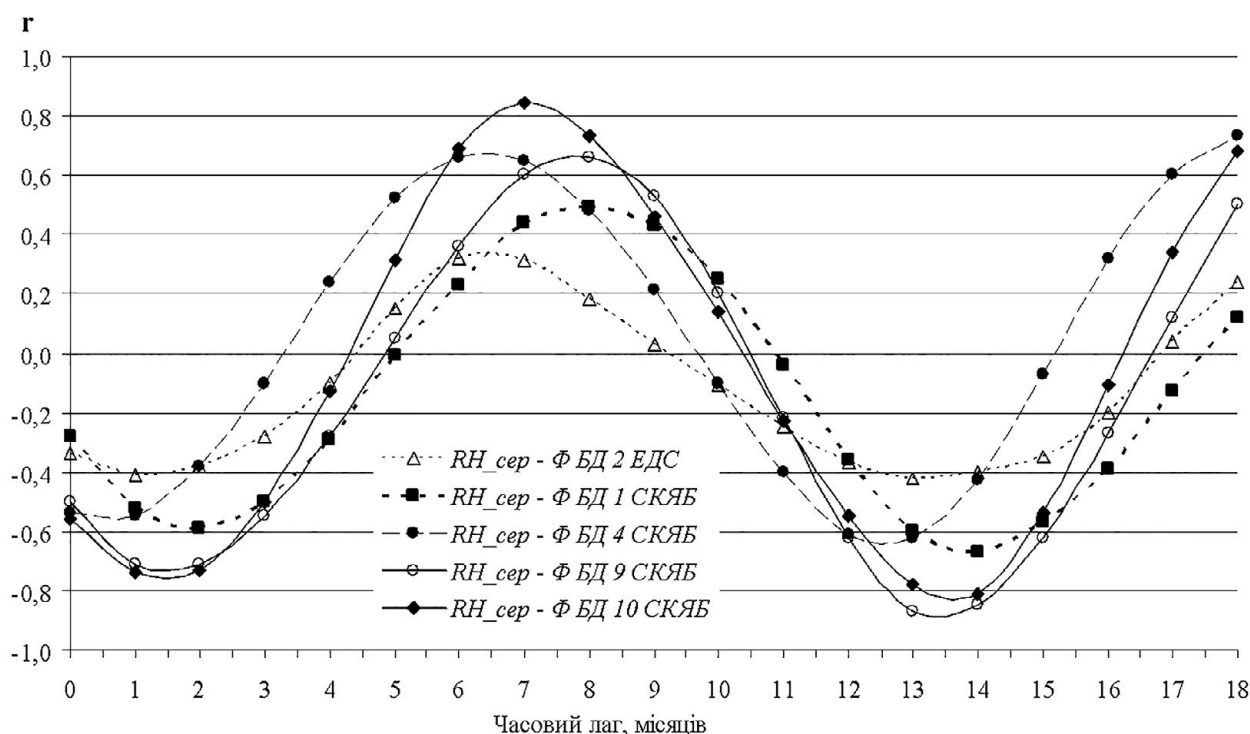


Рис. 8. Крос-кореляційна функція між середньомісячними значеннями вологості повітря у нижніх приміщеннях об'єкта «Укриття» ($RH_{сер}$) та щільністю потоку нейтронів (Φ) від часового лагу

мають протилежний характер змін ($r < 0$). Друга точка — це максимальний КК між часовими рядами RH та Φ в умовах досягнення теоретично можливої синхронної динаміки RH та Φ ($r > 0$) після зміщення часових рядів Φ на 6–8 лагів. Третя точка відповідає другому максимуму КК між часовими рядами RH та Φ , що знову мають протилежний характер змін ($r < 0$) після зміщення на 12–14 лагів. Положення другої точки на крос-кореляційній функції в розрахунок не брали, оскільки в умовах об'єкта «Укриття» таке явище досі не спостерігалось. Третю точку використовували для перевірки (верифікації) величини календарного зсуву між часовими рядами RH та Φ , оціненого за першою точкою, для впевненості, що впродовж наступних 12 місяців моніторингу цей календарний зсув циклічно відтворюється. У табл. 4 результати розрахунку КК між RH та Φ за умови зсуву часових рядів наведено в дужках, де перше значення відповідає на рис. 8 першій точці, а друге — третій.

За результатами оцінки запізнювання (лагу) взаємозв'язку між RH та Φ можна зробити такі висновки. Зменшення із часом вологості повітря у приміщеннях об'єкта «Укриття» справді супроводжується поступовим збільшенням Φ і навпаки. Затримка у часі становить від трьох тижнів (БД 4 СКЯБ) до двох календарних місяців (БД 1 СКЯБ). Для БД 9 та БД 10 СКЯБ

часовий лаг було оцінено як 1,5 місяця. До того ж, отримані дані свідчать про наявність часового лагу і між часовими рядами Φ . Можна припустити, що неврахування цього явища може також призводити до заниженої оцінки коефіцієнта взаємної кореляції між Φ у різних точках контролю.

Згідно з даними табл. 4, значення КК, що відповідають другому максимуму від'ємної кореляції, є дещо вищими (за абсолютним значенням) порівняно з першим. Це може бути наслідком зменшення чисельності вибірки даних, що аналізується. Таким чином, можна стверджувати, що при врахуванні наявності календарного зсуву між часовими рядами ступінь зв'язку між RH та Φ у різних точках контролю може бути істотно вищим — від помірного до сильного. Отримані в роботі дані можна розглядати як підтвердження раніше зробленого припущення про наявність впливу зміни вологості повітря у приміщеннях об'єкта «Укриття» на появу сезонних коливань у динаміці щільності потоку нейтронів у точках контролю стану ПВМ в об'єкті «Укриття».

Висновки

Відносна вологість повітря у приміщеннях об'єкта «Укриття» на нижніх позначках будівлі 4-го

енергоблоку Чорнобильської АЕС (0,00–9,00) має тісний взаємний кореляційний зв'язок. Рівність вибірових статистичних оцінок параметрів розподілу результатів вимірювань вологості повітря дає змогу використовувати його середнє значення для дослідження взаємозв'язку з часовими рядами щільності потоку нейтронів, зареєстрованими в точках контролю стану ПБМ за допомогою блоків детектування ЕДС та СКЯБ.

Отримані результати підтверджують раніше отримані дані про те, що коефіцієнт взаємної кореляції між значеннями Φ у різних точках контролю навколо ПБМ може змінюватися від дуже слабкого до середнього. Потік нейтронів, що реєструється БД ЕДС та СКЯБ, є інтегральним показником, на величину якого впливають багато факторів: фізичний стан середовища, що розмножує нейтрони, відстань від їхньої поверхні до БД, наявність фонові складової потоку від інших скупчень ПБМ та ін. Усе це впливає на індивідуальні особливості динаміки Φ в місцях розташування БД нейтронів та параметри сезонних коливань. Однак існує група точок контролю стану ПБМ у приміщенні 305/2 об'єкта «Укриття», для яких характерним є наявність синхронних змін та сталих трендів у динаміці Φ .

Метод визначення часового лагу, застосований у роботі, дав змогу провести оцінку величини календарного зсуву між динамікою RH та Φ у різних точках контролю. Наочно показано, що між зміною вологості повітря в приміщеннях об'єкта «Укриття» та появою сезонних коливань у динаміці щільності потоку нейтронів існує причинно-наслідковий зв'язок.

У подальших дослідженнях із застосуванням методу визначення часового лагу необхідно сконцентрувати увагу на точках контролю щільності потоку нейтронів, розміщених у приміщенні 305/2 навколо зони локалізації ПБМ, які визнані потенційно ядерно небезпечними і для яких зміна вологості середовища, що розмножує нейтрони, є фактором зміни їхніх ядерно-фізичних параметрів.

Список використаної літератури

1. Об'єкт «Укриття» в умовах нового безпечного конфайнмента / В. О. Краснов, А. В. Носовський, С. А. Паскевич, В. М. Рудько. – Чорнобиль : ІПБ АЕС НАН України, 2021. – 344 с.
2. Saveliev M. V. The nuclear safety monitoring system for fuel-containing materials located in destroyed Unit No. 4 of the Chornobyl NPP and proposals for its modernization /

- M. V. Saveliev, R. L. Godun, M. A. Pantin [et al.] // Nuclear Physics and Atomic Energy. – 2022. – Vol. 23. – P. 172–181.
3. Mykhailov O. V. Features of Neutron Flux Density and Gamma-Radiation Exposure Dose Rate Dynamics in ChNPP Shelter Object after the New Safe Confinement Commissioning / O. V. Mykhailov, M. V. Saveliev, K. O. Sushchenko [et al.] // Nuclear Power and the Environment. – 2023. – Vol. 2 (27). – P. 44–55.
4. Програма моніторингу паливовмісних матеріалів (ПБМ) ОУ (ядерна та радіаційна безпека ОУ). Розділ 6 / ДСП «Чорнобильська АЕС», інв. № 04, Чорнобиль, 2018. – 72 с.
5. Высотский Е. Д. Динамика нейтронной активности и подкритичность ядерно-опасного скопления в условиях комплекса НБК-ОУ / Е. Д. Высотский, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2018. – Вып. 30. – С. 78–86.
6. Высотский Е. Д. Экспертная оценка текущего уровня подкритичности скоплений топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» после установки нового безопасного конфайнмента / Е. Д. Высотский, К. А. Сущенко, Р. Л. Годун // Ядерная энергетика та довкілля. – 2020. – № 1 (16). – С. 49–56.
7. DLT-11-Pt. Логер температури та відносної вологості в комплекті з ТСП-1-6. – Режим доступу: <https://ao-tera.com/img/common/content/files/PDF/HLT-01 %2C10/HLT-10-HLT-11-manual-ua-2.pdf>.
8. RC-4HC Quick Start Guide. Elitech Technology. Inc. – Available at: <https://www.elitechlog.com/wp-content/manuals/RC-4-RC-4HA-RC-4HC-instructions.pdf>.
9. Температура бетону навколо границь зони локалізації ядерно-небезпечних скупчень паливовмісних матеріалів в об'єкті «Укриття» ЧАЕС / О. В. Михайлов, А. О. Дорошенко, М. І. Павлюченко, С. А. Атарян // Ядерная энергетика та довкілля. – 2023. – № 2 (27). – С. 20–29.
10. Surakhi O. Time-lag selection for time-series forecasting using neural network and heuristic algorithm / O. Surakhi, M. A. Zaidan, P. L. Fung [et al.] // Electronics. – 2021. – Available at: <https://doi.org/10.3390/electronics10202518>.

O. V. Mykhailov, M. I. Pavliuchenko, A. O. Doroshenko

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 36a, Kirova St., Chornobyl, 07270, Ukraine*

**Results of the Search for Correlations between
Relative Air Humidity and Neutron Flux Density
in the Premises of the New Safe Confinement Complex
and the Shelter Object**

The paper presents the results of systematization and analysis of measurements of relative humidity (RH) and neutron flux density (NFD) in the premises of New Safe Confinement (NSC) and Shelter Object (SO) complex in the period from September 2022 to December 2025. After the NSC arch was installed in its design position (November 2016), in accordance with the Fuel-Containing Materials (FCM) Monitoring Program (2018), studies of dynamics of temperature, RH, speed and direction of airflows in the SO premises are being carried out. The main goal of such studies is to obtain information about microclimate changes in the NSC space and to assess its impact on nuclear and radiation state of the FCM, to develop and to implement corrective measures for ventilation systems operation.

This work is aimed to search and mathematically substantiate the presence or absence of relation between RH and NFD in the SO premises, where FCM clusters are located, according to the monitoring data of 2022–2025.

The RH measurements in the SO premises were carried out using autonomous weather stations of PCE FWS type and loggers of RC-4HC type. The NFD values in RH in the SO premises were obtained using the measurement of channels of Nuclear Safety Monitoring System and Expert Research System.

It was established that the average monthly RH values in the SO premises, which are located within the building elevations of 0.00–9.00, in axes 44–48, rows K–L, have synchronous seasonal fluctuations and very significant Pearson linear correlation coefficient ($r > 0.9$). It is shown that RH decrease is accompanied by increase in NFD in the controlled premises and vice versa. According to the results of cross-correlation analysis, it was found that in that place may occur a moderate to high degree of correlation between the time series of average monthly values of RH and NFD, provided that their calendar is shifted by a time lag of three weeks to two calendar months.

Keywords: Shelter Object, fuel-containing materials, relative air humidity, neutron flux density, correlation coefficient, time lag.

References

1. Krasnov V. O., Nosovskyi A. V., Paskevych S. A., Rudko V. M.; A. V. Nosovskyi (ed.) (2021). *Obiekt "Ukryttia" v umovakh novoho bezpechnoho konfainmenta* [The Shelter Object in Conditions of the New Safe Confinement]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 344 p. (in Ukr.)
2. Saveliev M. V., Godun R. L., Pantin M. A., Skiter I. S., Sushchenko K. O. (2022). The nuclear safety monitoring system for fuel-containing materials located in destroyed Unit No. 4 of the Chornobyl NPP and proposals for its modernization. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, vol. 23, pp. 172–181.
3. Mykhailov O. V., Saveliev M. V., Sushchenko K. O., Dmytryshyn V. V. (2023). Features of Neutron Flux Density and Gamma-Radiation Exposure Dose Rate Dynamics in ChNPP Shelter Object after the New Safe Confinement Commissioning. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 2 (27), pp. 44–55. (in Ukr.)
4. *Monitoring Program for Fuel-Containing Materials (FCM) of the Shelter Object (Nuclear and Radiation Safety of the SO)*. Section 6. State Enterprise "Chornobyl NPP", Inv. no. 04, Chornobyl, 2018, 72 p. (in Ukr.)
5. Vysotskyi E. D., Godun R. L., Doroshenko A. O. (2018). The dynamics of neutron activity and subcriticality of a nuclear-dangerous cluster in the conditions of NSC-SO complex. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl*, vol. 30, pp. 78–86. (in Rus.)
6. Vysotskyi E. D., Sushchenko K. O., Godun R. L. (2020). Expert assessment of the current criticality level of clusters of fuel-containing materials after the New Safe Confinement installing. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 1 (16), pp. 49–56. (in Rus.)
7. DLT-10 / DLT-11 Manual. Temperature and Humidity Loggers (Portable Recorders). Kharkiv: AO TERA LLC, 14 p. Available at: <https://ao-tera.com/img/common/content/files/PDF/HLT-01 %2C10/HLT-10-HLT-11-manual-ua-2.pdf>.
8. Elitech Technology, Inc. Quick Start Guide RC-4 / RC-4HA / RC-4HC. Temperature and Humidity Data Loggers Elitech Technology, Inc., 8 p. Available at: <https://www.elitechlog.com/wp-content/manuals/RC-4-RC-4HA-RC-4HC-instructions.pdf>
9. Mykhailov O. V., Doroshenko A. O., Pavliuchenko M. I., Attarian S. A. (2023). Temperature of Concrete Around Localization Area Boundaries of Nuclear Hazardous Clusters of Fuel-Containing Materials Inside the Shelter Object of the Chornobyl NPP. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 2 (27), pp. 20–29. (in Ukr.)
10. Surakhi O., Zaidan M. A., Fung P. L., Hossein Motlagh N., Serhan S., AlKhanafseh M., Ghoniem R. M., Hussein T. (2021). Time-lag selection for time-series forecasting using neural network and heuristic algorithm. *Electronics*, vol. 10, art. 2518. Available at: <https://doi.org/10.3390/electronics10202518>.

Надійшла / Received 16.02.2025

Рекомендована до друку / Accepted 19.02.2026