

М. С. Юров¹, В. І. Борисенко²

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна

² Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

Активність ядерного палива РБМК-1000 на момент аварії 26.04.1986 р.

Ключові слова:

відпрацьоване ядерне паливо, питома активність ядерного палива, залишкове енерговиділення, тепловидільна збірка, РБМК-1000, програмний код SCALE

Представлено інформацію про важливість визначення радіаційних характеристик опроміненого і відпрацьованого ядерного палива на енергоблоках АЕС. Радіаційні характеристики ядерного палива — активність і залишкове енерговиділення — визначають як можливий перебіг аварійних сценаріїв, так і можливі радіаційні наслідки аварій на ядерних установках. Наведено результати аналітичного моделювання у програмному коді SCALE зміни активності різних ізотопів опроміненого ядерного палива РБМК1000 для режиму роботи на постійній потужності, а також для режиму роботи РБМК-1000 на фактичній потужності напередодні аварії 26.04.1986 р. Для моделювання обрано тепловидільну збірку (ТВЗ) РБМК-1000 зі збагаченням 2,0 %, яка використовувалася на РБМК-1000. Проведено порівняння результатів моделювання з даними, наведеними в наукових публікаціях щодо зміни активності ядерного палива РБМК-1000 під час його експлуатації. Продемонстровано суттєвий вплив на активність ядерного палива саме режиму навантаження ТВЗ РБМК-1000. Результати моделювання показують, що питома активність, а відповідно й загальна активність ядерного палива в активній зоні РБМК-1000, для режимів навантаження, що моделювалися, суттєво відрізняються в момент «зупинки» реактора, а саме в ~3 рази. Тому фактичні радіаційні наслідки в разі пошкодження ядерного палива суттєво залежать від режиму навантаження, особливо за останній період перед плановим або позаплановим зупином ядерного реактора. Результати дослідження є важливими для порівняння наслідків можливої аварії на ядерному реакторі з фактичним і проектним навантаженням ядерного палива, навіть у разі однакового значення досягнутого рівня вигорання.

Вступ

Радіаційні характеристики (РХ) відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) є вирішальними для забезпечення ядерної та радіаційної безпеки у процесах подальшого поводження з ВЯП: зберігання в басейнах витримки, транспортування, зберігання в сухих сховищах ВЯП, захоронення в геологічних сховищах. Також РХ опроміне-

ного ядерного палива (ОЯП), яке ще задіяне в паливних кампаніях на ядерному реакторі, визначають ядерну й радіаційну безпеку ядерної установки в цілому.

Особливу важливість убезпечення поводження з ОЯП під час його експлуатації на АЕС України набуло в останні роки у зв'язку з загрозами зовнішнього впливу від ураження ракетним і/або іншими видами озброєнь.

© М. С. Юров, В. І. Борисенко, 2024. Ліцензія CC BY 4.0

Необхідно відзначити суттєву відмінність радіаційного впливу на персонал, населення і довкілля в цілому при пошкодженні ВЯП і в разі пошкодження ОЯП під час паливної кампанії.

Причина відмінності полягає в різному ізотопному складі ВЯП і ОЯП, перш за все за компонентами — короткоіснуючими ізотопами, до яких належать радіоактивні благородні гази, а також ізотопи йоду.

У роботі [1] показано, що навіть зміна режиму роботи реакторної установки (РУ) напередодні аварії або короткочасного зупину РУ суттєво впливає на можливі радіаційні наслідки в разі пошкодження ядерного палива.

РХ ОЯП визначають також і розмножувальні властивості ядерного палива, що є важливим для аналізу ядерної безпеки в умовах зміни геометрії розташування самого ядерного палива й матеріального складу оточуючих речовин у разі зовнішнього впливу на ядерну установку в цілому. Так, наприклад, і досі є невирішеними питання ядерної безпеки ядерного палива в складі лавоподібних паливовмісних матеріалів (ЛПВМ), утворених під час аварії на РБМК-1000 енергоблоку № 4 Чорнобильської АЕС (ЧАЕС-4) у 1986 р. [2].

У представлений роботі проведено порівняльний аналіз РХ ядерного палива РБМК-1000 на момент аварії, описаний у роботах [3–7], з результатами наших досліджень, отриманих на моделі SCALE.

Аналіз радіаційних характеристик РБМК-1000

Інтегральна оцінка активності викиду під час активної фази аварії (26.04–06.05.1986 р.) становить ~50 МКі [3, 4].

Необхідно звернути увагу на те, що короткоіснуючі радіонукліди з періодом напіврозпаду 10–100 год практично не враховані під час проведення оцінювання обсягу інтегрального викиду, тому що в більшості оцінок перерахунок інтегральної активності виконувався станом на 06.05.1986 р. — кінець активної фази викидів із реактора [4].

Перше нагадування про важливість урахування в інтегральний викид короткоіснуючих радіонуклідів було зроблено в роботі [5], у якій представлена більш консервативна оцінка інтегрального викиду ~150 МКі, а в публікації МАГАТЕ [6] дана оцінка викиду ~380 МКі.

Суттєво змінилися й оцінки обсягів викиду за окремими ізотопами [5–7].

Таблиця 1. Викид радіонуклідів з 4-го енергоблоку до накопиченого в ядерному паливі, %

Посилання	¹³¹ I	¹³² Te	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
[3]	20	15	10	13
[7]	50÷60	25÷60	23÷43	23÷43
[5]	60÷100	–	60	60

У табл. 1. наведено дані з публікацій [3, 5, 7] щодо викиду радіонуклідів.

Суттєво відрізняються й оцінки вигорання ядерного палива РБМК-1000 на момент аварії, отримані за різними методиками [8–10]. Так, наприклад, у роботі [8] середнє вигорання палива оцінено на рівні ~9–10 МВт·д/кг U; у роботі [9] середнє вигорання палива оцінено на рівні ~12–13 МВт·д/кг U; у роботі [10] цей показник становить ~14 МВт·д/кг U.

Причинами таких відмінностей у значеннях вигорання ядерного палива можуть бути як недосконалість і похибки самих методик їхнього визначення, так і залежність від географії відбору проб.

Розрахункові значення вигорання ядерного палива тепловидільної збірки (ТВЗ) РБМК-1000 ЧАЕС-4 на момент аварії наведено в табл. 2.

Згідно з даними табл. 2 можна оцінити, що середнє вигорання становить:

~90 % від усіх ТВЗ із найбільшим вигоранням ~12,02 МВт·д/кг U;

~82 % від усіх ТВЗ із найбільшим вигоранням ~12,6 МВт·д/кг U.

Така оцінка дає діапазон можливої варіації значень вигорання ядерного палива як у зразках ЛПВМ

Таблиця 2. Вигорання ядерного палива ТВЗ РБМК-1000 ЧАЕС-4 на момент аварії [7]

№	Кількість ТВЗ, од.	Максимальне вигорання, МВт·д/кг U	Мінімальне вигорання, МВт·д/кг U	Середнє вигорання, МВт·д/кг U
1	721	14,766	13,029	13,898
2	392	13,029	11,292	12,161
3	154	11,292	9,554	10,423
4	101	9,554	7,817	8,686
5	35	7,817	6,080	6,949
6	43	6,080	4,343	5,212
7	41	4,343	2,606	3,475
8	172	2,606	0	1,303
9	1659	14,766	0	10,912

об'єкта «Укриття», так і в зразках викиду назовні під час аварії. Щодо ядерного палива, що залишилося в складі твелів ТВЗ із малим рівнем вигорання (див. пп. 5–8 табл. 2) і залишки якого можна побачити на фото з об'єкта «Укриття», то таке паливо мало ймовірно входить до складу ЛПВМ або потрапило у викид, оскільки за умов вигорання менше 6 МВт·д/кг U залишкових енерговиділень недостатньо для плавлення ядерного палива.

Таким чином, питання модельного й експериментального визначення РХ ОЯП і ВЯП є актуальним завданням для вдосконалення процедур реагування на комунальні аварії на об'єктах атомної енергетики.

Радіаційні характеристики опроміненого ядерного палива РБМК-1000

Як уже було відмічено вище, РХ є важливими під час аналізу безпеки поведінки з ВЯП, оскільки дають змогу оцінити параметри ядерної безпеки, а також рівні іонізуючого випромінювання та енерговиділення. Ці дані необхідні для розробки ефективних систем захисту, охолодження та ізоляції систем зберігання, а також для визначення тривалості періоду активного охолодження в басейнах витримки ядерного палива і ступеня радіаційного захисту. Урахування РХ продуктів поділу під час аналізу безпеки дозволяє прогнозувати шляхи можливої міграції радіоактивних матеріалів у разі аварій за різними сценаріями, що є важливим для розробки ефективних заходів щодо мінімізації наслідків таких подій.

Для визначення РХ ОЯП і ВЯП зазвичай використовують заздалегідь розраховані РХ для різних типів РУ і для різних рівнів вигорання ядерного палива [11]. Недолік такого підходу полягає в тому, що інформація про РХ отримана в умовах проектного режиму експлуатації РУ. Зокрема ТВЗ, що моделюється, працює на постійній потужності весь термін паливної кампанії, без урахування перехідних процесів (наприклад, зміна потужності), а також без урахування фактичної зміни потужності ТВЗ як в ході однієї паливної кампанії, так і в різних паливних кампаніях. У реальних умовах такі процеси суттєво впливають на РХ ядерного палива, зокрема на вигорання та накопичення продуктів поділу [1]. У [11] наведено узагальнені дані для певного типу ядерного палива та рівня його вигорання для РУ з ВВЕР і РБМК. Однак у реальних умовах рівень досягнутого вигорання може суттєво відрізнятись

залежно від фактичного графіку навантаження ТВЗ і активної зони в цілому.

У нашій публікації [1] було наведено інформацію щодо суттєвого впливу режиму навантаження ТВЗ ВВЕР-1000 на активність і залишкове енерговиділення ОЯП, навіть за умов однакового вигорання ОЯП. Як було підкреслено вище, активність та залишкове енерговиділення ядерного палива на момент зупинки ядерного реактора визначаються як навантаженням активної зони й ТВЗ, так і величиною навантаження за останній період експлуатації.

Результати моделювання радіаційних характеристик ОЯП РБМК-1000

Для оцінки впливу на РХ ОЯП РБМК-1000 режиму навантаження РУ напередодні аварії 26.04.1986 р. проведено порівняльний аналіз щодо РХ ОЯП РБМК-1000 для двох випадків:

роботи на номінальному рівні потужності 3200 МВт до вигорання 11,25 МВт·д/кг U (режим 1);

роботи останню добу перед аварією 26.04.1986 р. на потужності відповідно до даних навантаження ЧАЕС-4 до вигорання 11,25 МВт·д/кг U (режим 2).

Рівень вигорання ОЯП $\sim 11,25$ МВт·д/кг U відповідає середньому вигоранню ОЯП ЧАЕС-4 напередодні аварії [7].

На рис. 1 наведено графіки фактичного і модельного навантаження РБМК-1000 ЧАЕС-4.

Моделювання вигорання палива РБМК-1000 проводилося в програмному коді SCALE [12]. Цей код містить у собі різні типи пакетів функціональних модулів та має обширні бібліотеки перерізів для нейтронних взаємодій, виходу гамма-квантів та гамма-взаємодій. За допомогою SCALE можна вирішувати такі завдання, як аналіз критичності, визначення ізотопного складу залежно від глибини вигорання ОЯП тощо. Для моделювання вигорання ядерного палива РБМК-1000 у коді SCALE використовувалися три модулі: TRITON, ORIGEN-S та OPUS.

Для характеристики ВЯП радіоактивні ізотопи умовно поділяють на три групи, залежно від значення періоду напіврозпаду:

короткоіснуючі ізотопи мають невеликий період напіврозпаду до 30 років і становлять основну небезпеку на першому етапі можливої аварії із пошкодженням ядерного палива;

середньоіснуючі ізотопи мають період напіврозпаду від кількох десятиліть до сотень років;

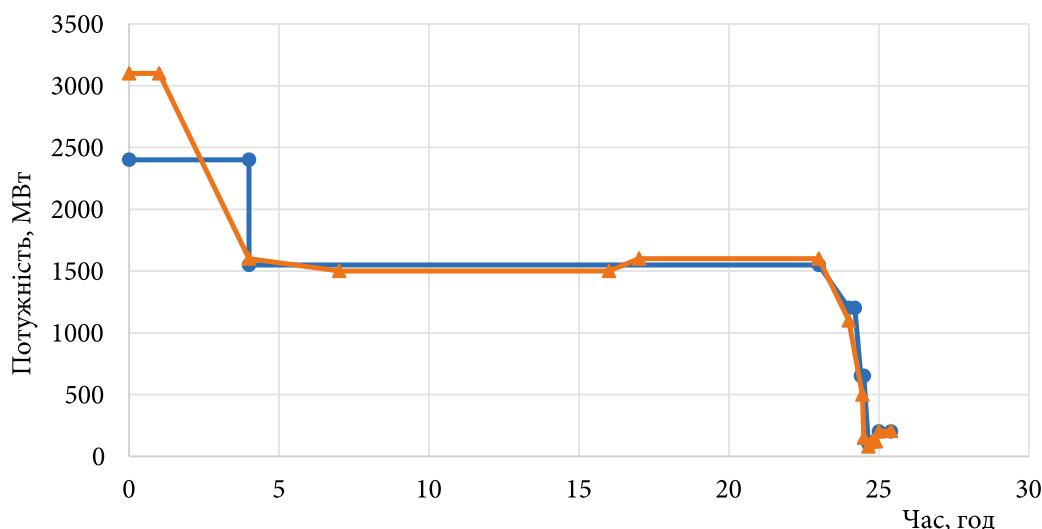


Рис. 1. Графіки фактичного (▲) й модельного (●) навантаження РБМК-1000 ЧАЕС-4

довгоіснуючі ізотопи з періодом напіврозпаду від тисяч до мільйонів років.

Для короткоіснуючої групи радіонуклідів для детального аналізу вибір припав на ізотопи йоду (^{131}I , ^{133}I , ^{135}I), ксенону (^{133}Xe , ^{135}Xe) та криптону (^{88}Kr). Такий вибір є обґрунтованим через їхній порівняно короткий період напіврозпаду та значний внесок у загальну активність після планового або «вимушеного» зупини РУ. Також до цієї групи входять ^{144}Pr , ^{97}Nb , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{97}Zr , ^{151}Pr , ^{99}Mo , ^{144}Ce .

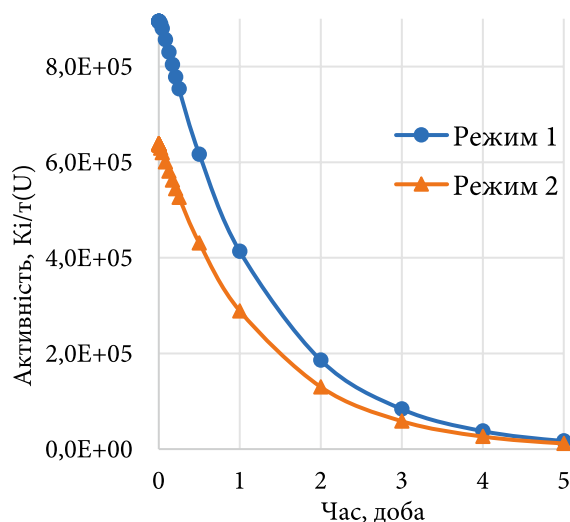
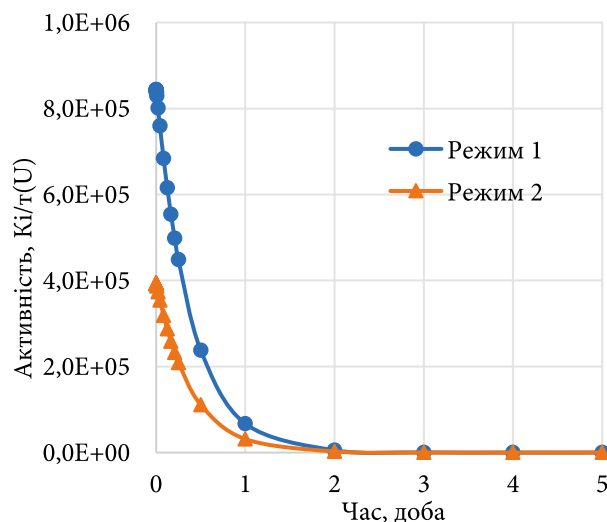
На рис. 2–5 наведено графічні залежності в часі зміни питомої активності відповідно для ^{133}I , ^{135}I , ^{97}Nb і ^{88}Kr після аварії на РБМК-1000.

На рис. 6 наведено графічні залежності зміни питомої активності ядерного палива РБМК-1000 для режимів 1 і 2 протягом доби перед аварією.

На рис. 7 наведено графічні залежності зміни питомої активності ядерного палива РБМК-1000 для режимів 1 і 2 протягом доби після аварії.

З наведених на рис. 6 і 7 даних видно, що згідно з розрахунками на момент аварійної «зупинки» РБМК-1000 загальна питома активність ОЯП для режиму 1 (P1) становила $9,1 \cdot 10^7$ Кі/т U, а для режиму 2 (P2) — $3,1 \cdot 10^7$ Кі/т U. Звертаємо увагу, що на момент зупинки активність у проектному режимі 1 була втричі більшою, ніж у фактичному режимі 2. Із часом (див. рис. 7 — відношення P1/P2) різниця між цими показниками зменшується, що відбувається за рахунок швидкого розпаду короткоіснуючих ізо-топів.

Аналіз результатів моделювання питомої активності за окремими ізотопами та інтегральної питомої

Рис. 2. Питома активність ^{133}I після аваріїРис. 3. Питома активність ^{135}I після аварії

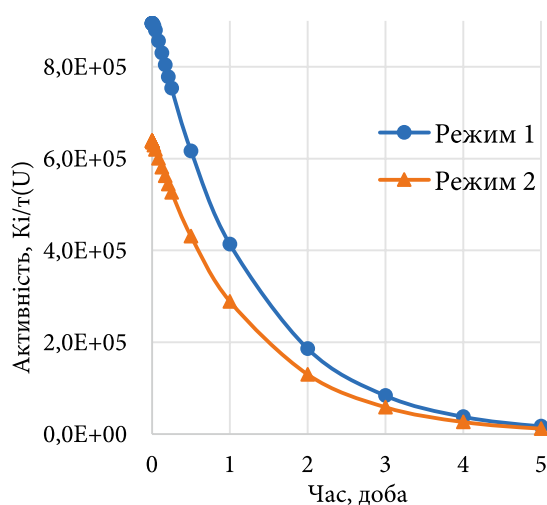
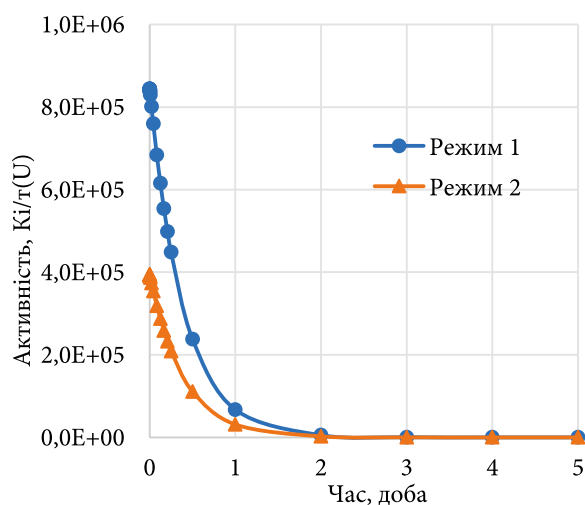
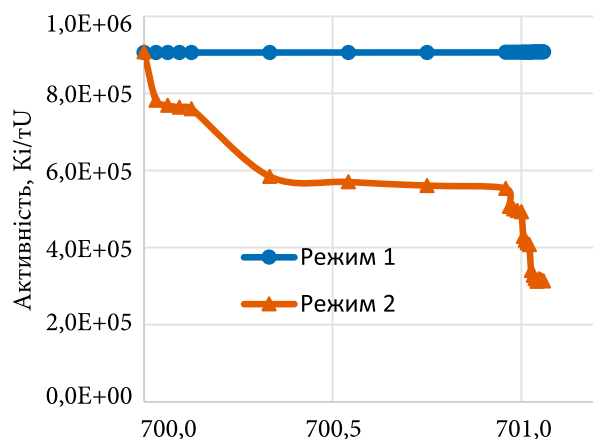
Рис. 4. Пітома активність ^{97}Nb після аваріїРис. 5. Пітома активність ^{88}Kr після аварії

Рис. 6. Інтегральна активність ядерного палива напередодні аварії

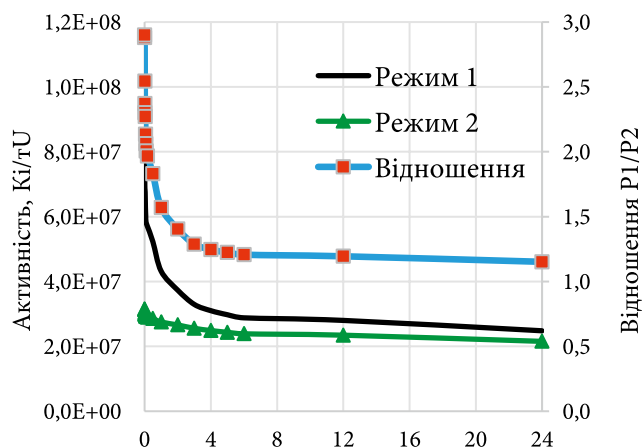


Рис. 7. Інтегральна активність ядерного палива після аварії

Таблиця 3. Пітома активність ізотопів у режимах 1 і 2

Ізотопи	Період напіврозпаду	Пітома активність, Кі/т U		Відношення P1/P2
		Режим 1	Режим 2	
^{103}Ru	39,25 діб	5.99E+05	5.93E+05	1,01
^{106}Ru	372,56 діб	1.41E+05	1.40E+05	1,01
$^{129\text{m}}\text{Te}$	33,6 діб	1.99E+04	1.97E+04	1,01
^{132}Te	78,03 год	6.10E+05	5.47E+05	1,12
^{134}Te	41,8 хв	8.22E+05	1.35E+05	6,09
^{131}I	8,04 діб	4.24E+05	4.09E+05	1,04
^{132}I	2,284 год	6.22E+05	5.62E+05	1,11
^{133}I	20,8 год	8.95E+05	6.39E+05	1,40
^{134}I	52,6 хв	1.01E+06	3.06E+05	3,30
^{134}Cs	2,062 р.	1.65E+04	1.65E+04	1,00
^{137}Cs	30,0 р.	3.67E+04	3.67E+04	1,00

активності ядерного палива РБМК-1000 (див. рис. 2–7 і табл. 3) демонструє, що врахування фактичного графіку навантаження РБМК-1000 напередодні аварії призводить, як уже було зазначено вище, до майже триразової відмінності в показниках інтегральної активності і майже до десятиразової відмінності для короткоіснуючих ізотопів з періодами напіврозпаду до 1 год, наприклад ^{134}I , ^{134}Te .

Очевидно, що зі збільшенням значення періоду напіврозпаду відмінність у значеннях питомої активності буде зменшуватися. Так, наприклад, для ізотопів з періодом напіврозпаду до 1 доби (^{133}I), відношення $P1/P2$ становить $1,5 \div 2,0$; для ізотопів з періодом напіврозпаду до 10 діб (^{131}I) відношення $P1/P2$ становить $1,02 \div 1,05$. Зрозуміло, що для більш довгоіснуючих ізотопів режим навантаження РБМК-1000 напередодні аварії практично не впливає на питому активність.

Таким чином, фактичний графік навантаження РБМК-1000 за добу напередодні аварії суттєво впливає як на питому активність найбільш короткоіснуючих ізотопів (зміна до 10 разів), так і на інтегральну питому активність ядерного палива (зміна до трьох разів).

Для коректної оцінки потужності можливого радіоактивного викиду під час аварії на ядерному реакторі, що перебуває в експлуатації на потужності, обов'язково необхідно враховувати фактичне навантаження саме в період експлуатації ядерного реактора до аварійного викиду.

Висновки

Радіаційні характеристики ядерного палива ядерного реактора є вирішальними для аналізу безпеки та оцінки наслідків можливих аварій. Особливо важливо враховувати реальні умови навантаження енергоблоку, оскільки вони суттєво впливають на накопичення короткоіснуючих ізотопів, які визначають радіаційні наслідки в ранню фазу аварії.

Важливим результатом є демонстрація суттєвої залежності інтегральної активності ядерного палива від режиму навантаження ядерного реактора напередодні аварії. Так, наприклад, робота ядерного реактора на ~50% номінальної потужності за добу до аварії зменшує можливий радіоактивний викид у першу фазу аварії до трьох разів. Відповідно є очевидним, що навіть переведення ядерної установки на мінімально контрольований рівень потужності, а тим більше переведення енергоблоку в стан гарячого або холодного зупину при порушенні умов ліцензії, у разі

воєнного або терористичного втручання, дозволить зменшити до 10 разів радіаційні наслідки під час першої фази можливої аварії. Радіаційні наслідки для наступних фаз ліквідації можливої аварії, які визначаються накопиченою в ядерному паливі активністю середньо- і довгоіснуючих ізотопів, практично мало залежать від часу, що пройшов від зупину реактора до можливої аварії.

Урахування фактичної активності короткоіснуючих ізотопів у заходах радіаційного захисту персоналу й населення на першій фазі аварії є важливим для визначення фактично отриманих доз опромінення і, відповідно, дозволить оптимізувати протиаварійні заходи в найбільш гарячу першу фазу аварії з викидом радіоактивних речовин у навколишнє середовище.

Список використаної літератури

1. Борисенко В. І. Активність і залишкове енерговиділення ядерного палива під час експлуатації і зберігання / В. І. Борисенко, В. В. Горанчук, М. С. Юров // Ядерна енергетика та довкілля. — 2023. — Вип. 2 (26). — С. 3–9. — doi.org/10.31717/2311-8253.23.2.1.
2. Борисенко В. І. Критичність паливовмісних матеріалів в об'єкті «Укриття» / В. І. Борисенко, В. В. Горанчук, Д. І. Хвалін // Ядерна фізика та енергетика. — 2024. — Т. 25, № 2. — С. 115–124. — doi.org/10.15407/jnpae2024.02.115.
3. Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия: Информация, подготовленная для совещания экспертов МАГАТЭ. — Часть 1. Обобщенный материал. — Август, 1986.
4. Боровой А. А. Выброс радионуклидов из разрушенного блока Чернобыльской АЭС / А. А. Боровой, А. Ю. Гагаринский // Атомная энергия. — 2001. — Т. 90, вып. 2. — С. 137–145.
5. Sich A. R. The Chernobyl accident revisited: source term analysis and reconstruction of events during the active phase (PhD thesis) / A. R. Sich. — Massachusetts Institute of Technology, 1994. — 499 p.
6. Экологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС и их преодоление: двадцатилетний опыт МАГАТЭ. — Вена : МАГАТЭ, 2008. — (STI/PUB1239).
7. The Chernobyl reactor accident source term: development of a consensus view NEA/CSNI/R(95)24. — OECD Nuclear Energy Agency, 1995. — 29 p.
8. Определение глубины выгорания топлива в выпадениях на территории Беларуси, после катастрофы на ЧАЭС, с помощью трассера U-236 / В. П. Миронов,

- Ж. Л. Матусевич, В. П. Кудряшов [и др.] // Сахаровские чтения 2002 года: экологические проблемы XXI века: Тез. докл. междунар. конф. (Минск, 17–18 мая 2002 г.). — Минск, 2002.
9. Лавообразные топливосодержащие материалы в бассейне-барботере и парораспределительном коридоре 4-го блока Чернобыльской АЭС / А. А. Боровой, А. А. Ключников, В. А. Краснов [и др.] // Проблемы Чернобиля. — 2001. — Вип. 7. — С. 181-193.
 10. Боровой А. А. О возможности расчета степени выгорания ядерного топлива 4-го блока ЧАЭС по соотношению изотопов плутония / А. А. Боровой, Э. М. Пазухин // Проблемы Чернобиля. — 2000. — Вип. 6. — С. 17–20.
 11. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: справочник / В. М. Колобашкин [и др.]. — Москва : Энергоатомиздат, 1983. — 384 с.
 12. SCALE Code System // Oak Ridge National Laboratory: official website. — Available at: <https://www.ornl.gov/onramp/scale-code-system>

M. S. Yurov¹, V. I. Borysenko²

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37, Beresteyskyi ave, Kyiv, 03056, Ukraine

²Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 12, Lysohirska st., Kyiv, 03028, Ukraine

Activity of the RBMK-1000 Nuclear Fuel at the Time of the Accident on April 26, 1986

The article presents information on the importance of determining the radiation characteristics of irradiated nuclear fuel and spent nuclear fuel at NPP power units. The radiation characteristics of nuclear fuel – activity and residual energy release – determine both the possible course of accident scenarios and the possible radiation consequences of accidents at nuclear facilities. The article presents the results of analytical modeling in the SCALE program code of changes in the activity of various isotopes of irradiated nuclear fuel of RBMK-1000 for the constant power mode and for the RBMK-1000 operation mode at actual power on the eve of the accident on April 26, 1986. The RBMK-1000 fuel assembly with an enrichment of 2.0%, which was used at RBMK-1000, was selected for modeling. The modeling results were compared with data from scientific publications on changes in the activity of RBMK-1000 nuclear fuel during its operation. The operating mode of the

RBMK-1000 fuel assemblies demonstrates the significant influence on the activity of nuclear fuel. The simulation results show that the specific activity, and accordingly the total activity of nuclear fuel in the RBMK-1000 core, for the operating modes that were simulated differ significantly (namely by ~3 times) at the time of the reactor “stop”. Therefore, the actual radiation consequences in the event of nuclear fuel damage significantly depend on the operating mode, especially in the last period before the planned or unplanned shutdown of the nuclear reactor. The results of the study are important for comparing the consequences of a possible accident at a nuclear reactor with the actual and design burnup history of nuclear fuel even in the case of the same value of the achieved burnup level.

Keywords: spent nuclear fuel, specific activity of nuclear fuel, residual energy release, fuel assembly, RBMK-1000, SCALE program code.

References

1. Borysenko V. I., Goranchuk V. V., Yurov M. S. (2023). [Radioactivity and residual energy release of nuclear fuel during operation and storage]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 2, no. 26, p. 3–9. doi.org/10.31717/2311-8253.23.2.1. (in Ukr.)
2. Borysenko V. I., Goranchuk V. V., Khvalin D. I. (2024). [Criticality of fuel-containing materials in the Shelter object]. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, vol. 25, no. 2, p. 115–124. doi.org/10.15407/jnpae2024.02.115. (in Ukr.)
3. *The Accident at the Chernobyl NPP and Its Consequences*. USSR State Committee for Atomic Energy Utilization, 1986. (in Rus.)
4. Borovoi A., Gagarinsky A. (2001). [Release of radioactivity from destroyed unit of the Chornobyl NPP]. *Atomic Energy*, vol. 90, no. 2, pp. 137–145 (in Rus.)
5. Sich A. R. (1994). *The Chernobyl accident revisited: source term analysis and reconstruction of events during the active phase* (PhD thesis). Massachusetts Institute of Technology, 499 p.
6. *Environmental consequences of the Chornobyl accident and their remediation: twenty years of experience*. STI/PUB 1239. Vienna: IAEA, 2006.
7. *The Chornobyl Reactor Accident Source Term. Development of a Consensus View*. NEA/CSNI/R(95)24. OECD Nuclear Energy Agency, 1995, 29 p.
8. Mironov V. P., Matusevich Zh. L., Kudryashov V. P., Ananich P. I., Zhuravkov V. V. (2002). Determination of the depth of fuel burnup in fallout on the territory of Belarus, after the Chornobyl disaster, using the U-236 tracer. *Sakharov*

- Readings 2002: Environmental Problems of the 21st Century: Abstract of the Reports of the International Conf. (Minsk, May 17–18, 2002).* (in Rus.)
9. Borovoi A., Klyuchnikov A., Krasnov V., Lagunenkov A., Pazukhin E, Gavrilov S. (2001). [Lava-like fuel-containing materials in the bubbler pool and steam distribution corridor of Unit 4 of the Chornobyl Nuclear Power Plant]. *Problems of Chornobyl*, vol. 7, pp. 181–193. (in Rus.)
 10. Borovoi A., Pazukhin E. (2000). [On the possibility of calculating the degree of burnup of nuclear fuel of the 4th unit of the Chornobyl Nuclear Power Plant based on the ratio of plutonium isotopes]. *Problems of Chornobyl*, vol. 6, pp. 17–20. (in Rus.)
 11. Kolobashkin V.M., Rubtsov P.M., Ruzhansky P.A., Sidorenko V.D. (1983). *Radiatsionnyie kharakteristiki obluchennogo yadernogo topliva* [Radiation characteristics of irradiated nuclear fuel]. Moscow: Energoatomizdat, 384 p. (in Rus.)
 12. *SCALE Code System*. Oak Ridge National Laboratory: official website. Available at: <https://www.ornl.gov/onramp/scale-code-system>.

Надійшла / Received 28.10.2024
Рекомендована до друку / Accepted 04.11.2024