

ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ДОВКІЛЛЯ

NUCLEAR POWER AND THE ENVIRONMENT



Науково-технічний журнал

ЯДЕРНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ДОВКІЛЛЯ

NUCLEAR POWER AND THE ENVIRONMENT

№ 3 (31) 2024

Співзасновники:

Інститут проблем безпеки атомних електростанцій
Національної академії наук України (ІПБ АЕС НАН України),
ГО «Українське ядерне товариство»

Виходить до 4 разів на рік

Внесено до Реєстру суб'єктів у сфері медіа
Національної ради України з питань телебачення
та радіомовлення (Рішення № 791 від 31.08.2023 р.,
ідентифікатор медіа R30-01221)

Видання входить до затвердженого Департаментом
атестації кадрів МОН України переліку фахових видань
(Наказ Міністерства освіти і науки України
№ 1643 від 28.12.2019 р.)

Адреса редакції:

Інститут проблем безпеки атомних електростанцій
НАН України,
03028, м. Київ, вул. Лисогірська, 12, тел.: (044) 525-24-72
E-mail: i.kutsyna@isnpp.kiev.ua

Затверджено до друку вченою радою ІПБ АЕС НАН України
(протокол № 12 від 31 грудня 2024 р.)

Підписано до друку 10.01.2025. Формат 60 × 90 1/8
Папір крейдяний. Друк офсет. Умов. друк. арк. 10,75
Тираж 120 пр. Зам. № 123

Віддруковано ФОП Андрієвська Антоніна Петрівна,
04210, м. Київ, вул. Севастопольська, 12/22, кв. 25

Головний редактор

Носовський А. В., акад. НАН України, д-р техн. наук, проф.
(ІПБ АЕС НАН України)

Заступник головного редактора

Паскевич С. А., канд. біол. наук (ІПБ АЕС НАН України)

Редакційна колегія

Бондарьков М. Д., д-р техн. наук (ДНДУ «Чорнобильський
центр з проблем ядерної безпеки, радіоактивних відходів
та радіоекології»),

Борисенко В. І., чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук
(ІПБ АЕС НАН України),

Васильченко В. М., канд. техн. наук, заслужений енергетик
України,

Габелков С. В., д-р фіз.-мат. наук (ІПБ АЕС НАН України),

Дубковський В. О., д-р техн. наук, проф. (ОНПУ),

Кравченко В. П., д-р техн. наук, проф. (ОНПУ),

Корольов О. В., д-р техн. наук, проф. (ОНПУ),

Прістер Б. С., акад. УААН, д-р біол. наук, проф. (ІПБ АЕС
НАН України),

Протасов О. О., д-р біол. наук, проф. (Інститут гідробіоло-
гії НАН України),

Пшинко Г. М., д-р хім. наук (ІКХХВ ім. А. В. Думанського
НАН України),

Рязанов В. В., д-р фіз.-мат. наук (ІЯД НАН України),

Талерко М. М., д-р техн. наук (ІПБ АЕС НАН України),

Шараєвський І. Г., д-р техн. наук (ІПБ АЕС НАН України),

Hyatt N., PhD, BSc, проф. (Ун-т Шеффільда, Велика Британія),

Pretzsch G., Dr. (GRS, Німеччина),

Schillebeeckx P., Dr. (JRC, Бельгія),

Washiya T., Dr. (IAEA, Японія)

Відповідальний секретар

Куцина І. В. (ІПБ АЕС НАН України)

Літературне редагування Троян Л. М. (ІПБ АЕС НАН України)

Комп'ютерна верстка Лютого А. О. (ІПБ АЕС НАН України)

© Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, 2024

© ГО «Українське ядерне товариство», 2024

ЗМІСТ

В. П. Кравченко, А. О. Оверченко,
М. М. Хищенко, М. П. Галацан, Б. А. Леус
Аналіз можливості використання АЕС із
ВВЕР-1000 для розширеного теплопостачання.....3

I. S. Skiter, V. V. Derenhovskiy, O. V. Mykhailov,
Ye. A. Menshenin, O. B. Savchuk, O. I. Trunov
Strategic analysis in the selection of sites for NPP
construction based on fuzzy logic methods12

В. І. Скалозубов, О. А. Дорож, Д. С. Бундєв,
О. С. Сухомлінов, С. С. Прокоф'єв
Питання безпеки та управління аваріями
в малих модульних реакторах SMR-160
в умовах теплогідродинамічної нестійкості.....23

М. С. Юров, В. І. Борисенко
Активність ядерного палива РБМК-1000
на момент аварії 26.04.1986 р.29

М. М. Талерко, Т. Д. Лев, А. В. Носовський,
В. М. Рудько, В. М. Піскун, А. М. Новіков,
І. П. Шедєменко, О. В. Блохіна
Розрахунок розмірів санітарно-захисної
зони Хмельницької АЕС з урахуванням
будівництва енергоблоків № 5, 6
з реакторною установкою AP100037

Т. Д. Лев, В. М. Піскун, Ю. В. Яценко, І. П. Шедєменко
Комплексний аналіз характеристик лісових
пожеж та метеорологічних умов, що впливають
на їхнє розповсюдження, на території
Українського Полісся за період 2006–2022 рр..49

В. К. Шинкаренко, А. М. Новіков
Викиди ^{137}Cs в повітря при спалюванні
забрудненої біомаси. Огляд лабораторних
досліджень69

VI Міжнародна науково-технічна конференція
«Перспективи впровадження інновацій
у атомну енергетику»: головні підсумки.....79

Правила для авторів83

CONTENTS

V. P. Kravchenko, A. O. Overchenko,
M. M. Khyschenko, M. P. Galatsan, B. A. Leus
Analysis of the possibility of using nuclear power
plants with VVER-1000 for extended heat supply3

I. S. Skiter, V. V. Derenhovskiy, O. V. Mykhailov,
Ye. A. Menshenin, O. B. Savchuk, O. I. Trunov
Strategic analysis in the selection of sites for NPP
construction based on fuzzy logic methods12

V. I. Skalozubov, O. A. Dorozh, D. S. Bundev,
O. S. Suhomlinov, S. S. Prokofiev
Safety and accident management issues
in SMR-160 small modular reactors under
conditions of thermal hydrodynamic instability.....23

M. S. Yurov, V. I. Borysenko
Activity of the RBMK-1000 nuclear fuel
at the time of the accident on April 26, 1986.....29

M. M. Talerko, T. D. Lev, A. V. Nosovskyi,
V. M. Rudko, V. M. Piskun, A. M. Novikov,
I. P. Shedemenko, O. V. Blokhina
Assessment of the size of the Khmelnytskyi NPP
sanitary protection zone taking into account
the construction of power units
No. 5, 6 with AP1000 reactor37

T. D. Lev, V. M. Piskun, Yu. V. Yatsenko, I. P. Shedemenko
Comprehensive analysis of forest fires
characteristics and meteorological conditions
affecting their spread in the territory of Ukrainian
forests for the period 2006–2022.49

V. K. Shynkarenko, A. M. Novikov
Air releases of ^{137}Cs from the burning
of contaminated biomass:
a review of laboratory research69

VI International scientific and technical conference
“Prospects for the Implementation of Innovations
in Nuclear Energy”: main results79

Author Guidelines83

В. П. Кравченко, А. О. Оверченко, М. М. Хищенко, М. П. Галацан, Б. А. Леус

Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна

Аналіз можливості використання АЕС із ВВЕР-1000 для розширеного теплопостачання

Ключові слова:

теплофікація від АЕС,
термодинамічна та економічна
ефективність

Враховуючи перспективність широкого використання АЕС для теплопостачання, проаналізовано максимально можливу продуктивність енергоблоку АЕС із турбіною К-1000-5,8/25-1 за відпуском теплоти. Обмеження кількості пари у відборі на теплофікацію визначається мінімально можливою витратою пари в конденсатор для уникнення вентиляційного режиму циліндра низького тиску. Мінімальна витрата пари в конденсатор для цього визначається на рівні 10 % від витрати пари на турбіну. У роботі визначено, що за цих умов потужність теплофікаційної установки турбіни К-1000-5,8/25-1 дорівнює 900 МВт при електричній потужності 684 МВт. Проаналізовано вплив кількості теплоти від АЕС, що відпускається, на економічні показники. Визначено, що з підвищенням кількості теплоти, що відпускається, загальний дохід АЕС зростає.

Вступ

Невід'ємною частиною АЕС є теплофікаційна установка (ТФУ), що забезпечує теплопостачання міста-супутника, самої станції та промислової зони. Як вказується в класичному підручнику Соколова Є. Я. з теплофікації [1], витрата палива на теплопостачання (опалення, вентиляцію, кондиціювання повітря та гаряче водопостачання) становить біля третини загальної кількості паливно-енергетичних ресурсів, що витрачаються в країні, і ця величина в два рази більша за кількість палива, що витрачається для виробництва електроенергії.

Незважаючи на те, що частка електроенергії, яку виробляють АЕС у світі, близька до 10 % [2] і перспективним є нарощування потужності АЕС, як ефективне розглядається розширене використання АЕС і для теплопостачання.

Шляхом до скорочення витрат на опалення є використання теплофікації. Як показує досвід вико-

ристання теплоелектроцентралей (ТЕЦ), економія палива за рахунок комбінованого виробітку електричної та теплової енергії становить 13 % від витрати палива на виробіток електроенергії [1].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [3] пропонується широке використання великих теплових та атомних електростанцій для теплопостачання споживачів на площі радіусом 100 км від електростанцій. Це потребує достатньо великих капіталовкладень, але забезпечує можливість, як стверджує В. Ф. Гершкович, відмовитися від метанової залежності з покращенням екології. Тут треба зауважити, що тільки АЕС дозволяють практично відмовитися від метанової залежності. За оцінками транспортування теплоти на 30 км супроводжується втратами 1 % від потужності, що передається [4].

© В. П. Кравченко, А. О. Оверченко, М. М. Хищенко,
М. П. Галацан, Б. А. Леус. Ліцензія CC BY 4.0.

Тепер розглянемо можливості електростанцій для постачання теплоти в умовах комбінованого виробництва електричної та теплової енергії. Проектна потужність ТФУ енергоблоків із реактором ВВЕР-1000 коливається від 116 (для тихохідної турбоустановки (ТУ) К-1000-5,8/25-1) до 200 МВт (для швидкохідної ТУ К-1000-5,8/50). Враховуючи, що теплова потужність одного району великого міста (наприклад, Одеси) знаходиться на рівні 300 МВт [5], можна зробити висновок про недостатню потужність ТФУ діючих в Україні енергоблоків. Обмеження витрати пари у відборах на теплофікацію визначається мінімальною витратою пари в конденсатор для уникнення вентиляційного режиму циліндра низького тиску (ЦНТ). В іншому випадку ЦНТ буде споживати потужність на своє обертання. Повністю відключити подачу пари на ЦНТ теж не є економічно доцільним та технічно припустимим. З одного боку, буде витрачатися енергія під час обертання ЦНТ, з іншого боку — нерухоме середовище (повітря), що знаходиться в циліндрі, через обертання ротора буде нагріватися, що може призвести до неприпустимої температури корпусу.

Максимальна кількість теплоти може бути відведена в режимі атомної станції теплопостачання (АСТ) без виробництва електроенергії. Передбачається, що в умовах АСТ протягом півроку собівартість теплоти буде високою. Тому ефективним джерелом теплопостачання залишається тільки ТЕЦ із комбінованим виробітком електричної та теплової енергії.

На діючих АЕС піковий бойлер (ПБ) може бути заживлений від колектора власних потреб. Для підвищення можливостей подачі пари на ТФУ швидкодіюча редуційна установка має бути замінена на аналог більшої продуктивності. Але треба відзначити, що такий режим є економічно не вигідним, тому що саме в комбінованому режимі відбувається економія палива.

Одним із можливих варіантів вирішення завдання розширеного використання теплових та атомних електростанцій для теплофікації є застосування теплонасосних технологій для рекуперації енергетичного потенціалу скидних низькотемпературних потоків [6].

На сьогодні теплота, вироблена на АЕС, є однією з найбільш привабливих з точки зору вартості. Тому великі споживачі теплоти, наприклад агропромислові комплекси, мають бути розташовані поблизу АЕС, а безпечні ядерні установки мають наближатися до великих теплоспоживачів.

Мета роботи — визначення максимально можливої теплової потужності, яка може бути відведена від енергоблоку з турбоустановкою К-1000-60/1500-1 (1-й та 2-й енергоблоки Південноукраїнської АЕС).

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання.

1. Розробити математичну модель розрахунку теплової схеми турбоустановки з турбіною К-1000-60/1500-1 та теплофікаційною установкою.

2. Провести варіантні розрахунки теплової схеми залежно від теплової потужності споживача тепла з визначенням термодинамічної та економічної ефективності АЕС. Як критерій термодинамічної ефективності прийнято ексергетичний коефіцієнт корисної дії (ККД).

3. Визначити максимально можливу теплову потужність ТФУ АЕС, яка може бути отримана за мінімально допустимого пропуску пари в конденсатор 10 % від витрати пари, що подається на турбіну [7].

Розрахунок теплової схеми турбоустановки К-1000-5,8/25-1

Принципова теплова схема турбоустановки К-1000-5,8/25-1, вихідні дані та методика розрахунку теплових схем АЕС наведені в [8]: тиск свіжої пари перед стопорним клапаном 5,89 МПа; температура свіжої пари 274,3 °С; тиск та вологість пари на виході циліндра високого тиску (ЦВТ) 1,109 МПа та 11,65 %; степінь сухості пари за сепаратором сепаратора-пароперегрівача (СПП) 0,999; тиск пари після СПП 1,075 МПа; температура пари після СПП 250 °С; тиск гріючої пари на вході ПП2 5,75 МПа; тиск гріючої пари на ПП1 2,678 МПа; температура живильної води 221,6 °С; абсолютний тиск пари в конденсаторах у першому, по ходу води, корпусі 0,004 МПа; тиск у деаераторі 0,7 МПа; внутрішній відносний ККД циліндрів високого, середнього (ЦСТ) та низького тиску, відповідно, $\eta_{\text{ЦВТ}} = 0,83$; $\eta_{\text{ЦСТ}} = 0,86$; $\eta_{\text{ЦНТ}} = 0,826$; внутрішній відносний ККД турбоприводу живильного насоса (ТПЖН) $\eta_{\text{ТП}} = 0,75$.

Результати розрахунку параметрів у відборах турбіни та в системі регенерації наведено в табл. 1 та 2.

На рисунку наведено схему ТФУ.

Розрахунок ТФУ проводився за таких вихідних даних: максимальна витрата мережної води 347,5 кг/с; температура води на вході 70 °С, тиск $P_{\text{вх}} = 1,4$ МПа; температура води на виході 150 °С.

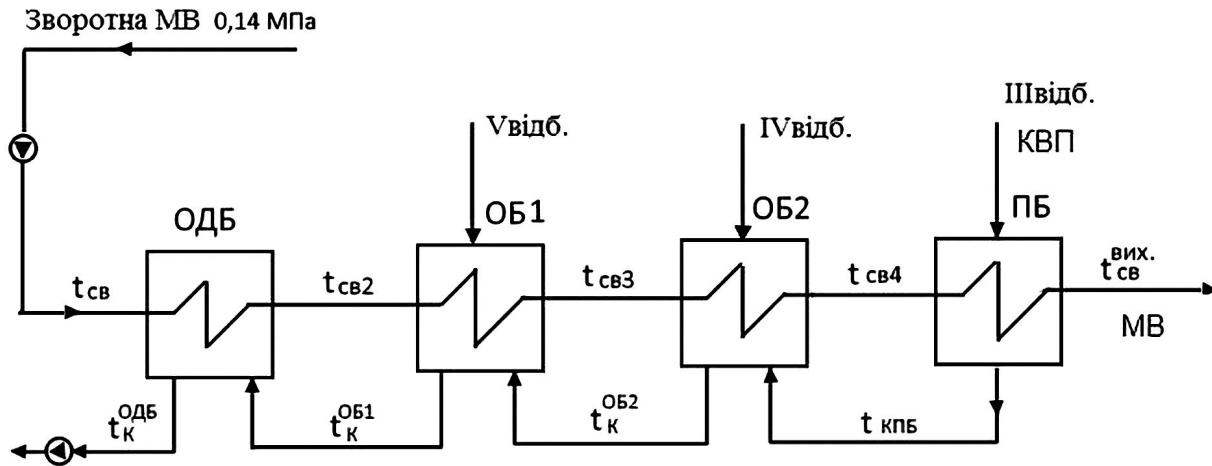
Таблиця 1. Параметри пари у відборах турбіни

Номер відбору	Тиск, P , МПа	Ентальпія, h , кДж/кг	Степінь сухості, X , %	Температура, t , °С
1	2,79	2668,5	92,7	229,9
2	1,808	2613,7	90,0	207,3
3 (розділове)	1,13	2531	87,7	185,3
Вхід в ЦСТ	1,075	2941	100	250
4	0,5984	2833	100	–
5	0,3283	2737	100	–
6	0,0868	2552	93,1	95,7
7	0,02318	2395	91,2	63,3
Вихлоп	0,0038	2217	86,2	29,0
Вхід у ТПЖН	1,034	2960	100	250
Вихід із ТПЖН	0,004	2312	–	29

Таблиця 2. Параметри основного конденсату (ОК), живильної води (ЖВ) та конденсату пари, що гріє (КГП)

За обладнанням	Тиск, P , МПа	Температура, t , °С	Ентальпія, h , кДж/кг
Конденсатор	0,004	29	121,4
КН1	1,02	29	122,6
КН2	1,48	32	125,48
ПНТ1: ГП	0,021	61,1	2395
КГП	0,021	61,1	255,8
ОК	1,377	58,1	244,3
ПНТ2: ГП	–	93,1	2552
КГП	–	63,5	264,2
ОК	1,227	89,6	376,1
ПНТ3: ГП	–	133,5	2737
КГП	–	133,5	561,5
ОК	1,127	126,9	533,7
ПНТ4: ГП	–	155,4	2833
КГП	–	131,9	554,7
ОК	1,077	150,9	636,4
Деаератор: ГП	–	–	2531
ЖВ	0,7	165	697,2
Випар	–	165	2763
ТЖН	9,052	167,4	712,4
ПВТ6: ГП	–	204,9	2613,7
КГП	–	188,4	800,7
ЖВ	8,755	199,3	852,3
ПВТ7: ГП	–	227,3	2668,5
КГП	–	209,3	894,8
ЖВ	8,452	221,7	953,7

Примітка. КН — конденсатний насос, ГП — гріюча пара, ПНТ — підігрівач низького тиску, ПВТ — підігрівач високого тиску, ТЖН — турбоживильний насос.



Принципова схема ТФУ. КВП — колектор власних потреб, МВ — мережна вода

Витрати пари на ПБ та основні бойлери (ОБ1 і ОБ2), а також ентальпія мережної води після охолоджувача дренажу бойлерів (ОДБ) визначаються з вирішення системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \text{ПБ} \quad & D_{\text{ПБ}} \cdot (h_{3\text{відб}} - h_{\text{кПБ}}) = G_{\text{МВ}} \cdot (h_{\text{МВ вих}} - h_{\text{МВ4}}); \\ \text{ОБ2} \quad & D_{\text{ОБ2}} \cdot (h_{4\text{відб}} - h_{\text{кОБ2}}) + D_{\text{ПБ}} \cdot (h_{\text{кПБ}} - h_{\text{кОБ2}}) = \\ & = G_{\text{МВ}} \cdot (h_{\text{МВ4}} - h_{\text{МВ3}}); \\ \text{ОБ1} \quad & D_{\text{ОБ1}} \cdot (h_{5\text{відб}} - h_{\text{кОБ1}}) + (D_{\text{ПБ}} + D_{\text{ОБ2}}) \times \\ & \times (h_{\text{кОБ2}} - h_{\text{кОБ1}}) = G_{\text{МВ}} \cdot (h_{\text{МВ3}} - h_{\text{МВ2}}); \\ \text{ОДБ} \quad & (D_{\text{ОБ1}} + D_{\text{ОБ2}} + D_{\text{ПБ}}) \times \\ & \times (h_{\text{кОБ1}} - h_{\text{кОДБ}}) = G_{\text{МВ}} \cdot (h_{\text{МВ2}} - h_{\text{МВ}}), \end{aligned}$$

де $G_{\text{МВ}}$ — витрата мережної води; $D_{\text{ПБ}}$, $D_{\text{ОБ1}}$, $D_{\text{ОБ2}}$ — витрати пари на ПБ, ОБ1 та ОБ2; $h_{\text{МВ вих}}$, $h_{\text{МВ4}}$, $h_{\text{МВ3}}$, $h_{\text{МВ2}}$, $h_{\text{МВ}}$ — ентальпія мережної води на виході ПБ, ОБ2, ОБ1, ОДБ та вході в ОДБ відповідно; $h_{3\text{відб}}$, $h_{4\text{відб}}$, $h_{5\text{відб}}$ — ентальпія пари у третьому, четвертому та п'ятому відборах відповідно; $h_{\text{кПБ}}$, $h_{\text{кОБ2}}$, $h_{\text{кОБ1}}$, $h_{\text{кОДБ}}$ — ентальпія конденсату з ПБ, ОБ2, ОБ1 та ОДБ.

У результаті розв'язання системи рівнянь матеріально-енергетичного балансу теплообмінників було отримано: $D_{\text{ПБ}} = 25,53$ кг/с, $D_{\text{ОБ2}} = 15,3$ кг/с, $D_{\text{ОБ1}} = 10,165$ кг/с, $h_{\text{св2}} = h_{\text{в}} = 324,2$ кДж/кг (відповідна температура 77,17 °С).

Витрати пари у відборах турбіни були визначені з рішення системи шести рівнянь матеріально-енергетичного балансу: сепаратора, промперегрівача 1, промперегрівача 2, двох підігрівачів високого тиску (ПВТ) та деаератора.

Витрата пари на турбоустановку: $D_0 = 6033,5$ т/год = 1675,97 кг/с. Витрата ЖВ становитиме $D_{\text{ЖВ}} = D_0 + D_{\text{УТ}} + D_{\text{ПРОД}} = 1,025 \cdot D_0 = 1717,8$ кг/с.

Витрати середовища в елементах схеми турбоустановки

Відбір пари на:	Витрата, кг/с
ПП-1	53,66
ПП-2	56,12
ПВТ2	89,05
ПВТ1	120,68
Деаератор	27,36
Сепарат	185,14
Вихід із ЦВТ	1303,57
Основний конденсат	1371,0
ТЖН	50,25
ПНТ4	31,85
ПНТ3	75,14
ПНТ2	58,62
ПНТ1	46,73

Розрахунок потужності турбіни наведено в табл. 3.

Електрична потужність турбоустановки без ТФУ:

$$N_{\text{ел}} = N_i \cdot \text{ККД}_{\text{мех}} \cdot \text{ККД}_{\text{ел}} = 1048,1 \cdot 0,98 \cdot 0,99 = 1032 \text{ МВт.}$$

Сумарна витрата електроенергії на привід насосів:

$$N_{\text{Н}} = N_{\text{КН1}} + N_{\text{КН2}} = 1,79 + 2,4 = 4,19 \text{ МВт.}$$

Повна витрата теплоти на турбоустановку:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ТУ}} &= G_0 \cdot h_0 + D_{\text{ПР}} \cdot h_{\text{ПР}} - G_{\text{ЖВ}} \cdot h_{\text{ЖВ}} = G_0 \cdot (h_0 + \alpha_{\text{ПР}} \times \\ &\times h_{\text{ПР}} - \alpha_{\text{ЖВ}} \cdot h_{\text{ЖВ}}) = 1675 \cdot (1,02 \cdot 2778 + 0,005 \times \\ &\times 1286 - 1,025 \cdot 960,5) = 3\,027\,900 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

Таблиця 3. Визначення сумарної потужності всіх відсіків

Витрата пари через відповідний відсік, $D_{\text{відс}}$, кг/с	Температурний перепад відсіку $h_{\text{відсік}}$, кДж/кг	Внутрішня потужність відсіку, $N_{\text{відсік}}$, МВт
$D_{\text{ВІДС1}} = D_0 - D_{\text{пп2}} = 1618,88$	$h_0 - h_1 = 2778 - 2664,6 = 133,3$	183,5
$D_{\text{ВІДС2}} = D_{\text{ВІДС1}} - D_1 - D_{\text{пп1}} = 1475,37$	$h_1 - h_2 = 2664,6 - 2613,7 = 50,9$	96,78
$D_{\text{ВІДС3}} = D_{\text{ВІДС2}} - D_2 = 1354,69$	$h_2 - h_3 = 2613,7 - 2531 = 82,7$	91,154
$D_{\text{ВІДС4}} = D_{\text{ВІДС3}} - D_3 - D_{\text{пб}} - D_{\text{сеп}} - D_{\text{тжн}} = 1066,41$	$h_{0, \text{цнт}} - h_4 = 2960 - 2833 = 127$	115,55
$D_{\text{ВІДС5}} = D_{\text{ВІДС4}} - D_4 - D_{\text{об1}} = 1025$	$h_4 - h_5 = 2833 - 2737 = 96$	98,99
$D_{\text{ВІДС6}} = D_{\text{ВІДС5}} - D_5 - D_{\text{об2}} = 934,56$	$h_5 - h_6 = 2737 - 2552 = 185$	174,022
$D_{\text{ВІДС7}} = D_{\text{ВІДС6}} - D_6 = 883,8$	$h_6 - h_7 = 2552 - 2393 = 159$	139,15
$D_{\text{ВІДС8}} = D_{\text{ВІДС7}} - D_7 = 837,1$	$h_7 - h_8 = 2393 - 2217 = 122$	148,95
Сумарна потужність турбіни		$N_i = 1048,1$

Витрата теплоти на виробництво електроенергії:

$$Q_{\text{ТУ}} = Q_{\text{ТУ}} - Q_{\text{ТФУ}} = 3027,9 - 116,5 = 2911,4 \text{ МВт.}$$

Електричний ККД бруто:

$$\eta_{\text{бр}} = N_{\text{ел}} / Q_{\text{ТУ}} = 1/q = 35,44 \text{ \%}.$$

Електричний ККД нетто:

$$\eta_{\text{н}} = (N_{\text{ел}} - N_{\text{н}}) / Q_{\text{ТУ}} = (1032 - 4,19) / 3027,9 = 34,06 \text{ \%}.$$

Ексергетичний ККД визначається під час виробництва двох видів продукції: електричної та теплової енергії. Ексергія теплової енергії визначається за формулою [9]

$$Eq = G [h_{\text{вих}} - h_{\text{вх}} - T_0 (s_{\text{вих}} - s_{\text{вх}})],$$

де G – витрата мережної води; $h_{\text{вих}}$, $h_{\text{вх}}$, $s_{\text{вих}}$, $s_{\text{вх}}$ – ентальпія та ентропія прямої та зворотної мережної води; T_0 – температура довкілля.

Ексергетичний ККД:

$$\eta_{\text{ex}} = (N_{\text{ел}} + Eq) / Q_{\text{ПГ}}.$$

Визначення термодинамічної та техніко-економічної ефективності роботи енергоблоку залежно від кількості теплової енергії, що відпускається

Використовуючи розроблену програму розрахунку теплової схеми, було проведено варіант-

ні розрахунки щодо залежності термодинамічної ефективності роботи турбоустановки від теплової потужності теплоспоживача. Згідно з отриманими результатами, зі збільшенням теплової потужності ТФУ електрична потужність енергоблоку лінійно знижується. За номінальної теплової потужності ТФУ 116 МВт електрична потужність енергоблоку дорівнює 1008 МВт. Тобто за максимальної потужності ТФУ електрична потужність знижується на 24 МВт.

Щодо термодинамічної ефективності слід зазначити, що зі зростанням потужності ТФУ ексергетичний ККД незначно зростає. З цього можна зробити висновок, що відпуск теплоти для електростанції є вигідним із термодинамічної точки зору.

Залежність ексергетичного ККД енергоблоку від теплової потужності ТФУ

$Q_{\text{ТФУ}}$, МВт	η_{ex} , %
0.....	34,01
33,52	34,05
67,04.....	34,098
100	34,14
116,5.....	34,16

З погляду економічної доцільності проведемо розрахунок доходу АЕС від продажу електричної та теплової енергії.

Для порівняння візьмемо опалювальний період, що триває, наприклад, шість місяців ($6 \cdot 30 \cdot 24 = 4320$ год). Кількість відпущеної електроенергії з урахуванням 6 % на власні потреби за цей період дорівнює

$$E_{\text{ел}} = 4320 \cdot N_{\text{ел}} \cdot 0,94 \cdot 1000, \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Для аналізу економічної доцільності виробництва електроенергії чи теплової енергії було використано тарифи на ці види енергетичної продукції для населення. Більш коректне співставлення треба проводити з використанням тарифів, які отримують АЕС за свою продукцію. Але цих даних у відкритому доступі немає.

Отже, з урахуванням тарифу на електроенергію $c_{\text{тар.е}} = 2,64 \text{ грн}/(\text{кВт} \cdot \text{год})$ [10] отриманий дохід від продажу електроенергії становитиме

$$Z_{\text{ел}} = E_{\text{ел}} \cdot c_{\text{тар.е}}, \text{ грн.}$$

Кількість відпущеної теплоти за півроку $[Q_{\text{ТФУ}}] = \text{МВт}$:

$$Q_{\text{Т}} = Q_{\text{ТФУ}} \cdot 4320 \cdot 3600 \cdot 10^{-3}/4,19, \text{ Гкал.}$$

З урахуванням тарифу на теплоту, що відпускається, $c_{\text{тар.т}} = 1654,41 \text{ грн}/\text{Гкал}$ [11], дохід від продажу теплоти становитиме

$$Z_q = Q_{\text{т}} \cdot c_{\text{тар.т}}, \text{ грн.}$$

Сумарний дохід від продажу електроенергії та теплоти становитиме

$$Z_{\text{заг}} = Z_{\text{ел}} + Z_q.$$

У табл. 4 наводиться відповідний розрахунок залежності доходу АЕС від продажу електричної та те-

плової енергії від потужності ТФУ (витрати мережної води). Як видно з наведених даних, сумарний дохід АЕС із зростанням потужності ТФУ підвищується.

Тобто в умовах роботи в теплофікаційному режимі АЕС заробляє більше на 4,12 %.

Визначення максимально можливої теплової потужності, що відпускається теплоспоживачу

Враховуючи екологічну та економічну привабливість теплопостачання від АЕС, доцільно з'ясувати максимально можливу теплову потужність, яку можна відібрати від АЕС із реконструкцією ТФУ, що існує.

Зі збільшенням відборів пари на теплофікацію зменшується витрата через останні ступені турбіни. При цьому може настати такий режим, у якому ЦНТ буде обертатися не за рахунок тиску пари, а обертатися циліндром високого тиску. Тобто настане вентильний режим. При цьому температура пари зростатиме і можлива ситуація, за якої температура корпусу перевищить допустиму і відбудеться розрив корпусу. Таким чином, граничним фактором збільшення теплофікаційних відборів є зниження витрати пари через останні ступені. Це конкретизується регламентацією витрати пари у конденсатор. У літературі наводиться граничне значення витрати пари на конденсатор 5–10 % від витрати гострої пари [6]. Для проведення подальших розрахунків прийнято обмеження витрати пари в конденсатор 10 % від D_0 .

Використовуючи створену математичну модель ТУ К-1000-60/1500-1, було проведено варіантні розрахунки збільшення теплової потужності ТФУ

Таблиця 4. Залежність доходу АЕС від продажу електричної та теплової енергії за півроку залежно від потужності ТФУ (витрати мережної води)

Параметр	Числові значення параметрів залежно від витрати мережної води $G_{\text{мв}}$				
$G_{\text{мв}}$, кг/с	0	100	200	300	347,5
$Q_{\text{ТФУ}}$, МВт	0	33,52	67,04	100	116,5
$Q_{\text{т}}$, Гкал	0	124 416	248 832	371 169	432 412
Z_q , \$	0	$5,15 \cdot 10^6$	$10,3 \cdot 10^6$	$15,4 \cdot 10^6$	$17,9 \cdot 10^6$
$N_{\text{ел}}$, МВт	1 032	1 025,6	1 019,2	1 012,8	1 008
$E_{\text{ел}}$, МВт · год	$4,191 \cdot 10^9$	$4,165 \cdot 10^9$	$4,139 \cdot 10^9$	$4,113 \cdot 10^9$	$4,093 \cdot 10^9$
$Z_{\text{ел}}$, \$	$2,766 \cdot 10^8$	$2,749 \cdot 10^8$	$2,732 \cdot 10^8$	$2,714 \cdot 10^8$	$2,702 \cdot 10^8$
$Z_{\text{заг}}$, \$	$2,766 \cdot 10^8$	$2,800 \cdot 10^8$	$2,834 \cdot 10^8$	$2,868 \cdot 10^8$	$2,880 \cdot 10^8$

для досягнення граничної витрати пари в конденсатор. У результаті розрахунку було отримано, що відношення $D_{\text{конд}}/D_0 = 0,1$ досягається за теплової потужності ТФУ 900 МВт. При цьому електрична потужність дорівнюватиме 684,8 МВт. Результати розрахунку наводяться в табл. 5.

Таблиця 5. Залежність електричної потужності та витрати пари в конденсатор від потужності ТФУ

$Q_{\text{тфу}}$, МВт	$N_{\text{ел}}$, МВт	$D_{\text{конд}}$, кг/с	$t_{\text{конд}}$, С
200	964	255	27,4
250	944	238	27,2
300	924	224	27,1
400	885	196	28,8
500	845,7	168	26,6
700	765,7	113	26,1
900	684,8	57,5	25,8

У табл. 5 витрата пари в конденсатор відповідає одному конденсатору. Враховуючи, що наявні три конденсатори для трьох ЦНТ, сумарна витрата пари в конденсатор буде дорівнювати представлений у таблиці і помножений на 3. Таким чином, можна констатувати, що мінімальний пропуск пари в конденсатор у розмірі 10 % від початкової витрати, відповідає теплової потужності 900 МВт. Це достатньо велика потужність для забезпечення великих теплоспоживачів.

При зменшенні витрати в конденсатор зменшується температура конденсації, що підвищує термічний ККД енергоблоку. З наведених у табл. 5 даних видно, що при збільшенні теплової потужності ТФУ до 900 МВт кінцева температура зменшується на 2 °С, що суттєво впливає на ККД енергоблоку.

Висновки

Розроблено математичну модель модернізованої турбоустановки К-1000-60/1500-1 (без одного ПВТ). Математична модель дозволяє розраховувати показники теплової схеми турбоустановки з урахуванням зміни потужності установки теплофікації. Особливістю математичної моделі є можливість змінювати температуру циркуляційної води на вході в конденсатор та визначати температуру конденсації залежно від початкової температури циркуляційної води та парового навантаження конденсатора. Відповідно до розрахунку за розробленою програмою за відсутності теплофікаційного навантаження отримано такі ре-

зультати: електрична потужність при витраті пари 1675,9 кг/с дорівнює 1032 МВт, що відповідає паспорту турбіни. Електричний ККД брутто турбоустановки дорівнює 34 %.

Проведено розрахунок зміни ексергетичного ККД енергоблоку залежно від потужності теплофікаційної установки. Отримано, що зі зростанням потужності ТФУ ексергетичний ККД зростає. Це пояснюється більшими втратами під час виробництва електроенергії, ніж під час виробництва теплоти.

Розрахунок економічного доходу АЕС із зростанням потужності, що відпускається теплоспоживачеві, показав, що зі зростанням теплової потужності ТФУ дохід АЕС збільшується. Визначено, що за умов збільшення теплової потужності від нуля до 116 МВт дохід АЕС збільшується на 4,12 %. Тобто доведено, що використання теплофікації від АЕС економічно вигідно.

Зростання теплової потужності ТФУ обмежене ймовірністю виникнення вентиляційного режиму в останніх щаблях турбіни. Для його уникнення є обмеження на мінімальний пропуск пари в конденсатор. Прийнято, що гранична частка пари в конденсатор дорівнює 10 %. Таке граничне значення витрати пари в конденсатор досягається за теплової потужності ТФУ 900 МВт (номінальне значення 116 МВт). При цьому електрична потужність дорівнюватиме 684,8 МВт.

Регенеративні підігрівачі (ПВТ, а також ПНТ4 і ПНТ2) мають охолоджувачі конденсату пари, що гріє. У результаті розрахунку отримано, що наявність охолоджувачів конденсату в чотирьох регенеративних підігрівачах дає приріст електричної потужності 2,3 МВт.

Відмічається, що в умовах роботи в теплофікаційному режимі зменшується парове навантаження конденсатора, що веде до зменшення температури конденсації. Це у свою чергу приводить до підвищення термічного ККД й ефективності роботи енергоблоку. Визначено, що зі збільшенням теплової потужності від 116 до 900 МВт температура конденсації зменшується на 2 градуси.

Список використаної літератури

1. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов. – Москва : Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
2. Ядерна енергетика: яку частку у виробництві електроенергії займає у країнах світу // Слово і діло: аналітичний портал. – Режим доступу: [https://www.slovoidilo.ua/2022/12/12/infografika/svit/yaderna-enerhetyka-yaku-](https://www.slovoidilo.ua/2022/12/12/infografika/svit/yaderna-enerhetyka-yaku)

chastku-vyrobnyctvi-elektroenerhiyi-zajmae-krayinax-svitu.

3. Гершкович В. Ф. Путь избавления коммунальной энергетики Украины от метановой зависимости / В. Ф. Гершкович. – Режим доступа: <https://www.c-o-k.com.ua/content/view/2640>.
4. Белозьоров О. М., Оверченко А. О. Розробка стратегії розвитку інфраструктури теплопостачання міста Одеси з використанням технології SMR-160 / Матеріали Всеукр. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів «Еколого-енергетичні проблеми сучасності» (Одеський національний технологічний університет, 29–30 вересня 2023 р.). – Одеса, 2023. – С. 59–60.
5. Перспективи використання атомної генерації в системах теплопостачання / В. П. Кравченко, А. О. Оверченко, І. Л. Козлов [та ін.] // Збірник праць XXXII Міжнар. конф. «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики» (Київ, Інститут технічної теплофізики, 20–21 вересня 2022 р.). – Київ: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2023. – С. 84–89.
6. Increasing the efficiency of NPP by using the heat pump for heat supply / V. Kravchenko, M. Kolykhanov, E. Muromsky [et al.] // Proceedings of the 13th International Conference of the Croatian Nuclear Society (Zadar, Croatia, June 5–8, 2022). – P. 120-1–120-10. – Available at: <https://nuclear-option.org/wp-content/uploads/2022/11/S3-120.pdf>.
7. Паровые и газовые турбины для электростанций / А. Г. Костюк, В. В. Фролов, А. Е. Булкин [та ін.]; под ред. А. Г. Костюка. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. – 556 с.
8. Кіров В. С. Теплові схеми турбоустановок АЕС та їх розрахунки: навч. посібн. / В. С. Кіров. – Одеса: Одеський політехнічний ун-т; АО БАХВА, 2002. – 202 с.
9. Дубковський В. О. Термодинамічний аналіз та оптимізація АЕС / В. О. Дубковський. – Одеса: Наука і техніка, 2004. – 48 с.
10. Вартість електроенергії у 2023 р. – Режим доступу: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric>.
11. Вартість теплової енергії // Офіційний портал Києва. – Режим доступу: https://kyivcity.gov.ua/news/tarifi_kivteploenergo_na_teplo_dlya_naselennya_v_opalyvalnomu_sezoni_20212022_zalishatsya_nezminnimi.

**V. P. Kravchenko, A. O. Overchenko,
M. M. Khyschenko, M. P. Galatsan, B. A. Leus**

*Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave,
Odesa, 65044, Ukraine*

Analysis of the Possibility of Using Nuclear Power Plants with VVER-1000 for Extended Heat Supply

Taking into account the prospect of wide use of nuclear power plants for heat supply, the maximum possible productivity of the nuclear power unit with the K-1000-5.8/25-1 turbine in terms of heat release in heating mode was analyzed. The limitation of the amount of steam diverted for heating is determined by the minimum possible flow of steam into the condenser to ensure the ventilation mode of the low-pressure cylinder (LPC). Otherwise, the CNT will consume power for its rotation. The minimum flow of steam to the condenser for the ventilation mode is determined at the level of 10% of the flow of steam to the turbine. The paper determined that under these conditions the power of the heating unit of a turbine K-1000-5.8/25-1 is 900 MW. At the same time, the electric power of the turbo plant decreases from 1032 MW to 684 MW. It is shown that the exergetic efficiency of the nuclear power plant increases with the increase of the released thermal power. The increase of heat release from the NPP on economic indicators is analyzed. It was determined that with an increase in the amount of released heat, the total revenue of the NPP increases.

Keywords: heating from nuclear power plants, thermodynamic and economic efficiency.

References

1. Sokolov Ie. Ia. (2001) *Teplofikatsiya i teplovyye seti* [District heating and heating networks]. Moscow: Publishing house of the Moscow Energy Institute, 472 p. (in Rus.)
2. [Nuclear energy: how much of the world's electricity generation is borrowing from countries around the world]. *Slovo i dilo: analytical portal*. Available at: <https://www.slovoidilo.ua/2022/12/12/infografika/svit/yaderna-enerhetyka-yaku-chastku-vyrobnyctvi-elektroenerhiyi-zajmae-krayinax-svitu> (in Ukr.)
3. Hershkovich V. F. (2012). [The way to get rid of the utility power of Ukraine from methane dependence]. Available at: <https://www.c-o-k.com.ua/content/view/2640> (accessed 05.08.2024) (in Rus.)
4. Belozyorov O. M., Overchenko A. O. (2023). [Development of a strategy for the development of infrastructure for the heat supply of Odesa using the latest technology SMR-160]. *Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Students "Environmental and Energy Problems of Modernity"* (Odesa

- National Technological University, September 29–30, 2023*), pp. 59–60. (in Ukr.)
5. Kravchenko V. P., Overchenko A. O., Kozlov I. L., Kovalchuk V. I., Golovin M. O., Kozlov O. I. (2023). [Prospects for the use of atomic generation in heat supply systems]. *Proceedings of the XXXII International Conference “Problems of Ecology and Operation of Energy Facilities” (Kyiv, Institute of Technical Thermal Physics, September 20–21, 2022)*. Kyiv: IVC ALKON, NAS of Ukraine, pp. 84–89. (in Ukr.)
6. Kravchenko V., Kolykhanov V., Muromsky E., Vysotsky Yu., Galatsan M., Overchenko A. (2022). Increasing the efficiency of NPP by using the heat pump for heat supply. *Proceedings of the 13th International Conference of the Croatian Nuclear Society (Zadar, Croatia, June 5–8, 2022)*, pp. 120-1–120-10. Available at: <https://nuclear-option.org/wp-content/uploads/2022/11/S3-120.pdf>.
7. Kostyuk A. G., Frolov V. V., Bulkin A. E., Trukhniy A. D. (2016). [Steam and gas turbines for power plants]. Moscow: Publishing house of the Moscow Energy Institute, 556 p. (in Rus.)
8. Kirov V. S. (2002). *Teplovi skhemy turbostanovok AES ta yikh rozrakhunky* [Thermal schemes of NPP turbines and their calculations]. Odesa: Odesa Polytechnic University; JSC BAHVA, 202 p. (in Ukr.)
9. Dubkovsky V. O. (2004). *Termodynamichnyy analiz ta optymizatsiya AES* [Thermodynamic analysis and optimization of nuclear power plants]. Odesa: Science and technology. 48 p. (in Ukr.)
10. [The cost of electricity in 2023]. Available at: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric>. (accessed 05.08.2023) (in Ukr.)
11. [The cost of thermal energy]. Official portal of Kyiv. Available at: https://kyivcity.gov.ua/news/tarifi_kivteplo-energo_na_teplo_dlya_naselennya_v_opalyuvalnomu_sezoni_20212022_zalishatsya_nezminnimi. (accessed 05.08.2023). (in Ukr.)

Надійшла / Received 06.10.2024

Рекомендована до друку / Accepted 04.11.2024

I. S. Skiter¹, V. V. Derenhovskiy¹, O. V. Mykhailov¹, Ye. A. Menshenin¹, O. B. Savchuk¹, O. I. Trunov²

¹ Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 36a, Kirova st., Chornobyl, 07270, Ukraine

² Chernihiv Polytechnic National University, 95, Shevchenko st., Chernihiv, 14035, Ukraine

Strategic Analysis in the Selection of Sites for NPP Construction Based on Fuzzy Logic Methods

Keywords:

strategic analysis,
NPP site selection,
expert opinions,
linguistic variables,
fuzzy logic methods,
factor analysis and evaluation,
Wilson's matrix,
decision-making

The article presents an approach to the strategic analysis of the process of selecting nuclear power plant (NPP) construction sites based on fuzzy logic methods. The subject of the study is a comparative analysis of potential NPP construction sites. The object of the study is a methodology for systematic assessment of factors for analyzing NPP sites. The purpose of the study is to formalize the process of assessing the environment, its non-parametric factors, their classification by the degree of influence on the state of the research object and their impact on the decision-making process based on the use of fuzzy logic methods. The implementation of the method is based on expert assessments of groups of factors that determine the parameters of site evaluation. The method is based on the tools of fuzzy set theory: linguistic assessments of factors using triangular membership functions; Fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP) method for determining fuzzy importance coefficients of selected groups of factors of the proposed model; Center of Area (CoA) method for defuzzification of fuzzy triangular values; Fuzzy Simple Additive Weighting (SAW) method for ranking factors and selecting an effective strategic solution. For the strategic analysis of the state of NPP construction sites, a modified informative matrix for assessing the state of the system by J. Wilson was used. The following external system characteristics were selected for the study: a group of economic factors, a group of social factors, and a group of security factors. The group of experts conducted a fuzzy assessment of pairwise comparisons for the groups of factors and determined fuzzy estimates of the probabilities of the impact of external factors. The use of fuzzy linguistic estimates of the impact of external factors on the enterprise's activities and fuzzy values of the probability of their realization allows us to build an improved J. Wilson matrix. Each factor under consideration is positioned in this matrix according to linguistic estimates. This makes it possible to visually present the distribution of the identified factors by the importance of influence and the probability of realization of this influence. The developed model for generalized assessment of factors for each site allows decision makers to evaluate and compare sites taking into account the degree of implementation of the relevant groups of factors. The direction of further research is to include criteria in the model that detail the selected groups of factors and determine the integral assessments of sites based on them.

Introduction

From a systems approach perspective, the process of selecting a site for nuclear power plant (NPP) construction can be viewed as the implementation of a de-

cision-making support system analyzing a diverse set of various factors and their criteria [1]. Deploying an NPP as a potential source of electricity production requires an in-depth feasibility analysis, which considers natural conditions, land use, public perception of the facility, and its

© I. S. Skiter, V. V. Derenhovskiy, O. V. Mykhailov,
Ye. A. Menshenin, O. B. Savchuk, O. I. Trunov. License CC BY 4.0

environmental impact. Comprehensive consideration of these factor groups determines the cost of NPP construction, its long-term environmental footprint, public safety, and other operational aspects throughout its lifecycle.

Typically, among the multitude of factors influencing the selection process, alongside technical and technological factors, there are external ones, such as economic, social, demographic, historical etc. These factors can be represented non-parametrically, often by qualitative, linguistical means. Moreover, when the subject of decision-making is the selection of an NPP construction site, its external environment is characterized by significant complexity and inherent uncertainty [2]. This necessitates the objective formalization of external environmental factors, criteria, and indicators, along with their systematic assessment and classification.

The object of this study is the process of systematic analysis of potential NPP sites. The subject of the study is the comparative analysis of these potential sites based on comprehensive evaluation of relevant factors. The aim is to develop a methodology for strategic analysis and to formalize the NPP site selection process by assessing the external environment and its nonparametric factors, determining their influence on the research object and the decision-making process with the use of fuzzy logic methods.

Given the above, the development of scientifically grounded approaches to the comprehensive assessment of complex systems, exemplified by the analysis of NPP site selection, is highly relevant. This involves creating a model that evaluates not only the site itself but also the components underlying its overall assessment. Such evaluations will enable decision-makers to conduct a strategic analysis of potential sites.

To achieve the research objective, a methodological approach based on fuzzy sets theory is proposed. Fuzzy methods enable the modeling of real-world processes under conditions of incomplete and imprecise data, which are characteristic of this domain. The application of fuzzy models allows enhancing the accuracy of site assessments and incorporating varying selection strategies in decision-making. The proposed method integrates fuzzy logic techniques, ensuring a more precise consideration of uncertainty and expert assessments subjectivity in developing strategies for selecting NPP construction sites.

General approaches to formulating requirements for NPP site selection

The selection of a site for constructing an NPP as a potential technology for electricity generation requires

a thorough analysis of its necessity and feasibility. The site selection process involves various considerations, including:

- natural conditions;
- land use;
- public perception;
- environmental impact, etc.

Taking these groups of factors into account has a profound impact on construction costs, environmental conditions, public safety, and other aspects throughout the entire lifecycle of the NPP.

Factors influencing decisions on nuclear power deployment vary between countries. Some of these factors are technical, such as site selection and the safety of nuclear technology deployment, with a clear connection to safety issues. Others are economic, including capital costs and investments, while yet others are social, with corresponding safety concerns, including environmental impact, proliferation risks, and waste management issues [3].

The fundamental safety objective is to protect people and the environment from the harmful effects of ionizing radiation [4], [5]. Considering that an NPP entails significant risks owing to the substantial quantities of nuclear fuel and high-level radioactive waste, the IAEA has developed specific standards and guidelines for site selection.

Site selection constraints are considered strictly mandatory, but the methodology for site selection depends entirely on the operating organization and local regulatory authority. However, in general, site selection should strike a balance between various factors, such as economic interests, public relations, and safety [6], considering public health and safety, economic aspects, institutional requirements, environmental impact, and other factors [7].

Thus, to date, no definitive standard exists for the methodology of NPP site selection. However, the general approach involves ensuring safety and protecting the public from harmful radiation exposure, while minimizing such impacts during the selection process. Implementing NPP siting safety principles should rely on detailing the factors to be considered during site selection. The process of forming a set of factors is entrusted to national regulatory bodies and is developed based on the unique characteristics of each country. Additionally, the sets of criteria included in the selected groups of factors can also differ in content.

In [8], recommendations from the IAEA and the approaches of national regulators in 17 countries of South-east Asia and the Middle East were analyzed to define factors and criteria for solving the problem of selecting

NPP construction sites. For comparative analysis, classes of factors and their criteria are examined from social, economic, and technical perspectives. The procedure for analyzing criteria to select an NPP site can be represented as a sequential process of forming data sets, their generalizing, comparison, and decision-making. The hierarchical tree of the NPP site selection process is shown in Fig. 1.

From the perspective of systems analysis, the site selection procedure is a complex process involving the simultaneous consideration of diverse factors and their criteria. This requires, first, their formalization and, second, the use of appropriate mathematical tools to determine generalized assessments of both factor groups for various objects and the overall (integral) assessment of each individual object. In this regard, it appears appropriate to apply fuzzy logic tools for strategic analysis in the process of selecting NPP sites.

Analysis of research on using fuzzy logic methods in strategic analysis of complex systems

According to the definition by the classical strategic analysis theorist H. Igor Ansoff [9], [10], “strategic analysis of the external environment is a comprehensive study of an organization’s external environment (industry, competitors, customers, suppliers) to evaluate opportunities and threats and to develop an optimal economic strategy based on the selection among possible alternatives”.

Strategic analysis primarily relies on classical tools for comprehensive evaluation of external environmental factors (ETOM, EFEM, PESTEL, SWOT analysis, etc.) [11], [12], [13]. The study [14] evaluates and compares these tools, exploring their applicability to the strategic analysis of various enterprises and large-scale production systems.

Given that the subject of this research is NPP construction sites — as complex structural systems involving arrays of both parametric (quantitative) and non-parametric (qualitative, linguistic) indicators — the application of fuzzy logic theory presents a promising approach to addressing problems in their strategic analysis [15], [16].

In the study [17], a fuzzy approach was proposed for evaluating the influence of external factors on an enterprise strategy. A methodological framework was developed for evaluating and selecting strategic alternatives for the enterprise using fuzzy multi-criteria analysis and fuzzy logic tools. This approach enables the enterprise top management to rank the value of the developed strategic alternatives, thereby expanding the effectiveness of classical methods for strategic decision-making.

In [18], the Fuzzy DEMATEL method was applied to risk analysis in the construction industry, demonstrating its potential for identifying critical external environmental factors. Similarly, in [19] the authors proposed fuzzy logic methods to address key challenges in traditional strategic planning, such as considering internal and external factors in uncertain and imprecise environments. This model was successfully applied within an information technology corporation, showcasing its effectiveness in real-world scenarios.

Given the reliance of strategic analysis on expert assessments of external factors — often expressed linguistically or qualitatively — there is a clear need to enhance current tools for better incorporation of subjective, non-formalized, imprecise input data and expert judgments. As such, one promising research direction involves developing a decision-making support system for strategic analysis of factors in selecting NPP construction sites, leveraging fuzzy logic methods.

Research methodology

To conduct strategic analysis, this study proposes a method based on fuzzy sets theory. Unlike the existing approaches, this method considers model factors according to linguistic expert evaluations obtained through the sequential application of fuzzy logic methods, including Fuzzy AHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process), CoA (Centre of Area), Fuzzy SAW (Fuzzy Simple Additive Weighting), and a system state assessment modified informative Wilson matrix. This approach enables a more comprehensive consideration of subjective, non-formalized, and imprecise input data, as well as expert opinions and judgments. In this methodology Fuzzy AHP is used to determine factors fuzzy importance coefficients [20]; CoA method is applied for defuzzification of fuzzy triangular values [21]; Fuzzy SAW method facilitates the ranking of risk factors and selection of an effective strategic decision [22]; the modified Wilson matrix is employed to visualize the obtained results.

Strategic analysis of the external environment for NPP site selection is proposed to be conducted according to the following:

Stage 1: Identification of external environmental factors

External factors influencing NPP site selection include economic factor with its criteria (EC), social factor with its criteria (ScC), and safety factor with its criteria (SfC) (see Fig. 1).

Stage 2: Calculation of fuzzy values of factors importance

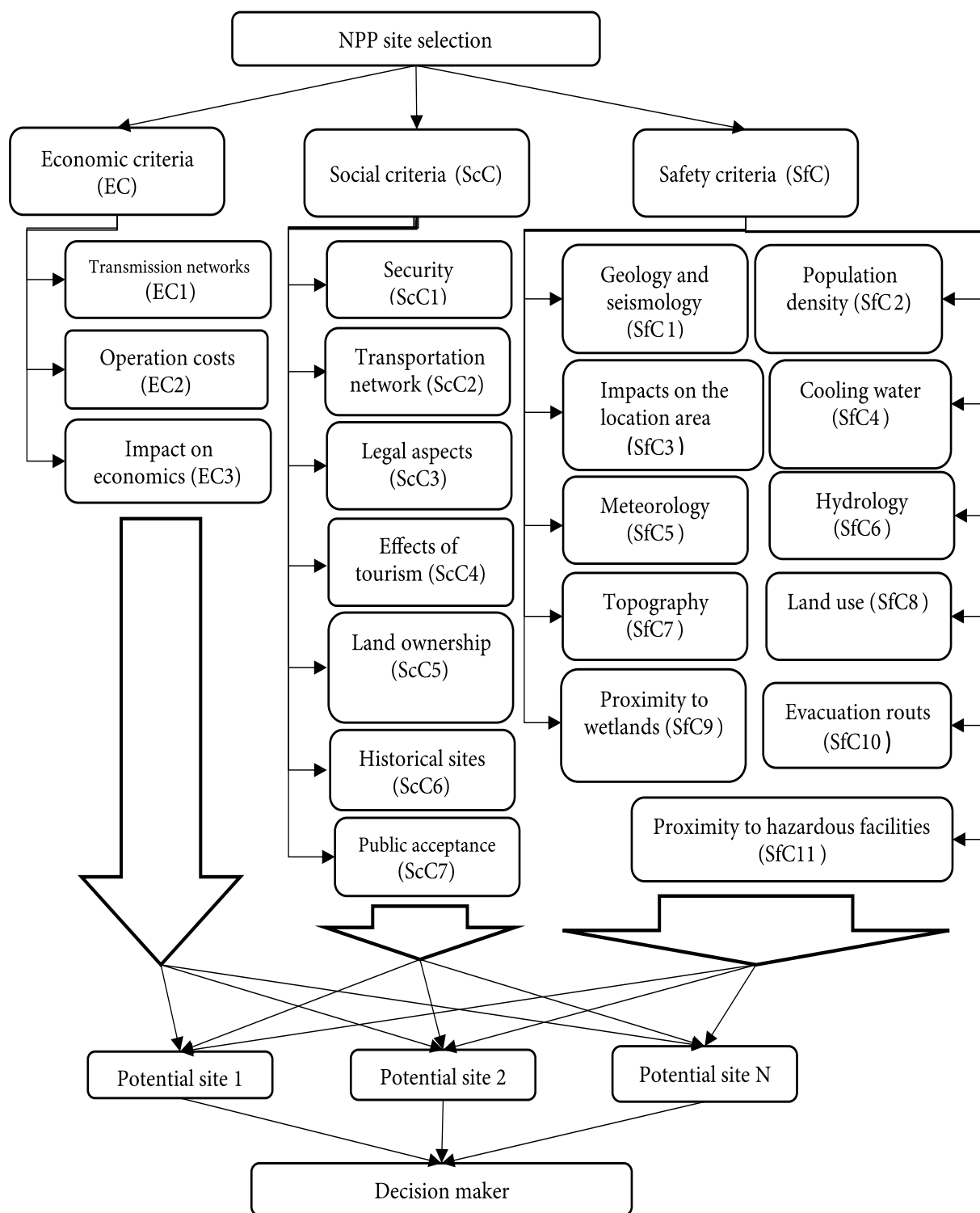


Fig. 1. Hierarchical tree for analysis and selection of sites for NPP construction

The Fuzzy AHP method is used to calculate the fuzzy values of the importance of factors influencing the assessment of potential sites:

Step 2.1. Expert evaluation of pairwise comparisons of factors (or criteria within each factor for in-depth

analysis) based on a linguistic scale (term set T1), Table 1.

Step 2.2. Construction of fuzzy pairwise comparison square matrices of the factors or criteria based on evaluations from Step 2.1., Stage 2:

Table 1. Scale for conversion of linguistic terms to fuzzy triangular numbers

Linguistic terms T1 for determining the relative importance of factors (<i>i</i> -th factor compared to <i>j</i> -th factor)	Notation	Numerical value of pairwise comparison of factors/criteria	
		$a_{ij}(\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij})$	$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$
Equal	E	(1; 1; 1)	(1; 1; 1)
Moderate	M	(2; 3; 4)	(1/4; 1/3; 1/2)
Strong	S	(4; 5; 6)	(1/6; 1/5; 1/4)
Very Strong	VS	(6; 7; 8)	(1/8; 1/7; 1/6)
Extremaly Strong	ES	(8; 9; 9)	(1/9; 1/9; 1/8)

$$\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (\alpha_{12}, \beta_{12}, \gamma_{12}) & \dots & (\alpha_{1n}, \beta_{1n}, \gamma_{1n}) \\ (\alpha_{21}, \beta_{21}, \gamma_{21}) & (1,1,1) & \dots & (\alpha_{2n}, \beta_{2n}, \gamma_{2n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\alpha_{n1}, \beta_{n1}, \gamma_{n1}) & (\alpha_{n2}, \beta_{n2}, \gamma_{n2}) & \dots & (1,1,1) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

where $\tilde{a}_{ij} = (\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij})$, $\tilde{a}_{ji} = \tilde{a}_{ij}^{-1} = (\frac{1}{\gamma_{ij}}, \frac{1}{\beta_{ij}}, \frac{1}{\alpha_{ij}})$,
 $i, j = 1, \dots, n, \quad i \neq j.$

Step 2.3. Aggregation of fuzzy pairwise comparison matrices to calculate an integrated fuzzy pairwise comparison matrix of the determined factors by transforming linguistic evaluations of K-experts into fuzzy numbers based on the scale (Table 1):

$$\begin{cases} \tilde{A} \rightarrow \tilde{F}_k = \|\tilde{f}_k\|_{n \times n} \\ \tilde{F}_k = \frac{1}{K} \oplus_{k=1}^K \tilde{f}_k = \\ = \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \alpha_{kij}, \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \beta_{kij}, \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \gamma_{kij} \right) = \\ = \left\| (\alpha_{kij}, \beta_{kij}, \gamma_{kij}) \right\|_{n \times n}, \end{cases} \quad (2)$$

where $k=1,2,\dots,K$ – number of experts.

Step 2.4. Calculation of fuzzy geometric mean values for matrix components $\tilde{F}_k$:

$$\tilde{S}_i = \left(\sqrt[n]{\alpha_{i1} \times \dots \times \alpha_{in}}, \sqrt[n]{\beta_{i1} \times \dots \times \beta_{in}}, \sqrt[n]{\gamma_{i1} \times \dots \times \gamma_{in}} \right) = (\alpha_i, \beta_i, \gamma_i), \quad (3)$$

fuzzy vector sum of geometric mean values:

$$\tilde{r} = \tilde{S}_1 \oplus \dots \oplus \tilde{S}_n = \left\{ \begin{matrix} \alpha_i + \dots + \alpha_n \\ \beta_i + \dots + \beta_n \\ \gamma_i + \dots + \gamma_n \end{matrix} \right\} = (r_\alpha, r_\beta, r_\gamma) \quad (4)$$

and their inverse values

$$(\tilde{r})^{-1} = \left(\frac{1}{r_\alpha}, \frac{1}{r_\beta}, \frac{1}{r_\gamma} \right). \quad (5)$$

Step 2.5. Evaluation of fuzzy importance indexes of the determined factors v_i and their relative weights w_i :

$$\begin{cases} \tilde{v}_i = (\alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \otimes \left(\frac{1}{r_\alpha}, \frac{1}{r_\beta}, \frac{1}{r_\gamma} \right) = (v_{1i}; v_{2i}; v_{3i}) \\ \tilde{w}_i = \left(\frac{v_{1i}}{\sum_{i=1}^n (\tilde{v}_i)^{def}}, \frac{v_{2i}}{\sum_{i=1}^n (\tilde{v}_i)^{def}}, \frac{v_{3i}}{\sum_{i=1}^n (\tilde{v}_i)^{def}} \right) = \\ = (w_{1i}; w_{2i}; w_{3i}). \end{cases} \quad (6)$$

Stage 3: Estimation of NPP site selection external environmental factors influence probability fuzzy values. The external factors influence occurrence probability is linguistically evaluated using the term set T2 = {very low – VL; low – L; medium – M; high – H; very high – VH}. The semantics of these terms are represented as fuzzy numbers in the range [0; 1] (Table 2).

For each *k*-th expert, fuzzy estimates of external factors occurrence probability are determined $p=p_1, \dots, p_K$ by sequentially implementing Steps 1 to 3 of the algorithm for the whole array of factors and criteria.

Stage 4: Estimation of external factors influence level fuzzy values. NPP site selection external factors and the levels of their influence on decision-making strategy are assessed as linguistic variables (term set T3). The semantics of these terms are represented as fuzzy numbers in the range [-6; 6], with corresponding membership functions and triangular fuzzy representations (Table 3).

As a result, for each *k*-th expert, fuzzy estimates of external factors influence levels are determined $\tilde{inf} = (\tilde{inf}_1, \dots, \tilde{inf}_K)$.

Using fuzzy linguistic evaluations of external factors influence on NPP site selection along with their occurrence probability fuzzy values, an enhanced and detailed Wilson matrix is constructed to assess the positive and

Table 2. Evaluation of factors influence occurrence probabilities

Linguistic terms T2 for estimation of fuzzy probability values of NPP site selection external environmental factors influence occurrence	Notation	Semantics of terms π_i
Very low	VL	(0.0; 0.0; 0.25)
Low	L	(0.15; 0.3; 0.45)
Medium	M	(0.35; 0.5; 0.65)
High	H	(0.55; 0.7; 0.85)
Very high	VH	(0.75; 1; 1)

Table 3. Evaluation of factors influence level

Linguistic terms T3 for estimation of fuzzy influence values of NPP site selection external factors influence level	Notation	Ter (t/o')	
		Negative influence, "threats" (t)	Positive influence, "opportunities" (o)
No Significant	NS	(-1; 0; 0)	(0; 0; 1)
Very low	VL	(-2; -1; 0)	(0; 1; 2)
Low	L	(-3; -2; -1)	(1; 2; 3)
Medium	M	(-4; -3; -2)	(2; 3; 4)
High	H	(-5; -4; -3)	(3; 4; 5)
Very high	VH	(-6; -5; -4)	(4; 5; 6)
Extremely High	EH	(-6; -6; -5)	(5; 6; 6)

*With the index «t» – Threats or «o» – Opportunity

negative impacts of factors (opportunities and threats), as shown in Fig. 2.

Each evaluated factor is positioned within this matrix based on the linguistic evaluations obtained on the Stages 3 and 4, enabling a visual representation of the distribution of these factors by their influence level and its occurrence probability.

Testing the algorithm for strategic analysis of NPP construction sites

To validate the proposed methodology, a strategic analysis of sites for NPP construction was conducted using the example of the EC (Stage 1).

$$EC = \begin{cases} EC_1 - \text{«Energy transmission networks»} \\ EC_2 - \text{«Operation costs»} \\ EC_3 - \text{«Impacts on the economy»} \end{cases}$$

As in [2], the evaluation involved 12 qualified experts who performed pairwise comparisons of factors for three potential sites: Khmelnytskyi NPP, Rivne NPP, and South Ukraine NPP, based on a linguistic scale (term set T1) (Stage 2, Step 2.1). The expert linguistic evaluation of experts' confidence level was defined as high (H). As a result,

a total of $12 \times 3 = 36$ matrices were obtained, with their structure illustrated in Fig. 3.

To automate the calculation processes described in the proposed methodology (Stage 2, Steps 2.2–2.5, and Stages 3–4) and to facilitate the scientific analysis of strategic decisions, a specialized software module named "STRATEHIYA" was developed. The choice of cross-platform programming language Python ensured flexibility and scalability of the development while also opening up wide opportunities for seamless integration with other analytical tools and its further enhancement.

The architecture of the module is based on the efficient utilization of the following libraries:

NumPy: a package for scientific computing featuring the option of working with multidimensional arrays. It achieves performance levels comparable to specialized software packages for scientific calculations [23].

SciPy: a package for scientific and engineering computing that operates on NumPy arrays. It efficiently handles large datasets, allowing for in-depth analysis and identification of patterns [24].

Scikit-fuzzy (Skfuzzy): a package for fuzzy logic operations in Python, built to work with NumPy arrays. It provides access to a wide range of mathematical algorithms

Threats							Factor influence occurrence probability		Opportunities						
EHt	VHt	Ht		Mt	Lt		VLt	Vlo	Lo		Mo	Ho		VHo	EHo
	At							VH						Ao	
								H							
				Bt				M			Bo				
				Ct			Dt	L	Do		Co				
								VL							
-6	-5	-4		-3	-2		-1	1	2		3	4		5	6
Factors influence level															

Fig. 2. Matrix of fuzzy evaluation of opportunities and threats of factors influence on the assessment of NPP site selection

Khmelnyskyi NPP							
Expert 1				Expert 2			
	EC ₁	EC ₂	EC ₃		EC ₁	EC ₂	EC ₃
EC ₁	(1; 1; 1)	(2; 3; 4)	(4; 5; 6)	EC ₁	(1; 1; 1)	(2; 3; 4)	(4; 5; 6)
EC ₂	(0.25; 0.33; 0.5)	(1; 1; 1)	(2; 3; 4)	EC ₂	(0.25; 0.33; 0.5)	(1; 1; 1)	(4; 5; 6)
EC ₃	(0.17; 0.2; 0.25)	(0.25; 0.33; 0.5)	(1; 1; 1)	EC ₃	(0.17; 0.2; 0.25)	(0.17; 0.2; 0.25)	(1; 1; 1)
Rivne NPP							
Expert 1				Expert 2			
	EC ₁	EC ₂	EC ₃		EC ₁	EC ₂	EC ₃
EC ₁	(1; 1; 1)	(2; 3; 4)	(4; 5; 6)	EC ₁	(1; 1; 1)	(2; 3; 4)	(1; 1; 1)
EC ₂	(0.25; 0.33; 0.5)	(1; 1; 1)	(2; 3; 4)	EC ₂	(0.25; 0.33; 0.5)	(1; 1; 1)	(2; 3; 4)
EC ₃	(0.17; 0.2; 0.25)	(0.25; 0.33; 0.5)	(1; 1; 1)	EC ₃	(1; 1; 1)	(0.25; 0.33; 0.5)	(1; 1; 1)
South Ukraine NPP							
Expert 1				Expert 2			
	EC ₁	EC ₂	EC ₃		EC ₁	EC ₂	EC ₃
EC ₁	(1; 1; 1)	(4; 5; 6)	(2; 3; 4)	EC ₁	(1; 1; 1)	(1; 1; 1)	(2; 3; 4)
EC ₂	(0.17; 0.2; 0.25)	(1; 1; 1)	(4; 5; 6)	EC ₂	(1; 1; 1)	(1; 1; 1)	(2; 3; 4)
EC ₃	(0.25; 0.33; 0.5)	(0.17; 0.2; 0.25)	(1; 1; 1)	EC ₃	(0.25; 0.33; 0.5)	(0.25; 0.33; 0.5)	(1; 1; 1)

Fig. 3. Fragment of results from fuzzy expert pairwise comparison of EC

and is designed to handle fuzzy concepts and uncertainty, which are characteristic of strategic decision-making processes [Scikit-fuzzy // API Reference [25].

Matplotlib: a comprehensive library for creating static, animated, and interactive visualizations in Python. It allows for clear and informative graphical representations, facilitating the interpretation of analytical results [26].

The sequential implementation of Steps 2.2–2.5 of Stage 2 enabled the calculation of fuzzy importance co-

efficients vi of the identified factors and their relative weights wi . The results are presented in Table 4.

At Stage 3 of the proposed algorithm, the fuzzy probabilities of the influence of economic factor criteria on the process of selecting a site for NPP construction were determined. The structure of the fuzzy matrices used for the probability determination is shown in Fig. 4, and the results of the probability calculations are presented in Table 5.

At the final stage of the algorithm (Stage 4), an evaluation of the influence levels of the economic factor components on the decision-making strategy for selecting an NPP construction site was conducted based on fuzzy expert evaluations (in accordance with the linguistic terms T3, Table 3). The results of aggregating the fuzzy assessments

into crisp influence parameters are presented in Table 6.

The obtained results allow for the assessment of the influence level of EC and their classification within the “Threats – Opportunity” coordinates.

At the final stage of the algorithm, a modified Wilson matrix was constructed, integrating all intermediate

Table 4. Fuzzy importance indexes and relative weights of EC

Economic factor criteria	Importance index of the criterium v_i	Relative weight of the criterium w_i
Khmelnyskyi NPP		
EC ₁ “Energy Transmission Networks”	0.244	0.370
EC ₂ “Operation Costs”	0.210	0.319
EC ₃ “Impacts on the Economy”	0.164	0.250
Rivne NPP		
EC ₁ “Energy Transmission Networks”	0.244	0.370
EC ₂ “Operation Costs”	0.204	0.309
EC ₃ “Impacts on the Economy”	0.170	0.257
South Ukraine NPP		
EC ₁ “Energy Transmission Networks”	0.243	0.367
EC ₂ “Operation Costs”	0.201	0.302
EC ₃ “Impacts on the Economy”	0.175	0.264

Khmelnyskyi NPP							
Expert 1				Expert 2			
	EC ₁	EC ₂	EC ₃		EC ₁	EC ₂	EC ₃
EC ₁	(1; 1; 1)	(0.35; 0.5; 0.65)	(0.35; 0.5; 0.65)	EC ₁	(1; 1; 1)	(0.35; 0.5; 0.65)	(0.15; 0.3; 0.45)
EC ₂	(1.54; 2; 2.86)	(1; 1; 1)	(0.55; 0.7; 0.85)	EC ₂	(1.54; 2; 2.86)	(1; 1; 1)	(0.75; 1; 1)
EC ₃	(1.54; 2; 2.86)	(1.18; 1.43; 1.82)	(1; 1; 1)	EC ₃	(2.22; 3.33; 6.67)	(1; 1; 1.33)	(1; 1; 1)
Rivne NPP							
Expert 1				Expert 2			
	EC ₁	EC ₂	EC ₃		EC ₁	EC ₂	EC ₃
EC ₁	(1; 1; 1)	(0.55; 0.7; 0.85)	(0.35; 0.5; 0.65)	EC ₁	(1; 1; 1)	(0.15; 0.3; 0.45)	(0.15; 0.3; 0.45)
EC ₂	(1.18; 1.43; 1.82)	(1; 1; 1)	(0.75; 1; 1)	EC ₂	(2.22; 3.33; 6.67)	(1; 1; 1)	(0.35; 0.5; 0.65)
EC ₃	(1.54; 2; 2.86)	(1; 1; 1.33)	(1; 1; 1)	EC ₃	(2.22; 3.33; 6.67)	(1.54; 2; 2.86)	(1; 1; 1)
South Ukraine NPP							
Expert 1				Expert 2			
	EC ₁	EC ₂	EC ₃		EC ₁	EC ₂	EC ₃
EC ₁	(1; 1; 1)	(0.15; 0.3; 0.45)	(0.55; 0.7; 0.85)	EC ₁	(1; 1; 1)	(0.15; 0.3; 0.45)	(0.15; 0.3; 0.45)
EC ₂	(2.22; 3.33; 6.67)	(1; 1; 1)	(0.55; 0.7; 0.85)	EC ₂	(2.22; 3.33; 6.67)	(1; 1; 1)	(0.35; 0.5; 0.65)
EC ₃	(1.18; 1.43; 1.82)	(1.18; 1.43; 1.82)	(1; 1; 1)	EC ₃	(2.22; 3.33; 6.67)	(1.54; 2; 2.86)	(1; 1; 1)

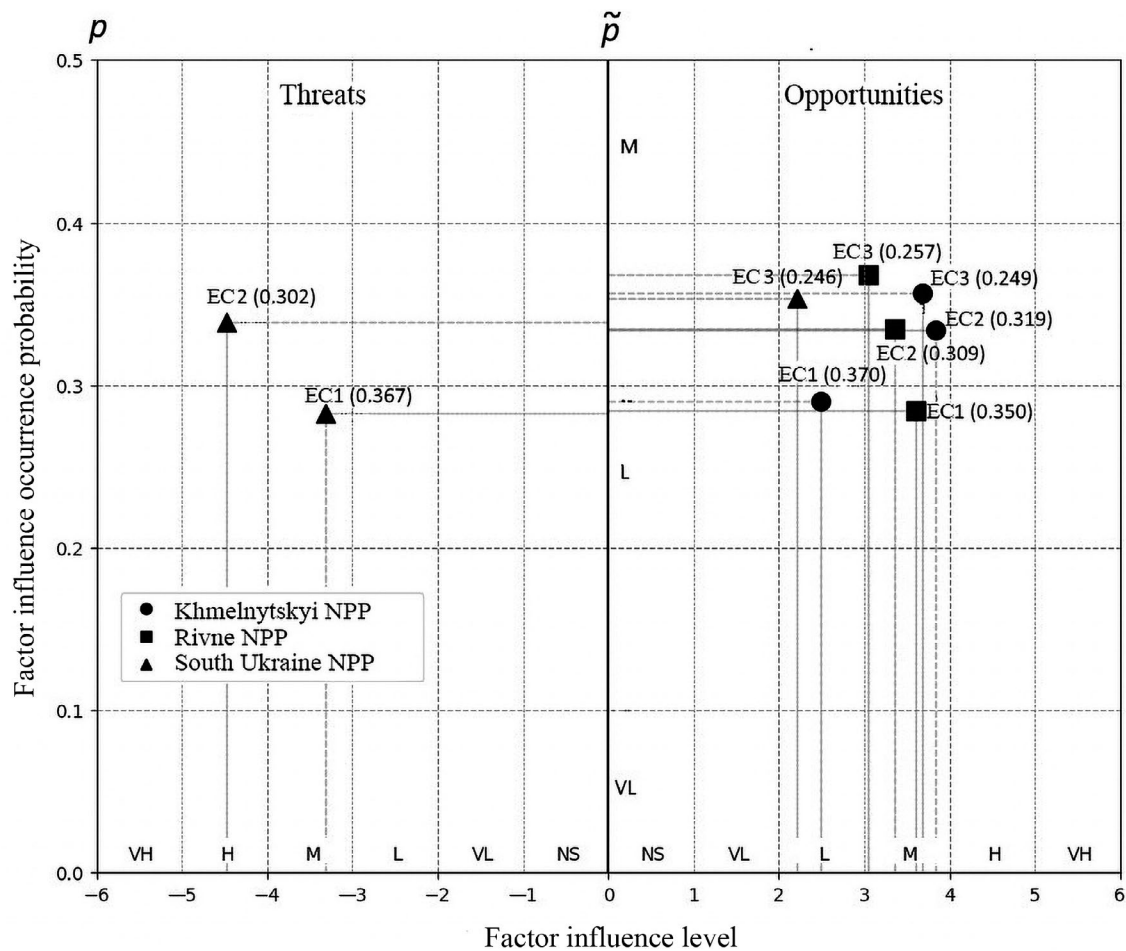
Fig. 4. Fragment of the results of fuzzy expert pairwise comparison of EC for their occurrence probabilities determination

Table 5. NPP site selection EC influence occurrence probability

Economic factor criteria, EC	Influence occurrence probability of the criterium, p_i
Khmelnytskyi NPP	
EC ₁ "Energy Transmission Networks"	0.2902
EC ₂ "Operation Costs"	0.3340
EC ₃ "Impacts on the Economy"	0.3570
Rivne NPP	
EC ₁ "Energy Transmission Networks"	0.2844
EC ₂ "Operation Costs"	0.3345
EC ₃ "Impacts on the Economy"	0.3684
South Ukraine NPP	
EC ₁ "Energy Transmission Networks"	0.2828
EC ₂ "Operation Costs"	0.3388
EC ₃ "Impacts on the Economy"	0.3535

Table 6. Numerical estimates of the NPP site selection process EC influence levels

Economic factor criteria, EC	Influence level of the criterium, inf_i
Khmelnytskyi NPP	
EC ₁ "Energy Transmission Networks"	2.92
EC ₂ "Operation Costs"	4.47
EC ₃ "Impacts on the Economy"	4.29
Rivne NPP	
EC ₁ "Energy Transmission Networks"	3.92
EC ₂ "Operation Costs"	3.63
EC ₃ "Impacts on the Economy"	3.31
South Ukraine NPP	
EC ₁ "Energy Transmission Networks"	-3.94
EC ₂ "Operation Costs"	-5.32
EC ₃ "Impacts on the Economy"	2.62

**Fig. 5. Modified Wilson matrix for EC in NPP site evaluation**

results. This matrix can serve as a visualization tool for decision-makers to facilitate corresponding managerial decisions (Fig. 5). In Fig. 5, the weights w_i of the respective $EC - EC_i(w_i)$ for different potential sites are presented. Additionally, upon the DM's request, the importance coefficients v_i of the criteria can also be provided.

Conclusions

This study presents a methodological approach to strategic analysis and an algorithm for evaluating factors and their criteria in the process of selecting the optimal site for NPP construction based on fuzzy logic methods. The implementation of the method relies on classical expert evaluation techniques for groups of factors, utilizing the tools of fuzzy set theory to assess potential sites. For the strategic analysis of NPP construction sites, a modified informative system state evaluation Wilson matrix was employed. Its application enables a more flexible approach to analyzing and incorporating expert-relevant information, subjective, non-formalized, fuzzy input data, and expert opinions and judgments. The application of the proposed methodological approach has provided substantiated conclusions regarding the impact of economic factor criteria on the preparation and adoption of strategic decisions. The developed model for generalized factor evaluation for each site allows decision-makers to assess and compare sites, considering the degree of realization of respective groups of factors.

The results of the pilot application of the proposed methodology reveal prospects for further research and testing of the developed method. This includes the comprehensive consideration of various factors and their criteria, the determination of integral site evaluations based on them, and the integration of the developed model into decision support systems for analyzing potential NPP construction sites.

References

1. Skiter I. S., Derenhovskiy V. V. (2024). Analysis of scenarios for transforming the object "Ukryttya" into an environmentally safe system by the method of multicriteria optimization. *Nucl. Phys. At. Energy*, vol. 25 (1), pp. 47–57. doi.org/10.15407/jnpae2024.01.047
2. Skiter I. S., Derenhovskiy V. V., Rudko V. M. (2024). Comparison of NPP siting sites by expert evaluation of parametric criteria. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 30 (2), pp. 13–22. (in Ukr.)
3. Alonso A. (ed.). (2012). *Infrastructure and Methodologies for the Justification of Nuclear Power Programmes* (Woodhead Publishing Series in Energy) 1st Edition. Woodhead Publishing; 1st edition. 1024 p.
4. IAEA (1999). *Basic safety principles for nuclear power plants*: 75-INSAG-3 Rev. 1. A report by the International Nuclear Safety Advisory Group. Vienna: International Atomic Energy Agency, 105 p.
5. IAEA (2006). *Fundamental safety principles: safety fundamentals*. IAEA safety standards series No. SF-1. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006. 37 p.
6. Grimston M., Nuttall W. J., Vaughan G. (2014). The siting of UK nuclear reactors. *Journal of Radiological Protection*, vol. 34 (2), doi.org/10.1088/0952-4746/34/2/R1
7. Kanney J., Sosa B. (2013). *General site suitability criteria for nuclear power stations*, U.S. Nuclear Regulatory Commission Draft Regulatory Guide DG-4034, 64 p.
8. Abdullah A. G., Shafii M. A., Pramuditya S., Setiadiptura T., Anzhar K. (2023). Multi-criteria decision making for nuclear power plant selection using fuzzy AHP: Evidence from Indonesia. *Energy and AI*, vol. 14, art. 10026, 13 p. doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100263
9. Ansoff H. I. (1965). *Corporate strategy. An analytic approach to business policy for growth and expansion*. McGraw-Hill Book Co., New York, 109 p.
10. Ansoff H. I., (1957). Strategies for diversification, *Harvard Business Review*, vol. 35, pp. 113–124. doi.org/10.1016/0024-6301(72)90048-9
11. Azhaman I. A., Hordieiev O. Yu., Petryshchenko N. A. (2022). Strategic analysis of the external environment of the construction industry of Ukraine. *Journal of Strategic Economic Research*, vol. 2 (7), pp. 30–40, doi.org/10.30857/2786-5398.2022.2.3 (in Ukr.)
12. Pylypenko O. V.; Koval M. I. (ed.) (2018). *Stratehichnyy analiz* [Strategic analysis]. Kyiv: Personal, 350 p. (in Ukr.)
13. Balan V. (2018). *Балан В. Stratehichne upravlinnya* [Strategic management]. Kyiv: Naukova Stolitsia, 524 p. (in Ukr.)
14. Fleisher C. S., Bensoussan B. (2007). Business and Competitive Analysis: Effective Application of New and Classic Methods. *Revista Inteligência Competitiva*, vol. 2 (2), 35 p. doi.org/10.24883/IberoamericanIC.v2i2.37
15. Kravchenko M. O. (2016). Application of fuzzy logic methods to determine the integral indicator of financial stability of enterprises. *Ekonomichnyy analiz* [Economic analysis], vol. 26 (1), pp. 123–129. (in Ukr.)
16. Heydarova O. (2023). Application of fuzzy set methods for making management decisions in crisis conditions. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic sciences*, vol. 3, pp. 118–123. doi.org/10.31891/2307-5740-2023-318-3-17
17. Balan V. H. (2020). Fuzzy model of evaluation and se-

- lection of strategies based on modification of the quantitative strategic planning matrix. *Problems of Systemic Approach in the Economy*, vol. 3 (77), pp. 85–93. doi.org/10.32782/2520-2200/2020-3-12. (in Ukr.)
18. Seker S. (2017). Application of Fuzzy DEMATEL Method for Analyzing Occupational Risks on Construction Sites. *Sustainability*, vol. 9, art. 2083. doi.org/10.3390/su9112083.
 19. Taghavifard M. T., Mahdiraji H. A., Alibakhshi A. M., Zavadskas E. K., Bausys R. (2018). An Extension of Fuzzy SWOT Analysis: An Application to Information Technology Information, vol. 9 (3), 46. doi.org/10.3390/info9030046.
 20. Milošević D. M., Milošević M. R., Simjanović D. J. (2020). Implementation of Adjusted Fuzzy AHP Method in the Assessment for Reuse of Industrial Buildings. *Mathematics*, vol. 8 (10), art. 1697. Available at: <https://www.mdpi.com/2227-7390/8/10/1697>
 21. Simon J., Santa R. (2023). Energy efficient smart home heating system using renewable energy source with fuzzy control design. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, vol. 6 (2), pp. 948–974. doi.org/10.31181/dmame622023825
 22. Ajay D., Manivel M., Aldring J. (2019). Neutrosophic Fuzzy SAW Method and Its Application. *International journal of analytical and experimental modal analysis*, vol. 11, pp. 881–887.
 23. Harris C. R., Millman K. J., van der Walt S. J., Gommers R., Virtanen P., Cournapeau D., et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, vol. 585 (7825), pp. 357–362. doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2.
 24. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T. E., Haberland M., Reddy T., Cournapeau D., et al. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nat. Methods*, vol. 17, pp. 261–272. doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2.
 25. API Reference. Scikit-fuzzy. Available at: <https://python-hosted.org/scikit-fuzzy/api/api.html>.
 26. Matplotlib 3.5.0 documentation. Available at: <https://matplotlib.org/stable/index.html>.

І. С. Скітер¹, В. В. Деренговський¹, О. В. Михайлов¹, Є. А. Меньшенін¹, О. Б. Савчук¹, О. І. Трунов²

¹Інститут проблем безпеки АЕС НАН України,

вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, Київська обл., 07270, Україна

²Національний університет «Чернігівська політехніка»,
вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна

Стратегічний аналіз при виборі майданчиків для будівництва АЕС на основі методів нечіткої логіки

Представлено опис методичного підходу до оптимального вибору майданчиків для будівництва АЕС на основі застосування математичного апарату теорії нечітких множин. Реалізація підходу базується на експертних оцінках груп факторів, що визначають параметри оцінки майданчиків. Запропоновано проведення комплексного аналізу, побудованого на лінгвістичних оцінках факторів за допомогою трикутних функцій належності, методів Fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP), Centre of Area (CoA), Fuzzy Simple Additive Weighting (SAW). Для стратегічного аналізу стану майданчиків будівництва АЕС з метою вибору оптимального місця їх розміщення використана модифікована інформативна матриця оцінювання стану системи Дж. Вілсона. Розроблена модель для узагальненої оцінки факторів для кожного майданчика дає змогу особам, які приймають рішення, проводити оцінку та порівняння майданчиків з урахуванням ступеня реалізації відповідних груп факторів. Напрямом подальших досліджень є включення в модель критеріїв, які деталізують обрані групи факторів та визначення інтегральних оцінок майданчиків на їхній основі.

Ключові слова: стратегічний аналіз, вибір майданчика АЕС, експертні оцінки, лінгвістичні змінні, методи нечіткої логіки, факторний аналіз та оцінка, матриця Вілсона, підтримка прийняття рішень.

Надійшла / Received 12.02.2024

Рекомендована до друку / Accepted 26.12.2024

В. І. Скалозубов, О. А. Дорож, Д. С. Бундєв, О. С. Сухомлінов, С. С. Прокоф'єв

Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна

Питання безпеки та управління аваріями в малих модульних реакторах SMR-160 в умовах теплогідродинамічної нестійкості

Ключові слова:

безпека,
малі модульні реактори,
управління аваріями

Для об'єктивної оцінки безпеки малих модульних реакторів (ММР) з контуром природної циркуляції пасивних систем безпеки встановлено необхідність враховувати можливість виникнення умов міжконтурної теплогідродинамічної нестійкості (ТГН), яка супроводжується високоамплітудними коливаннями рівня та тиску в активній зоні реактора. Розроблено новий метод визначення критеріїв та умов виникнення ТГН в умовах аварій з міжконтурними течами в модульному реакторі SMR-160, заснований на моделюванні впливу флуктуаційних відхилень визначальних гідродинамічних параметрів на умови міжконтурної ТГН. У загальних випадках за умови міжконтурної ТГН обґрунтовано необхідність додаткових дій оперативного персоналу для управління аваріями в SMR-160. З урахуванням можливих ненавмисних помилкових дій персоналу рівень безпеки модульних реакторів SMR-160 може бути значно нижче проектних оцінок, тому доведено необхідність кваліфікації та запровадження модернізованих стратегій управління аваріями в умовах міжконтурної ТГН пасивних систем безпеки модульних реакторів SMR-160.

Вступ

Автоматизоване управління аваріями в малих модульних ядерних реакторах (ММР) малої потужності тільки пасивними системами безпеки (без застосування електронасосів) дає змогу передбачити підвищену безпеку таких реакторів. За проектними термінами частота виникнення важких (ядерних аварій) з пошкодженням активної зони для більшості типів ММР становить близько $10^{-6} \dots 10^{-7}$ 1/рік, що відповідає новому поколінню безпеки реакторів (3+).

Але уроки аварій на АЕС «Три-Майл-Айленд» (1979 р.), Чорнобильській АЕС (1986 р.), АЕС «Фукусіма» (2011 р.) та багаторічний досвід експлуатації ядерних енергоустановок дали змогу встановити окремі обмеження прийнятності ймовірнісних методів оцінки безпеки. Тому пріоритетне значення сьогодні

отримали детерміністські методи аналізу рівня безпеки та обґрунтування ефективних стратегій управління аваріями [1, 4].

Одним з таких питань для ММР є визначення умов виникнення теплогідродинамічної нестійкості (ТГН) у контурах природної циркуляції (ПЦ) пасивних систем безпеки (ПСБ). Наслідками ТГН у реакторі можуть бути високоамплітудні коливання рівня теплоносія в активній зоні, порушення умов теплообміну та критеріїв прийнятності/безпеки, термічні та гідродинамічні «удари» на конструкції та інші негативні ефекти.

У цій роботі на прикладі ММР SMR-160 запропоновано детерміністський метод визначення умов виникнення ТГН в ПСБ з контурами ПЦ для обґрунтування більш ефективних стратегій управління аваріями та рівня безпеки.

Аналіз літературних джерел

Питанням аналізу безпеки ММР присвячено багато робіт [1–12 та ін.]. Зокрема, для більшості ММР були розглянуті такі групи вихідних подій (ВП) проєктних аварій:

- 1) збільшення тепловідведення через 2-й контур (зменшення температури живильної води, збільшення витрати живильної води та пари, ненавмисне відкриття ізолювальних клапанів та тощо);
- 2) зменшення тепловідведення через 2-й контур (знеструмлення енергоблоку, відмова турбіни, втрата вакууму в конденсаторах турбоустановок, витрати живильної води та ін.);
- 3) зміна реактивності (неконтрольований викид регулюючих стрижнів, ненавмисне зниження концентрації бору та ін.);
- 4) зміни об'єму теплоносія в 1-му контурі (неефективна робота систем контролю, ненавмисне відкриття ізолювального клапана реактора, розрив теплообмінної трубки парогенератора (ТОТ ПГ), течі в трубопроводах, ненавмисне спрацювання системи аварійного розхолодження активної зони та ін.);
- 5) аварійні події з перевантаженням ядерного палива та ін.

Як проєктні аварії були аналізовані відмови на спрацювання аварійного захисту реактора (ATWS) та пошкодження активної зони реактора.

Але вихідні події аварій в умовах міжканальної ТГН контурів ПЦ ПСБ ММР вивчені недостатньо.

Питання моделювання умов різних видів ТГН у системах енергообладнання розглядалися у роботах [13–15]:

високоамплітудна (термоакустична) ТГН у двофазних нерівноважних потоках;

низькочастотна ТГН у парогенеруючих та конденсуючих каналах;

низькочастотна гідродинамічна нестійкість у перехідних режимах пуску насосів;

аперіодична (імпульсна) ТГН у трансзвукових режимах протікань, у разі термо- та гідродинамічних «ударів» та ін.

Але питання моделювання умов міжканальної ТГН у контурах ПЦ ПСБ ММР також вивчені недостатньо, що визначає мету та завдання цієї роботи.

Критерії та умови ТГН SMR-160 в умовах аварій з міжконтурними течами

Управління аваріями в модульному реакторі SMR-160 здійснюється такими ПСБ з контурами ПЦ:

система підживлення та розхолодження за 1-м контуром (СПР 1);

система підживлення та розхолодження за 2-м контуром (СПР 2);

система пасивного підживлення активної зони за низького тиску (СППАЗ).

Основні «уставки» автоматичного включення ПСБ з ПЦ:

зниження рівня теплоносія в реакторі менше критичного рівня;

підвищення тиску в ПГ за 2-м контуром більше критичного значення.

Основні положення та припущення

1. Моделюється вихідна аварійна подія — міжконтурна течя по ПГ зі збільшенням тиску в ПГ та зниженням рівня теплоносія в реакторі (ВП RG).

2. У загальному випадку передбачається, що в умовах аварій ВП RG відбувається автоматичне включення всіх контурів ПЦ ПСБ з можливими течами (рис. 1).

3. Моделюється вплив випадкових (флуктуаційних) відхилень теплогідродинамічних параметрів у встановленому (рівноважному) стані на критерії та умови міжконтурної ТГН в активній зоні реактора [13–15]:

$$K_s = \frac{\Delta P}{\Delta M} > 0, \quad (1)$$

де ΔP , ΔM — одночасна зміна тиску та маси теплоносія в реакторі.

Рівняння руху та теплового балансу в контурах ПЦ ПСБ у встановленому аварійному режимі з течами L1, L2 та L3:

$$\Delta \rho_1 \cdot g \cdot H_1 = \xi_1 \cdot (G_1 + G_3 - G_{L1} - G_{L2})^2 / \quad (2)$$

$$/ (\rho_1 \cdot F_1^2) = \Delta P_1(\xi_1),$$

$$\Delta \rho_2 \cdot g \cdot H_2 = \xi_2 \cdot (G_2 + G_{L2} - G_{L3})^2 / \quad (3)$$

$$/ (\rho_2 \cdot F_2^2) = \Delta P_2(\xi_2),$$

$$\Delta \rho_3 \cdot g \cdot H_3 = \xi_3 \cdot (G_3 - G_{L2})^2 / (\rho_3 \cdot F_3^2), \quad (4)$$

$$(G_1 + G_3 - G_{L1} - G_{L2}) \cdot \Delta i_R = N - Q_g - Q_{k1} + G_{L1} \cdot i_g + (G_1 - G_{L2}) \cdot i_1 + G_3 \cdot i_3, \quad (5)$$

$$(G_2 + G_{L1} - G_{L3}) \cdot \Delta i_g = Q_g - Q_{k2} - G_{L1} \cdot i_g - G_{L3} \cdot i_2, \quad (6)$$

де $\Delta\rho_1, \Delta\rho_2, \Delta\rho_3$ – різниця середньої густини середовища в підйомних та опускних ділянках контурів ПЦ СПР 1, СПР 2, СППАЗ; g – прискорення сили тяжіння; H_1, H_2, H_3 – загальна висота СПР 1, СПР 2 та СППАЗ; ξ_1, ξ_2, ξ_3 – параметри сумарного гідравлічного опору СПР 1, СПР 2 та СППАЗ; G_1, G_2, G_3 – масові витрати в СПР 1, СПР 2, СППАЗ; ρ_1, ρ_2, ρ_3 – густина середовища в опускних ділянках СПР 1, СПР 2 та СППАЗ; F_1, F_2, F_3 – максимальні площі прохідного перерізу в опускних ділянках СПР 1, СПР 2 та СППАЗ; $\Delta i_R, \Delta i_g$ – перепад питомих ентальпій у реакторі та ПГ; N – потужність тепловиділень в активній зоні; Q_g, Q_{k1}, Q_{k2} – інтегральні теплові потоки між реактором та ПГ, у теплообмінниках СПР1 та СПР 2; i_g, i_1, i_2, i_3 – питомі ентальпії на виході з ПГ, СПР1, СПР 2 та СППАЗ.

Масові витрати в течах:

$$G_{L2} = \mu_{L2} \cdot F_{L2} \cdot \sqrt{\rho_1 (P_R - P_0)}, \quad (8)$$

$$G_{L3} = \mu_{L3} \cdot F_{L3} \cdot \sqrt{\rho_3 (P_g - P_0)}, \quad (9)$$

де $\mu_{L1}, \mu_{L2}, \mu_{L3}$ – гідравлічні параметри витрати в течі; F_{L1}, F_{L2}, F_{L3} – еквівалентні площі прохідного перерізу течі; P_R, P_g, P_0 – тиск у реакторі, ПГ та в гермооб'ємі.

У форматі флуктуаційних відхилень визначальних параметрів умов міжконтурної ТГН:

$$\delta \vec{y} \ll \vec{y}_0,$$

$$\vec{y} = \text{col} \{P_R, P_g, G_1, G_2, G_3\}. \quad (10)$$

Після лінеаризації рівнянь (2)–(10) отримаємо систему рівнянь:

$$K_1(\vec{y}_0) \cdot \delta P_R + K_2(\vec{y}_0) \cdot \delta P_g + K_3(\vec{y}_0) \cdot \delta G_1 + K_4(\vec{y}_0) \cdot \delta G_2 + K_5(\vec{y}_0) \cdot \delta G_3 = 0, \quad (11)$$

$$K_6(\vec{y}_0) \cdot \delta P_R + K_7(\vec{y}_0) \cdot \delta P_g + K_8(\vec{y}_0) \cdot \delta G_1 + K_9(\vec{y}_0) \cdot \delta G_2 + K_{10}(\vec{y}_0) \cdot \delta G_3 = 0, \quad (12)$$

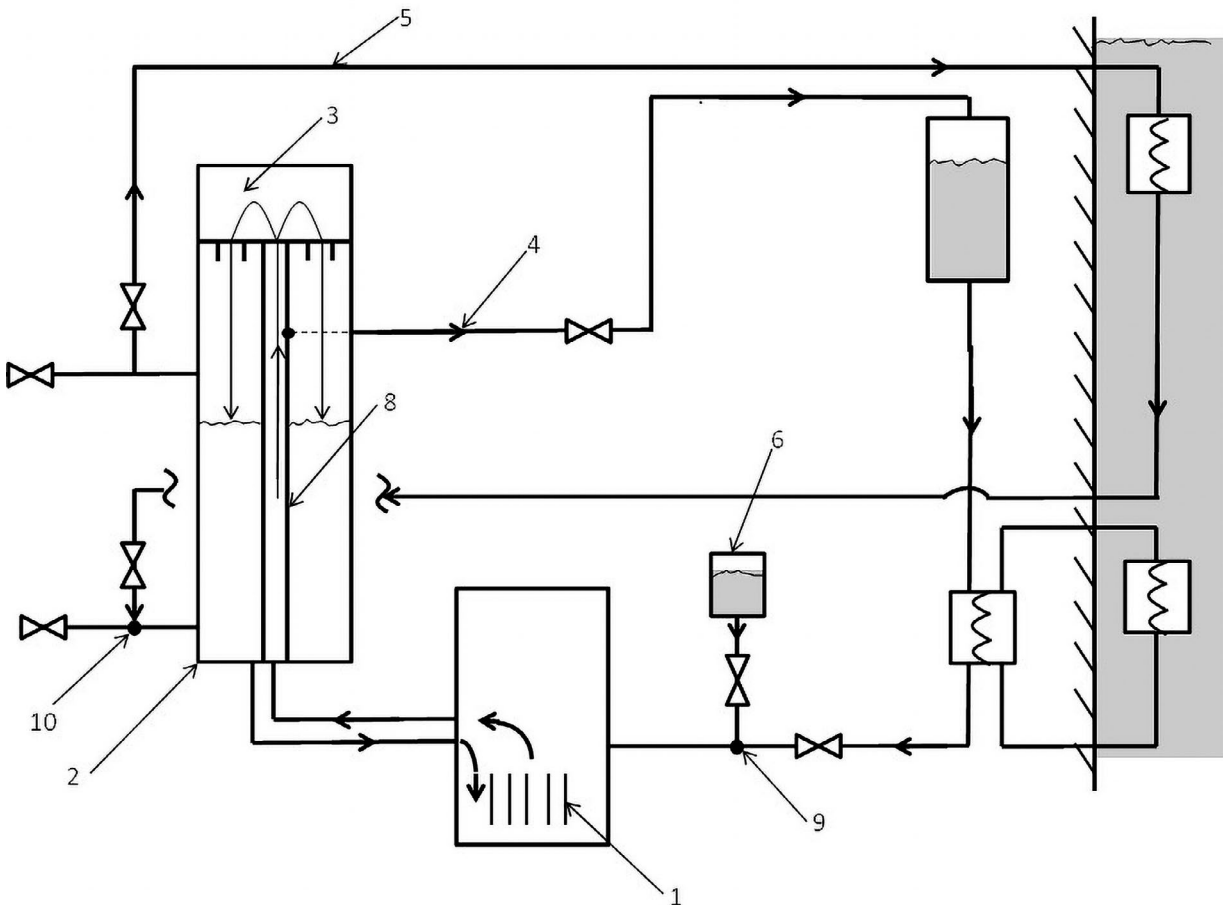


Рис. 1. Схема контурів ПЦ SMR-160 [2]: 1 – активна зона реактора; 2 – ПГ; 3 – компенсатор тиску; 4 – СПР 1; 5 – СПР 2; 6 – СППАЗ; 7 – захисна оболонка; 8 – міжконтурна теча за ПГ (L1); 9 – міжконтурна теча в СПР 1 – СППАЗ (L2); 10 – теча в СПР 2 (L3)

$$K_{11}(\bar{y}_o) \cdot \delta P_R + K_{12}(\bar{y}_o) \cdot \delta P_g + K_{13}(\bar{y}_o) \cdot \delta G_1 + K_{14}(\bar{y}_o) \cdot \delta G_2 + K_{15}(\bar{y}_o) \cdot \delta G_3 = 0, \quad (13)$$

$$K_{16}(\bar{y}_o) \cdot \delta P_R + K_{17}(\bar{y}_o) \cdot \delta P_g + K_{18}(\bar{y}_o) \cdot \delta G_1 + K_{19}(\bar{y}_o) \cdot \delta G_2 + K_{20}(\bar{y}_o) \cdot \delta G_3 = 0, \quad (14)$$

$$K_{21}(\bar{y}_o) \cdot \delta P_R + K_{22}(\bar{y}_o) \cdot \delta P_g + K_{23}(\bar{y}_o) \cdot \delta G_1 + K_{24}(\bar{y}_o) \cdot \delta G_2 + K_{25}(\bar{y}_o) \cdot \delta G_3 = 0, \quad (15)$$

де $\bar{y}_o$ – визначальні параметри умов міжконтурної ТГН (7) у встановленому режимі.

Після перетворень рівнянь (11)–(15) отримаємо критерій та умови ТГН в активній зоні реактора:

$$K_s(K_1, \dots, K_{25}, F_{L1}, F_{L2}, F_{L3}) = \frac{\delta P_R}{\delta G_1} > 0. \quad (16)$$

Таким чином, при ВП RG у загальному випадку необхідні додаткові дії оперативного персоналу з управління аварійного забезпечення умов міжконтурної теплогідродинамічної стійкості (ТГС):

$$K_s(K_1, \dots, K_{25}, F_{L1}, F_{L2}, F_{L3}) < 0. \quad (17)$$

Аналіз управління аваріями ВП RG в умовах ТГН

Приклади можливих сценаріїв умов ТГС/ТГН в SMR-160 в окремому випадку флуктуаційного збільшення тиску в реакторі ($\uparrow \delta P_R$) представлені на рис. 2. Наслідком збільшення δP_R може бути збільшення витрат в течах L1, L2, L3 ($\uparrow \delta G_{L1}$, $\uparrow \delta G_{L2}$, $\uparrow \delta G_{L3}$); які, з одного боку, збільшують напори в підйомних ділянках контурів ПЦ ($\uparrow \Delta \rho_1$, $\uparrow \Delta \rho_2$), а з іншого боку – збільшують втрати тиску на гідравлічний опір в опускних ділянках ПЦ ($\uparrow \Delta \rho_3$).

Перший з указаних ефектів ($\uparrow \Delta \rho$) визначає відносне збільшення витрати в активній зоні ($\uparrow \delta G_1$), а другий ефект ($\uparrow \Delta P$) – відносне зниження ($\downarrow \delta G_2$).

Таким чином, умови ТГС/ТГН визначаються переважанням вказаних ефектів на сумарну зміну δG_1 (див. рис. 2) та залежать від: конструкційно-технічних параметрів контурів ПЦ; термодинамічного стану теплоносія/охолоджувача; умов тепло- і масообміну в реакторі, ПГ та теплообмінниках СПР1, СПР2; розмірів теч.

У проектах SMR-160 передбачені автоматичні режими спрацювання ПСБ та управління аваріями. У випадку виникнення негативних наслідків ТГН (наприклад, високоамплітудні коливання рівня те-

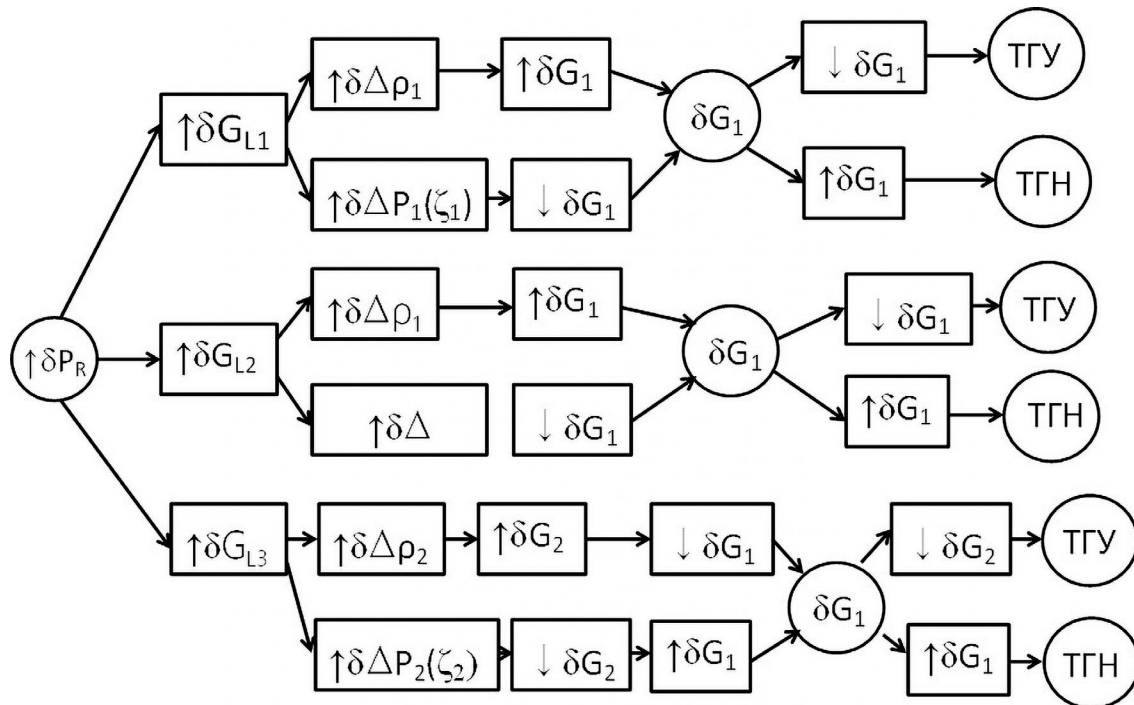


Рис. 2. Можливі сценарії умов ТГС/ТГН ВП RG в SMR-160

плоносія в реакторі) необхідно обґрунтувати та запровадити ефективні стратегії управління аваріями при міжконтурній ТГН.

Висновки

1. Для об'єктивної оцінки безпеки ММР з контуром природньої циркуляції пасивних систем безпеки необхідно враховувати можливість виникнення умов міжконтурної теплогідродинамічної нестійкості, яка супроводжується високоамплітудними коливаннями рівня та тиску в активній зоні реактора.

2. Запропонований метод визначення критеріїв та умов виникнення ТГН в умовах аварій з міжконтурними течами в модульному реакторі SMR-160 заснований на моделюванні впливу флуктуаційних відхилень визначальних гідродинамічних параметрів на умови міжконтурної ТГН. У загальному випадку за умови міжконтурної ТГН необхідні додаткові дії оперативного персоналу для управління аваріями в SMR-160.

3. З урахуванням можливих ненавмисних помилкових дій персоналу рівень безпеки модульних реакторів SMR-160 може бути значно нижче проєктних оцінок. Доцільний і в подальшому розвиток обґрунтування та запровадження ефективних стратегій управління аваріями в умовах міжконтурної ТГН пасивних систем безпеки модульних реакторів SMR-160.

Список використаної літератури

1. Kaiser J. C. Empirical risk analysis of severe reactor accidents in nuclear power plants after Fukushima / Jan Christian Kaiser // *Science and Technology of Nuclear Installation*. – 2012. – doi.org/10.1155/2014/469890.
2. Advances in small modular reactor technology developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2020 Edition. – Vienna : IAEA, 2020. – 343 p. – Available at: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf.
3. Small Modular Reactor: Challenges and Opportunities. NEA No. 7560. – OECD, 2021. – 52 p.
4. Technology roadmap for small modular reactor deployment. IAEA Nuclear Energy Series. NR-T-1.18. – Vienna : IAEA, 2021. – 109 p.
5. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. Т. 2 / под ред. акад. РАН А. А. Саркисова. – Москва : Академ-Принт, 2015. – 387 с.
6. STD-ES-03-40. International reactor innovative and secure. Final technical progress report. Westinghouse Electric Company, LLC, 2003.
7. Ingersoll D. T. NuScale Small Modular Reactor for Co-generation of electricity and water / D. T. Ingersoll, Z. J. Houghton, R. Bromm, C. Desportes // *Desalination*. – 2014. – Vol. 340. – doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.023.
8. NuScale Final Safety Analysis Report. NuScale Standard Plant Design Certification Application. Chapter 5. Reactor Coolant System and Connecting Systems. Part 2. Tier 2. Revision 5. – 2020.
9. NuScale Final Safety Analysis Report. NuScale Standard Plant Design Certification Application. Chapter 18. Humans Factors Engineering. Part 2. Tier 2. Revision 5. – 2020.
10. NuScale Final Safety Analysis Report. NuScale Standard Plant Design Certification Application. Chapter 15. Transient and Accident Analyses. Part 2. Tier 2. Revision 5. – 2020.
11. NuScale Final Safety Analysis Report. NuScale Standard Plant Design Certification Application. Chapter 19. Probabilistic risk assessment and server accident. Part 2. Tier 2. Revision 5. – 2020.
12. Antonyuk N. I. Excitation of thermoacoustic oscillations in a heated channel / N. I. Antonyuk, V. A. Gerliga, V. I. Skalozubov // *Journal of Engineering Physics*. – 1990. – № 59 (4). – P. 1323-1328.
13. Modeling method of conditions for reliability critical hydraulic impacts on pumps of thermal and nuclear power plants / V. Skalozubov, D. Pirkovskiy, Yu. Komarov, I. Kozlov // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2017. – № 40 (4). – P. 74-79.
14. Skalozubov V. Water Hammers in transonic modes of steam-liquid flows in NPP / V. Skalozubov D. Pirkovskiy, Yu. Komarov // *Nuclear and Radiation Safety*. – 2019. – № 2 (82). – P. 43-46.
15. Skalozubov V. Analysis of Reliability Impact Conditions of WWER-1000 NPP Active Systems / V. Skalozubov, Yu. Komarov, D. Pirkovskiy // *Nuclear and Radiation Safety*. – 2019. – № 1 (81) – P. 42-45.

V. I. Skalozubov, O. A. Dorozh, D. S. Bunde, O. S. Suhomlinov, S. S. Prokofiev

Odesa National Polytechnic University, 1, Shevchenko ave, Odesa, 65044, Ukraine

Safety and Accident Management Issues in SMR-160 Small Modular Reactors Under Conditions of Thermal Hydrodynamic Instability

Accident management in small modular reactors (SMR) is carried out by natural circulation circuits of passive safety systems, which, taking into account the Fukushima accident, determines the grounds for the need to classify SMRs as nuclear power plants of a new safety generation (3+). However, for a reasoned adoption of such a decision, additional studies of the reliability of accident management by passive safety systems are necessary.

Based on the analysis of the known results of the SMR safety analysis, it was established that for an objective assessment of the safety of the specified reactors with a natural circulation circuit of passive safety systems, it is necessary to take into account the possibility of the occurrence of inter-circuit thermal hydrodynamic instability (THI), which is accompanied by high-amplitude fluctuations in the coolant level and pressure in the core of the SMR. A new method for determining the criteria and conditions for the occurrence of THI in the conditions of accidents with inter-circuit leaks in the SMR-160 small modular reactor has been developed, which is based on modeling the influence of fluctuation deviations of the determining hydrodynamic parameters on the conditions of the inter-circuit THI. Based on the results obtained, it was established that in general cases, under the condition of inter-circuit THI, additional actions of operational personnel are required to manage accidents in SMR-160. Taking into account possible unintentional erroneous actions of personnel, the safety level of SMR-160 modular reactors may be significantly lower than the design estimates. Thus, the need to qualify and implement modernized effective accident management strategies in the conditions of inter-circuit THI of passive safety systems of SMR-160 small modular reactors has been proven.

Keywords: safety, small modular reactors, accident management.

References

1. Kaiser J. C. (2012). Empirical risk analysis of severe reactor accidents in nuclear power plants after Fukushima. *Science and Technology of Nuclear Installation*. doi.org/10.1155/2014/469890.
2. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2020 Edition. Vienna: IAEA. Available at: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf.
3. NEA No. 7560. *Small Modular Reactor: Challenges and Opportunities*. OECD, 2021, 52 p.
4. IAEA (2021). *Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment*. IAEA Nuclear Energy Series. NR-T-1.18. Vienna: IAEA, 109 p.
5. Sarkisov A. A. (ed.) (2015). *Atomnyye stantsii maloy moshchnosti: novoye napravleniye razvitiya energetiki* [Low-power nuclear power plants: a new direction for energy development]. Moscow: Akadem-Prynt, 387 p. (in Rus.)
6. STD-ES-03-40. *International reactor innovative and secure*. Final technical progress report. Westinghouse Electric Company, LLC, 2003.
7. Ingersoll D. T., Houghton Z. J., Bromm R., Desportes C. (2014). NuScale Small Modular Reactor for Co-generation of electricity and water. *Desalination*, vol. 340. doi.org/10.1016/j.desal.2014.02.023.
8. NuScale Final Safety Analysis Report. NuScale Standard Plant Design Certification Application. Chapter 5. Reactor Coolant System and Connecting Systems. Part 2. Tier 2. Revision 5. July 2020.
9. NuScale Final Safety Analysis Report. NuScale Standard Plant Design Certification Application. Chapter 18. Humans Factors Engineering. Part 2. Tier 2. Revision 5. July 2020.
10. NuScale Final Safety Analysis Report. NuScale Standard Plant Design Certification Application. Chapter 15. Transient and Accident Analyses. Part 2. Tier 2. Revision 5. July 2020.
11. NuScale Final Safety Analysis Report. NuScale Standard Plant Design Certification Application. Chapter 19. Probabilistic risk assessment and server accident. Part 2. Tier 2. Revision 5. July 2020.
12. Antonyuk N. I., Gerliga V. A., Skalozubov V. I. (1990). Excitation of thermoacoustic oscillations in a heated channel. *Journal of Engineering Physics*, vol. 59 (4), pp. 1323–1328.
13. Skalozubov V., Pirkovskiy D., Komarov Yu., Kozlov I. (2017). Modeling method of conditions for reliability critical hydraulic impacts on pumps of thermal and nuclear power plants. *Problems of Atomic Science and Technology*, vol. 40 (4), pp. 74–79.
14. Skalozubov V., Pirkovskiy D., Komarov Yu. (2019). Water Hammers in transonic modes of steam-liquid flows in NPP. *Nuclear and Radiation Safety*, vol. 2 (82), pp. 43–46.
15. Skalozubov V., Komarov Yu., Pirkovskiy D. (2019). Analysis of Reliability Impact Conditions of WWER-1000 NPP Active Systems. *Nuclear and Radiation Safety*, vol. 1 (81), pp. 42–45.

Надійшла / Received 18.07.2024

Рекомендована до друку / Accepted 24.12.2024

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 $6 \text{ МВт} \cdot \text{д/кг U}$ 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 $11,25 \text{ МВт} \cdot \text{д/кг U}$ (режим 1);

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

Рівень вигорання ОЯП $\sim 11,25 \text{ МВт} \cdot \text{д/кг U}$ 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;

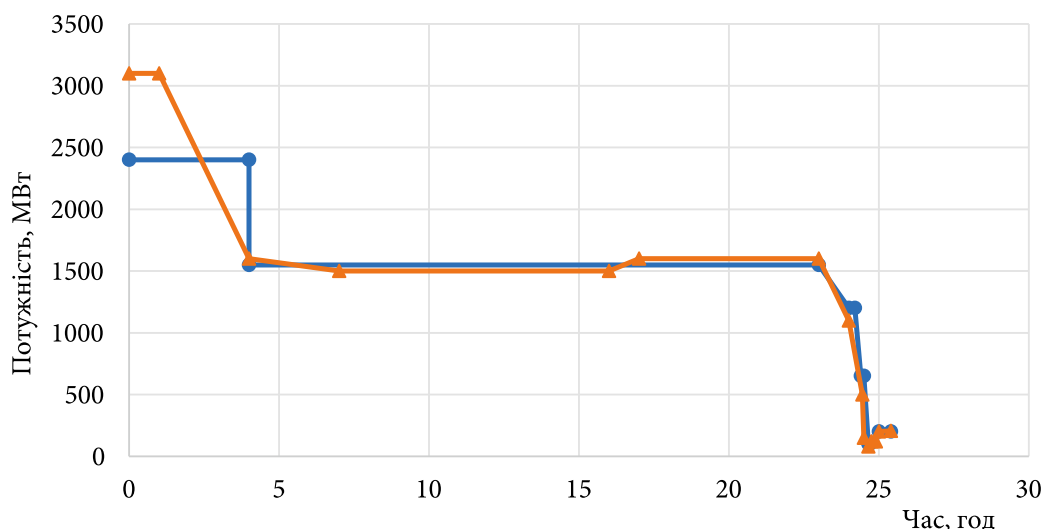


Рис. 1. Графіки фактичного (▲) й модельного (●) навантаження РБМК-1000 ЧАЕС-4

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» зупину РУ. Також до цієї групи входять ^{144}Pr , ^{97}Nb , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{97}Zr , ^{151}Pr , ^{99}Mo , ^{144}Ce .

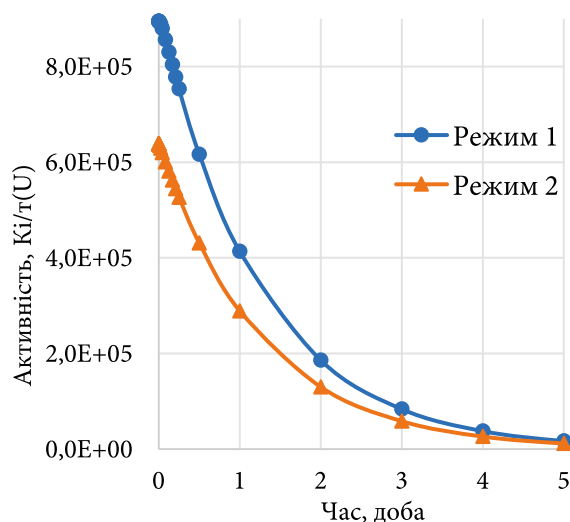
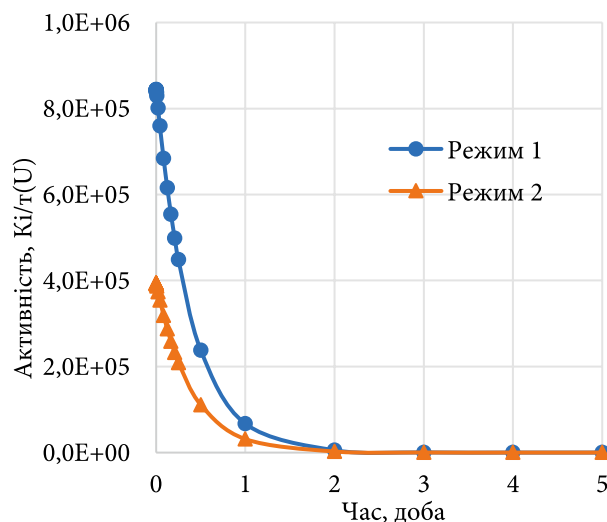
На рис. 2–5 наведено графічні залежності в часі зміни питомої активності відповідно для ^{133}I , ^{135}I , ^{97}Nb і ^{88}Kr після аварії на РБМК-1000.

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 ізотопів.

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

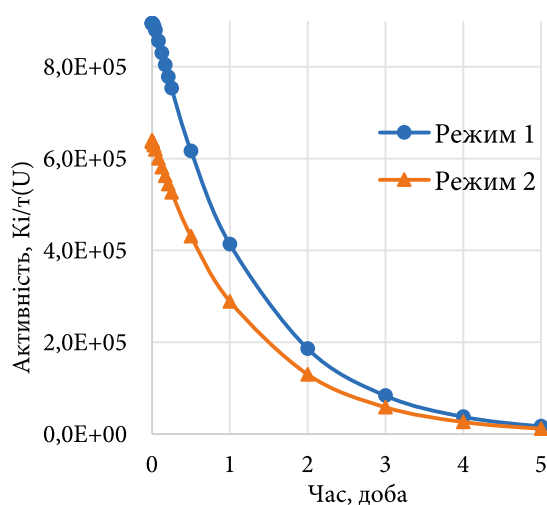
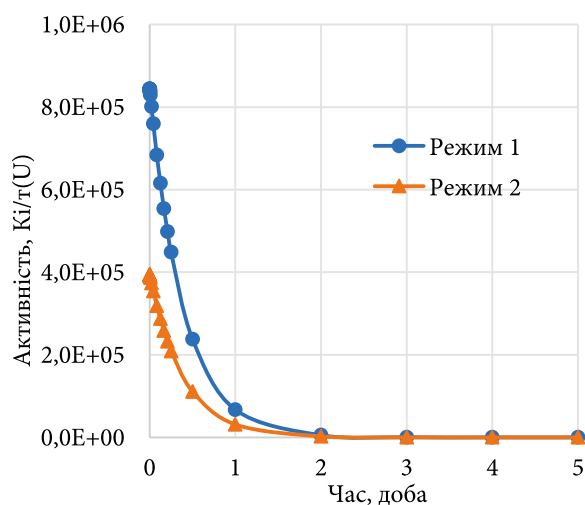
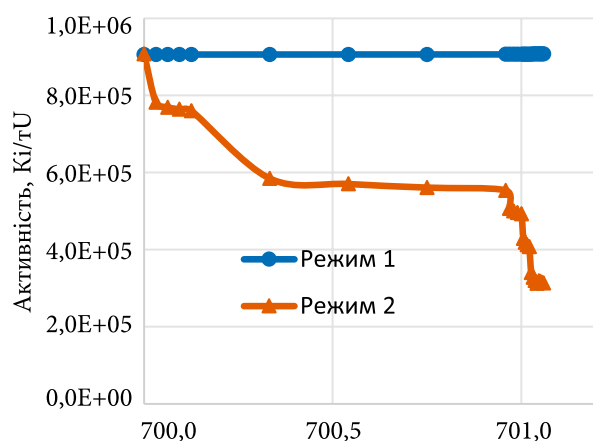
Рис. 4. Пітома активність ^{97}Nb після аваріїРис. 5. Пітома активність $^{88}\text{Kг}$ після аварії

Рис. 6. Інтегральна активність ядерного палива напередодні аварії

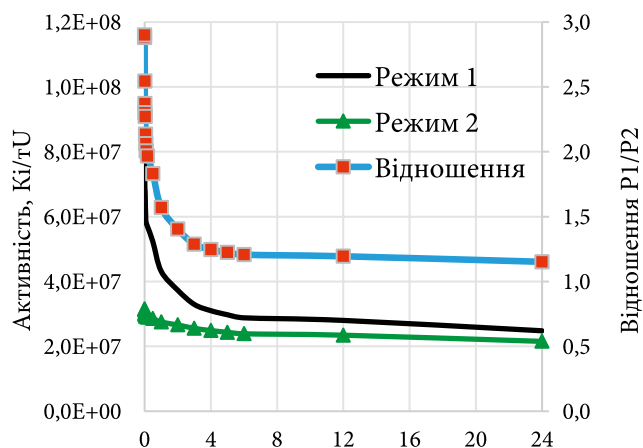


Рис. 7. Інтегральна активність ядерного палива після аварії

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/oranramp/scale-code-system>

M. S. Yurov¹, V. I. Borysenko²

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37, Beresteyskiy 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

М. М. Талерко¹, Т. Д. Лев¹, А. В. Носовський¹, В. М. Рудько¹, В. М. Піскун¹, А. М. Новіков¹,
І. П. Шедеменко¹, О. В. Блохіна²

¹ Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

² Філія ВП «Атомпроєктінжиніринг» АТ «НАЕК «Енергоатом», вул. Сім'ї Прахових, 6, Київ, 01033, Україна

Розрахунок розмірів санітарно-захисної зони Хмельницької АЕС з урахуванням будівництва енергоблоків № 5, 6 з реакторною установкою AP1000

Ключові слова:

санітарно-захисна зона,
зона спостереження,
АЕС, реакторна установка
AP1000,
проектна аварія,
умови нормальної експлуатації,
ефективна доза опромінення

Виконано оцінювання розмірів санітарно-захисної зони (СЗЗ) Хмельницької АЕС (ХАЕС) з урахуванням потенційного впливу запланованих до будівництва енергоблоків № 3, 4 з реактором ВВЕР-1000 та № 5, 6 з реактором AP1000 виробництва Westinghouse Electric Company. Розрахунки проводились з урахуванням вимог стандарту СОУ НАЕК 023:2014 «Порядок встановлення розмірів санітарно-захисної зони АЕС». Розміри СЗЗ ХАЕС визначалися на основі неперевищення певних рівнів опромінення на межі СЗЗ для умов нормальної експлуатації, порушень нормальної експлуатації та максимальної проектної аварії. Показано, що визначальним для встановлення розмірів СЗЗ є неперевищення критерію за ефективною дозою опромінення критичної вікової групи «1 рік» в умовах максимальної проектної аварії на енергоблоках з реакторами ВВЕР-1000. Розрахована межа СЗЗ ХАЕС з урахуванням потенційного впливу всіх енергоблоків являє собою еліпсоподібну фігуру з довжинами піввісей 2600 і 2200 м. Розраховані межі СЗЗ ХАЕС майже повністю укладаються в межі, що існують зараз (коло радіусом 2700 м). Зроблено висновок про недоцільність перегляду розмірів СЗЗ ХАЕС після введення експлуатацію нових блоків № 3, 4 з реакторами ВВЕР-1000 та № 5, 6 з реакторами AP1000.

Вступ

Принципи зонування території навколо АЕС визначаються Законом України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [1]. Стаття 45 цього закону вимагає, що «у місцях розташування ядерної установки чи об'єкта, призначеного для поводження з радіоактивними відходами, встановлюються санітарно-захисна зона і зона спостереження». Розміри й межі санітарно-захисної зони (СЗЗ) та зони спостереження (ЗС) визначаються у проєкті згідно з нормами та правилами у сфері використан-

ня ядерної енергії, а також узгоджуються з органом державного регулювання ядерної та радіаційної безпеки.

Основними документами в Україні, що визначають норми для встановлення розмірів СЗЗ та ЗС АЕС, є «Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України» [2], «Загальні положення безпеки атомних станцій» [3], «Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)» [4] та «Вимоги з безпеки до вибору майданчика для розміщення атомної станції» [5]. Детальний огляд практики застосування положень вказаних законодавчих і нормативних

© М. М. Талерко, Т. Д. Лев, А. В. Носовський, В. М. Рудько, В. М. Піскун,
А. М. Новіков, І. П. Шедеменко, О. В. Блохіна. Ліцензія CC BY 4.0

документів України щодо СЗЗ АЕС, а також аналіз їх з точки зору узгодження законодавства України у сфері радіаційної безпеки з регулюючими вимогами Євросоюзу, зроблено в [6].

Розрахунки розмірів та меж СЗЗ та ЗС АЕС України мають виконуватися згідно зі стандартом СОУ НАЕК 023:2014 [7] та документа НП 306.2.173-2011 [8], затвердженого наказом Держатомрегулювання України та МОЗ України, відповідно.

Станом на зараз на Хмельницькій АЕС (ХАЕС) працюють два енергоблоки № 1 та 2 з реакторами ВВЕР-1000 загальною потужністю 2000 МВт. У квітні 2024 р. Кабінет Міністрів України схвалив та направив до Верховної Ради України законопроект, який передбачає ухвалення рішення про розміщення, проектування та будівництво енергоблоків № 3 та 4 на ХАЕС із реакторами ВВЕР-1000/466Б. Крім того, згідно з «Меморандумом про взаєморозуміння» між ДП «Енергоатом» та Westinghouse Electric Company, підписаним 31.08.2021 р., на майданчику ХАЕС передбачається будівництво двох нових енергоблоків № 5, 6 із реакторними установками AP1000 покоління III, а також одиничною електричною потужністю близько 1100 МВт і тепловою потужністю 3400 МВт.

Метою статті є визначення розмірів СЗЗ ХАЕС з урахуванням планів будівництва нових енергоблоків. Згідно з вимогами документа [7], розрахунок усіх функцій, які порівнюються зі встановленими критеріями визначення розмірів СЗЗ АЕС, повинен проводитися з урахуванням внесків від усіх джерел радіоактивних викидів на майданчику АЕС. Тому в подальших розрахунках враховувались можливі внески всіх шести (діючих та запланованих) енергоблоків ХАЕС у формування радіоактивного забруднення атмосфери, випадань на підстильну поверхню та відповідних доз опромінення населення.

Критерії визначення розмірів СЗЗ АЕС

Відповідно до [7] критеріями визначення розмірів СЗЗ АЕС є дотримання неперевищення певних рівнів опромінення на межі СЗЗ та за її межами. Зазначені рівні опромінення встановлені окремо для нормальної експлуатації, а також для проектних аварій і порушень нормальної експлуатації.

За нормальної експлуатації не повинна перевищуватись квота ліміту дози для газо-аерозольного викиду АЕС, установлена НРБУ-97 [4], а саме — річна ефективна доза опромінення населення за рахунок усіх шляхів формування дози за межами СЗЗ не по-

винна перевищувати 40 мкЗв (п. 6.1 [7]). Неперевищення зазначеної дози опромінення повинно бути забезпечено для всіх референтних віків, зазначених у НРБУ-97, та для всіх відстаней, що дорівнюють або перевищують відстані від місць можливих викидів до меж СЗЗ.

В умовах порушень нормальної експлуатації ефективні дози опромінення населення за межами СЗЗ не повинні перевищувати 40 мкЗв за 120 діб після такого випадку (п. 7.6 [7]).

При проектних аваріях, згідно з пп. 7.1–7.2 [7], дози опромінення населення за період 14 діб на межі СЗЗ та за її межами не повинні перевищувати значення рівнів безумовної виправданості, наведених у таблиці Д.7.1 НРБУ-97, а саме:

- а) ефективна доза: діти — 10 мЗв; дорослі — 20 мЗв;
- б) доза в щитовидній залозі: діти — 100 мЗв; дорослі — 300 мЗв;
- в) доза в шкірі: діти — 300 мЗв; дорослі — 500 мЗв.

Загальний опис процедур та методів розрахунку

Відповідно до [7] при встановленні розмірів СЗЗ АЕС розглядаються три типи сценаріїв опромінення населення: 1) за нормальної експлуатації АЕС, 2) в умовах порушень нормальної експлуатації, 3) в умовах проектних аварій.

Розрахунок ефективної дози опромінення населення проводиться з урахуванням інгаляційного надходження радіонуклідів та зовнішнього опромінення від хмари викиду, включно з внеском за рахунок вторинного вітрового підйому випадань із поверхні землі; зовнішнього опромінення від випадань радіонуклідів на поверхню ґрунту (для всіх типів сценаріїв); а також внутрішнього опромінення від перорального надходження радіонуклідів (окрім сценаріїв проектних аварій). У разі проектних аварій додатково розраховуються еквівалентні дози в щитовидній залозі та шкірі.

Значення дози опромінення населення розраховується для періоду 1 рік (за нормальної експлуатації АЕС), 120 діб (у разі порушень нормальної експлуатації) та 14 діб (в умовах проектних аварій).

Головними елементами загальної схеми розрахунку ефективних (еквівалентних) доз опромінення населення згідно з вимогами [7] є:

- 1) Гауссова модель атмосферного перенесення радіонуклідів та їхнє осадження на підстильну поверхню [9, 10];

2) модель розрахунку міграції радіонуклідів у харчових ланцюгах; у документі [7] використовується підхід, який у цілому відповідає радіоекологічній моделі ECOSYS-87 [11, 12];

3) дозиметричні моделі; значення доз зовнішнього та внутрішнього опромінення людини розраховуються з використанням дозиметричних коефіцієнтів, заданих згідно з публікаціями [13, 14].

Метеорологічна інформація, використана для визначення розмірів СЗЗ ХАЕС

Метеорологічна інформація, необхідна для розрахунків полів радіоактивного забруднення повітря та земної поверхні в умовах нормальної експлуатації з використанням моделі атмосферного перенесення радіонуклідів, була отримана з даних метеорологічних спостережень у районі розташування ХАЕС за період 2013–2023 рр. Вимірювання проводилися за допомогою автоматичної погодної станції AWS-310 фірми Vaisala (Фінляндія), встановленої на метеорологічному майданчику (територія ЦПК АСКРО) ХАЕС [15, 16].

Для розрахунків розповсюдження радіоактивних викидів в умовах нормальної експлуатації АЕС за допомогою Гауссової моделі атмосферного перенесення необхідно використовувати середньокліматичні значення повторюваності метеорологічних параметрів, що визначають розповсюдження домішок в атмосфері. З цією метою, за даними вимірювань,

була розрахована тривимірна матриця повторюваності метеорологічних умов, які характеризуються різними значеннями напрямку вітру (румбу) (16 категорій), швидкості вітру (8 категорій) та класу стійкості атмосфери (6 категорій стійкості атмосфери згідно з класифікацією Пасквілла — Гіффорда). Крім того, для сукупності метеорологічних умов, що відповідають кожному елементу матриці повторюваності, було обчислено значення параметра вологого вимивання радіонукліда з атмосфери.

Узагальнені результати аналізу повторюваності напрямків вітру та розподіл класів стійкості атмосфери представлені на рис. 1. Сполучення метеорологічних умов із найбільшою повторюваністю – категорія стійкості атмосфери D із західним напрямком вітру (10,4 %).

Розрахунки розповсюдження короточасних викидів в умовах порушень нормальної експлуатації та проектних аварій проводилося за стаціонарних метеорологічних умов, які характеризувалися заданими значеннями категорії стійкості атмосфери та швидкості вітру (за постійного його напрямку протягом усього періоду переносу). Усі розрахунки проводилися в умовах існування дощових опадів із постійною інтенсивністю $10,7 \text{ мм год}^{-1}$. Це значення забезпечує вимоги [7] щодо вибору величини параметра вологого вимивання при моделюванні атмосферного розповсюдження радіоактивних викидів в умовах радіаційних аварій.

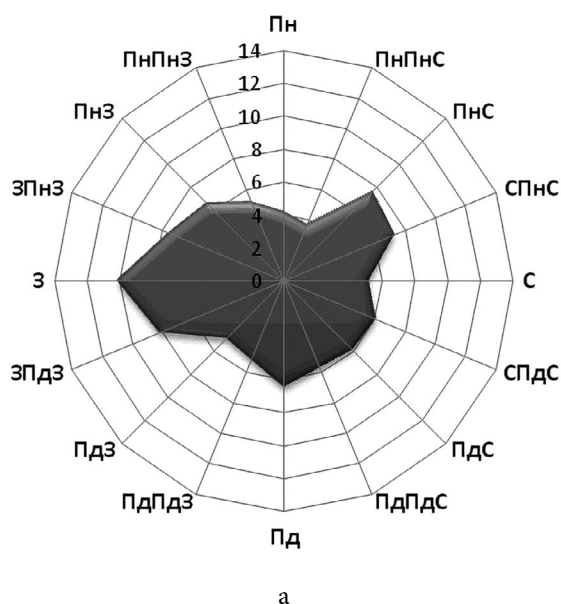


Рис. 1. Діаграма повторюваності (%) напрямків вітру по 16 румбах (а) та повторюваність класів стійкості атмосфери (б) за період 2013–2023 рр.

Оцінки викидів радіонуклідів з енергоблоків ХАЕС, використані для розрахунків

Умови нормальної експлуатації. Викиди з шести енергоблоків ХАЕС в умовах нормальної експлуатації було параметризовано як суму 11 модельних джерел, що включають:

1–3 — викиди з вентиляційних труб реакторних відділень енергоблоків № 1 і 2 з реакторами ВВЕР-1000 та спецкорпусу; для подальших розрахунків було використано фактичні значення викидів, усереднені за останні 10 років експлуатації об'єкта [17];

4–7 — проектні значення викидів з енергоблоків № 3 та 4 ХАЕС із реакторами ВВЕР-1000 [18]; приймалося, що основними джерелами радіоактивних викидів є викиди з вентиляційних труб реакторних відділень (висота викиду 100 м) та ежекторів турбоагрегатів (висота викиду 0 м);

8–11 — проектні значення викидів з енергоблоків № 5 та 6 ХАЕС із реакторами АР1000 [19–21]; викиди в атмосферу в умовах нормальної експлуатації відбуваються через дві вентиляційні труби: головну вентиляційну трубу (ефективна висота 81,6 м) та вентиляційну трубу турбінного відділення (ефективна висота 39,8 м) [21].

У подальших розрахунках розмірів СЗЗ було враховано відносну відстань між основними джерелами викиду радіонуклідів в атмосферу на майданчику АЕС. Відстань між крайніми джерелами — вентиляційними трубами енергоблоків № 1 та 6 — становить 1 213 м.

На рис. 2 наведено значення активності окремих нуклідів ^3H , ^{14}C , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs та груп радіоїодів, інертних радіоактивних газів (ІРГ) та довгоіснуючих нуклідів (ДІН), сумовані за діючими енергоблоками № 1 та 2 (включно із викидами з вентиляційної труби спецкорпусу); № 3 та 4, а також № 5 та 6. За окремими нуклідами існують суттєві відмінності в оцінках викидів з різних енергоблоків в умовах їхньої нормальної роботи, які визначають результати подальших розрахунків і, відповідно, відносний внесок викидів кожного енергоблоку в розрахункові значення ефективних доз для населення. Головними з них є:

1) сумарна активність радіоїодів за проектними даними для енергоблоків № 3 та 4 з реакторами ВВЕР-1000 на порядок більше, ніж проектні викиди для реакторів АР1000 і майже на 3 порядки більше, ніж дані фактичних викидів для енергоблоків № 1 і 2;

2) сумарна активність ІРГ за проектними даними для енергоблоків № 3 та 4 більше, ніж на 2 порядки

перевищує відповідні значення для енергоблоків № 1, 2 та № 5, 6;

3) проектні оцінки викидів ^{14}C для енергоблоків з реактором АР1000 майже на шість порядків більше за аналогічні проектні оцінки для енергоблоків з реакторами ВВЕР-1000;

4) значні розбіжності в оцінках активності аерозольних викидів, зокрема для ^{90}Sr .

Порушення умов нормальної експлуатації.

У розглянутих документах, включаючи документацію для енергоблоку № 2 ХАЕС [22], для енергоблоків № 3, 4 ХАЕС [18, 23] та наявну документацію щодо енергоблоків з реактором АР1000 [19–21, 24, 25], практично відсутня як інформація про можливі сценарії таких випадків, що призводять до додаткових радіоактивних викидів в атмосферу, так і результати оцінок наслідків їхнього впливу для навколишнього середовища та здоров'я населення. Також у [7] та інших розглянутих документах відсутні конкретні вказівки щодо визначення параметрів радіоактивних викидів (радіонуклідного складу, активності викиду, його тривалості) для таких випадків.

Тому в рамках цієї роботи такий сценарій побудовано на основі підходу, використаного в [21]. Було прийнято, що за порушень умов нормальної експлуатації на будь-якому з енергоблоків № 1–6 відбувається короткочасний викид через головну вентиляційну трубу енергоблоку (тривалість прийнято рівною 30 хв). Радіонуклідний склад викиду повністю відповідає викидам за нормальної експлуатації, а його активність дорівнює 1/12 сумарної активності річних викидів, тобто значенням викидів за нормальної експлуатації протягом одного місяця.

Проектні аварії. Для енергоблоків ХАЕС із реакторами ВВЕР-1000 розрахунки виконувались для максимальної проектної аварії (МПА) та аварії з відривом кришки колектора парогенератора. Як МПА розглянуто сценарій із розривом головного циркуляційного трубопроводу на вході в реактор із двостороннім витоком теплоносія. Величини викидів основних дозоутворюючих радіонуклідів для всіх чотирьох енергоблоків ХАЕС із реакторами ВВЕР-1000 вважались однаковими і задавались згідно з [26]. Тривалість викиду в навколишнє середовище приймалась рівною 8 год [18].

Для енергоблоків з реакторами АР1000 розглянуто наслідки проектної аварії з втратою теплоносія після повного розриву головного трубопроводу з подальшим розплавленням палива та частковим вики-

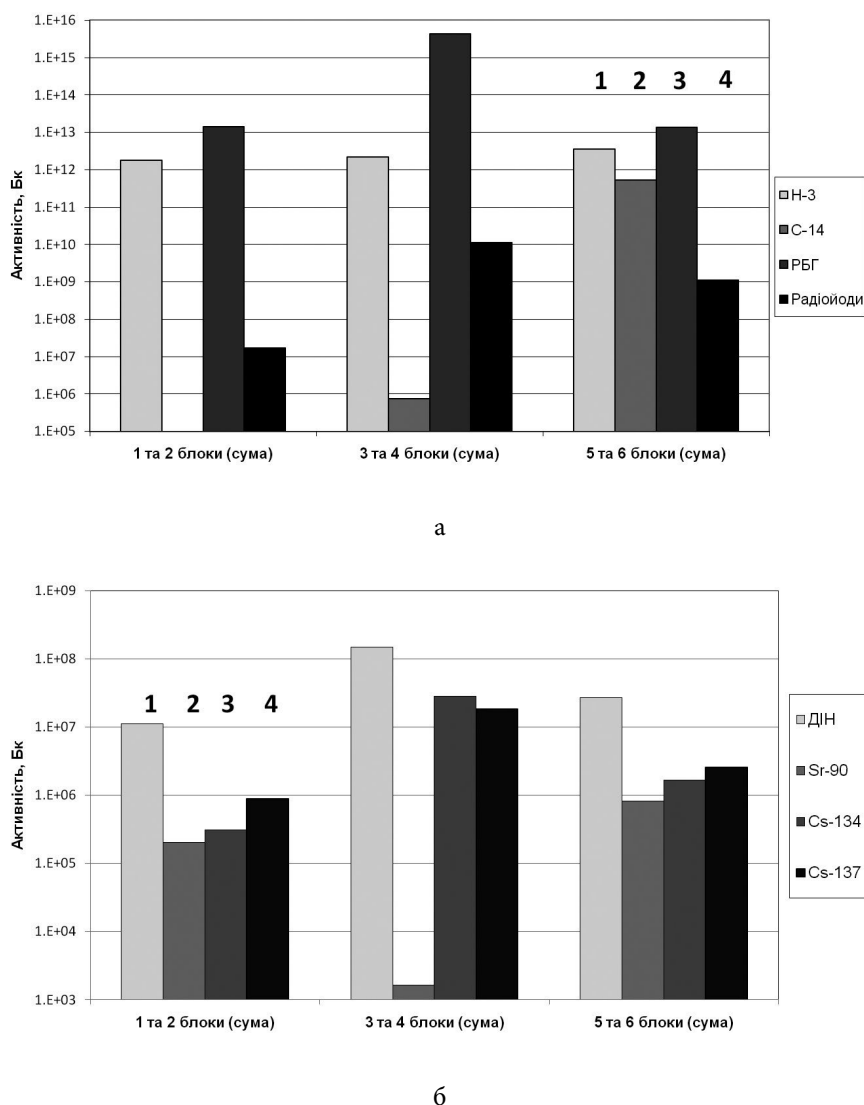


Рис. 2. Значення активності радіонуклідів у річних викидах за нормальної експлуатації об'єктів ХАЕС, які використовувались для моделювання атмосферного перенесення радіонуклідів;
а: 1 – ^3H , 2 – ^{14}C , 3 – РБГ, 4 – $^{131-135}\text{I}$; б: 1 – ДІН, 2 – ^{90}Sr , 3 – ^{134}Cs , 4 – ^{137}Cs

дом продуктів поділу в повітря реакторної будівлі [27]. Радіонуклідний склад та активність кожного з радіонуклідів у викиді в навколишнє середовище задавались відповідно до [20]. Тривалість викиду згідно з [20] задавалась 2 год.

Співвідношення активності у викиді між різними фізико-хімічними формами радіойодів $^{131-135}\text{I}$ для всіх сценаріїв задавалося рівним 95 % (аерозоль): 4,85 % (молекулярний): 0,15 % (органічний) [28]. Ефективна висота викиду консервативно приймалась 1 м.

Оцінки активності викиду для різних груп радіонуклідів в умовах проектних аварій, що розглядались, наведено на рис. 3.

Результати розрахунків розмірів СЗЗ ХАЕС

Умови нормальної експлуатації. У модельних розрахунках для умов нормальної експлуатації об'єктів на промайданчику ХАЕС було враховано одночасну дію всіх 11 модельних джерел радіоактивних викидів в атмосферу. Розраховувались поля середньорічної об'ємної питомої активності радіонуклідів у приземному шарі атмосфери, потік осадження радіонуклідів на підстильну поверхню, їхня активність у поверхневому шарі ґрунту, активність у продуктах харчування, а також дози опромінення населення за всіма шляхами. Результуючі поля всіх розрахункових

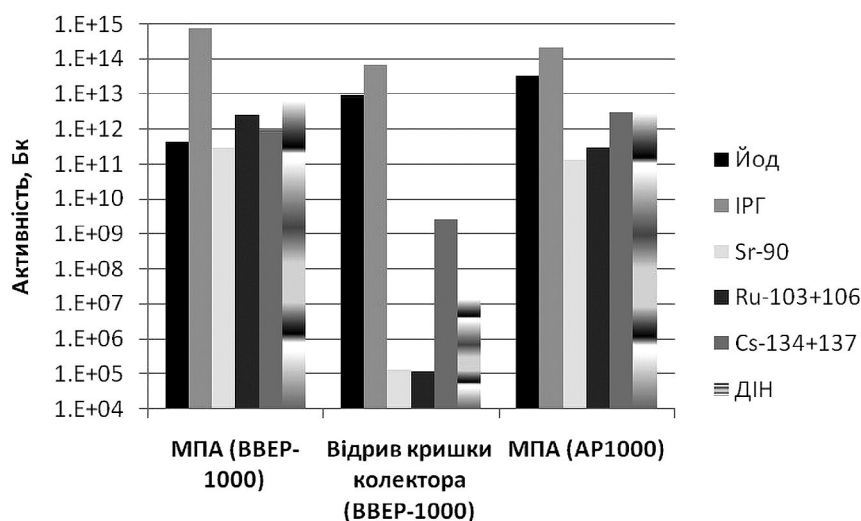


Рис. 3. Сценарії викидів радіонуклідів з енергоблоків ХАЕС за проектних аварій

величин визначалися сумуванням результатів, отриманих для кожного окремого джерела викиду. Усі величини обчислювались у вузлах регулярної сітки в декартовій системі координат, центр якої був вибраний у точці розташування вентиляційної труби енергоблоку № 4 ХАЕС. Розміри сітки задавались 6 × 6 км, крок сітки 50 м, кількість вузлів 121 × 121.

Отримано, що для викидів за нормальної експлуатації об'єктів на промайданчику ХАЕС критичною групою населення є вікова група «1 рік». Критерій неперевикнення дозового ліміту 40 мкЗв забезпечується при встановленні меж СЗЗ, контур яких показано на рис. 4. Залежно від напрямку (румбу) відстань встановленої таким чином границі СЗЗ від центру розрахункової області варіює в межах від 450 до 650 м.

Для всієї розрахункової області переважальний внесок у дозу опромінення дають викиди з енергоблоків № 3 і 4. Дози, обумовлені викидами з них, на порядок переважають дози від викидів з енергоблоків № 5 і 6 та на 2–3 порядки — дози від викидів діючих об'єктів — енергоблоків № 1 і 2 та спецкорпусу. При визначенні розмірів СЗЗ за дозовим критерієм для нормальної експлуатації енергоблоків № 5 і 6 опинилися за її межами (рис. 4), оскільки забезпечують його неперевикнення навіть у безпосередній близькості від джерела викиду.

Окремо для кожного енергоблоку основний відносний внесок в ефективну дозу опромінення референтної вікової групи «1 рік» дають: для енергоблоків № 1 та 2 та спецкорпусу (згідно з фактичними даними вимірювань) — тритій ^3H (понад 80 %); для енергобло-

ків № 3 та 4 з реакторами ВВЕР-1000 (згідно з проектними даними) — ІРГ (понад 99 %); для енергоблоків № 5 та 6 з реакторами АР1000 — ^{14}C (близько 87 % від загальної ефективної дози). На долю тритію та ІРГ припадає близько 8 та 3 % відповідно, а аерозольної компоненти викиду — 2 %. При цьому потрібно зауважити, що відносний внесок викидів з енергоблоків № 5 та 6 (згідно з проектними даними) в загальний баланс значень ефективної дози опромінення населення в межах розрахункової області є незначним.

Порушення нормальної експлуатації. Розрахунки параметрів радіоактивного забруднення та доз опромінення виконувались для стаціонарних метеорологічних умов у точках на осі факелу з кроком 50 м до максимальної відстані 3000 м від джерела. Для сукупності всіх розглянутих метеорологічних параметрів та властивостей підстильної поверхні для вибраного сценарію радіоактивного викиду в умовах порушення нормальної експлуатації енергоблоків з реактором АР1000 критерій по ефективній дозі виконується для всіх шести вікових категорій населення на відстанях 450 м від енергоблоку й більше. У випадку радіоактивного викиду в умовах порушення нормальної експлуатації енергоблоків № 3 і 4 з реактором ВВЕР-1000 неперевикнення дозового критерію забезпечується на відстанях 1000 м і більше.

Доза опромінення практично повністю формується за рахунок перорального шляху надходження радіонуклідів в організм людини. У найближчій зоні джерела (на відстанях до 1 км) відносний внесок $^{131}\text{I}+^{133}\text{I}$ в ефективну дозу становить 99,8 % для дітей 1 року

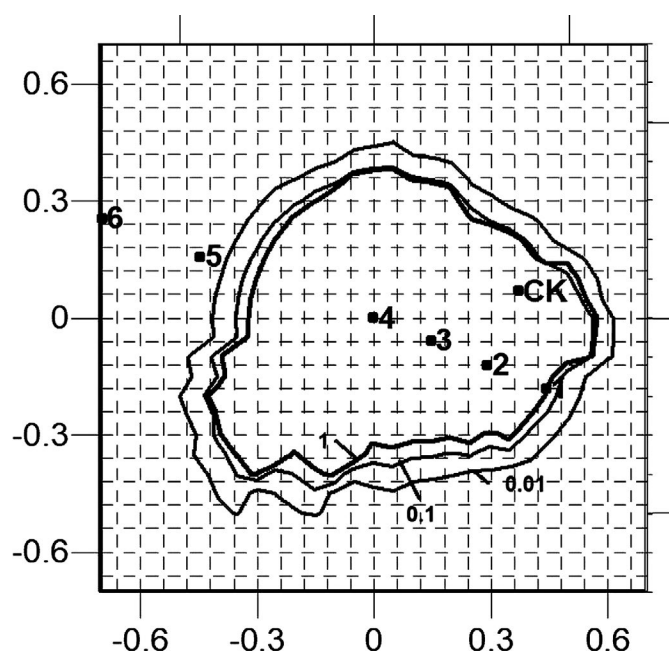


Рис. 4. Ізолінії значення ефективної дози опромінення 40 мкЗв для референтного віку «1 рік» за нормальної експлуатації, розрахованого для різних значень параметра шорсткості підстильної поверхні z_0 (наведено його значення, м). На осях — відстань від центра координат, км. Точками показано розташування джерел викидів – енергоблоків № 1–6 та спецкорпусу

та 98,0 % для дорослих для енергоблоків з AP1000 та близько 97,5 % для енергоблоків № 3 та 4 з реакторами ВВЕР-1000. Головну роль у цьому відіграє вологе вимивання радіойодів (у першу чергу молекулярної форми) з повітря атмосферними опадами.

Аналогічні розрахунки для сценаріїв викидів з діючих об'єктів ХАЕС — енергоблоків № 1 і 2 та спецкорпусу — в умовах порушень їхньої нормальної експлуатації не призводять до формування річної ефективної дози опромінення будь-якої вікової групи, які перевищують встановлену квоту ліміту дози для газо-аерозольного викиду АЕС 40 мкЗв на всіх відстанях від джерел викиду. Відповідно такі викиди не призводять до необхідності встановлення для них меж СЗЗ.

Проектні аварії. Результати модельних розрахунків значень ефективної дози опромінення для всіх шести референтних груп населення за умов МПА на енергоблоках № 1–4 ХАЕС з реакторами ВВЕР-1000 та проектної аварії з втратою теплоносія на енергоблоках № 5 та 6 з реакторами AP1000 наведено на рис. 5. Сукупність характеристик навколишнього середовища, за яких досягаються максимальні значення розрахункових доз, складає швидкість вітру $1 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$, категорія стійкості атмосфери F, параметр шорсткості підстильної поверхні 0,01 м. Критичною віковою групою для

розглянутих аварій є референтна група «10 років».

Згідно з [7] для аварійних викидів шлях опромінення за рахунок споживання радіоактивно забруднених продуктів не розглядається. Тому розрахункове значення ефективної дози складається зі внесків «повітряної» компоненти (інгаляційний шлях та зовнішнє опромінення від радіонуклідів у повітрі) та зовнішнього опромінення від випадань на земну поверхню. Для МПА на енергоблоках з ВВЕР-1000 їхній відносний внесок в ефективну дозу становить 88 і 12 % відповідно. Радіойоди ^{131}I – ^{135}I усіх фізико-хімічних форм сумарно дають лише 1,8 % внеску в ефективну дозу, а інертні радіоактивні гази — 3,2 %. Основна частина ефективної дози формується за рахунок внеску аерозольної компоненти викиду. При цьому основна доля припадає на ізотопи ^{141}Ce та ^{144}Ce , які сумарно дають майже 63 % від ефективної дози. Внесок цезію, стронцію та рутенію в ефективну дозу приблизно однаковий — по 10–11 %.

Для проектної аварії з втратою теплоносія на енергоблоці з реактором AP1000 відносний внесок «повітряної» компоненти та зовнішнього опромінення від випадань в ефективну дозу становить 69 і 31 % відповідно. ^{131}I усіх фізико-хімічних форм дає понад 65 % внеску в ефективну дозу, ^{137}Cs — близько 25 %. Ос-

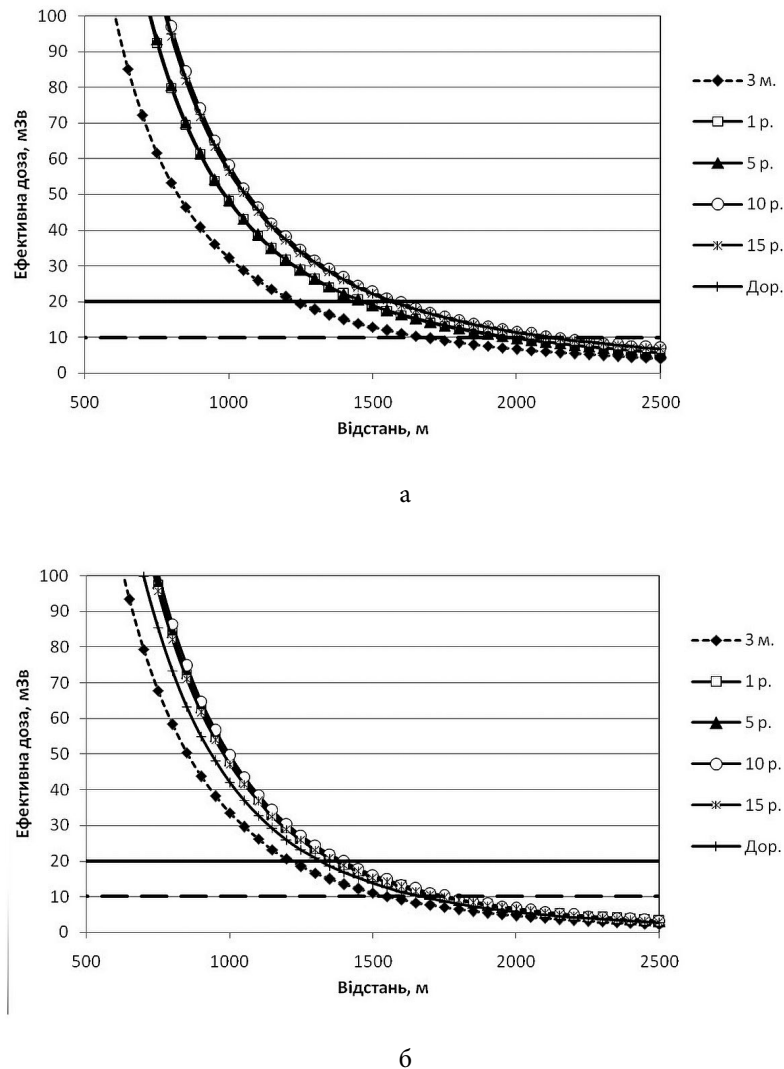


Рис. 5. Залежність розрахункового значення ефективної дози для різних референтних віків від відстані для МПА на енергоблоках № 1–4 ХАЕС із реакторами ВВЕР-1000 (а) та № 5 і 6 з реакторами АР1000 (б). Горизонтальними лініями позначено дозові нормативи 10 мЗв для дітей та 20 мЗв для дорослих в умовах проєктних аварій

новна частина ефективної дози формується за рахунок внеску аерозольної компоненти викиду (понад 99 %).

У таблиці наведено зведені результати розрахунків розмірів СЗЗ для окремих енергоблоків, різних типів проєктних аварій та дозових критеріїв. Максимальна оцінка розмірів СЗЗ отримана згідно з критерієм для ефективної дози для МПА на енергоблоці з реактором ВВЕР-1000, яка дорівнює 2150 м. Для проєктної аварії з втратою теплоносія на енергоблоці з реактором АР1000 аналогічна оцінка дещо менша — 1750 м.

Результат об'єднання всіх розрахункових кіл навколо відповідних енергоблоків з радіусами, наведеними в таблиці, показано на рис. 6. Межа СЗЗ за критерієм для проєктних аварій формується цими

колами, зміщеними одне відносно іншого на відстань між сусідніми енергоблоками. Установлена таким чином межа СЗЗ охоплює і поглинає решту менших за розмірами зон, визначених за результатами оцінок для умов нормальної експлуатації та у випадку порушень нормальної експлуатації кожного з шести енергоблоків ХАЕС, а також для розглянутого випадку проєктної аварії з відривом кришки колектора парогенератора на енергоблоці з реактором ВВЕР-1000.

Розрахована межа СЗЗ являє собою еліпсоподібну фігуру з центром у середині відрізка, який поєднує точки розташування вентиляційних труб енергоблоків № 2 і 3. Довжина великої півосі квазіеліпса дорівнює 2600 м, довжина малої півосі — 2200 м.

Результати розрахунків розмірів СЗЗ для різних типів проектних аварій

№	Тип енергоблоку	Аварія	Критична група населення	Дозовий критерій	Оцінка розмірів СЗЗ (м)
1	ВВЕР-1000	МПА	10 років	Ефект. доза	2150
2	ВВЕР-1000	-»»-	1 рік	Доза на шкіру	450
3	ВВЕР-1000	-»»-	1 рік	Доза на щито-подібну залозу	200
4	ВВЕР-1000	Відрив кришки колектора парогенератора	1 рік	Ефект. доза	1350
5	ВВЕР-1000	-»»-	1 рік	Доза на шкіру	150
6	ВВЕР-1000	-»»-	Немає перевищення дозового критерію	Доза на щито-подібну залозу	–
7	АР1000	Проектна аварія з втратою теплоносія	10 років	Ефект. доза	1750
8	АР1000	-»»-	1 рік	Доза на шкіру	350
9	АР1000	-»»-	1 рік	Доза на щито-подібну залозу	1700



Рис. 6. Межа СЗЗ ХАЕС (1), визначена в результаті проведених розрахунків згідно з вимогами [7], та межа існуючої СЗЗ радіусом 2700 м (2)

Висновки

Розміри СЗЗ ХАЕС, визначені на основі документа [7], забезпечують неперевикнення встановлених дозових критеріїв для всіх референтних вікових груп та в усьому розглянутому діапазоні метеорологічних умов розповсюдження радіоактивних викидів в атмосфері і характеристик підстильної поверхні.

Розраховані межі СЗЗ ХАЕС майже повністю вкладаються в межі, що існують зараз (коло радіусом 2700 м), за винятком її західної частини. У цій області розрахована межа СЗЗ виходить за межі існуючої в західному напрямку не більше, ніж на 250 м. При цьому більша частина цієї додаткової області припадає на водну поверхню водосховища ХАЕС. Таке невелике збільшення розрахункових розмірів СЗЗ у західному напрямку пояснюється врахуванням потенційних впливів нових блоків № 5 і 6. Площа розрахованої таким чином СЗЗ становить 18,0 км² або близько 78 % від наявної.

Враховуючи сказане, можна зробити висновок про недоцільність перегляду розмірів СЗЗ ХАЕС після введення в експлуатацію нових блоків № 3 і 4 з реакторами ВВЕР-1000 та № 5 і 6 з реакторами АР1000.

Список використаної літератури

1. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку: Закон України від 2 лютого 1995 р. N 39/95-ВР // Відомості Верховної Ради України. – 1995. – № 12. – Ст. 82. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80#Text>.
2. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України. Державні санітарні правила // Офіційний вісник України. – 2005. – № 23. – Ст. 1322. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0552-05#Text>.

3. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій. – Затвердж. наказом Держатомрегулювання 19.11.2007 р. № 162 (в редакції наказу Державної інспекції ядерного регулювання України від 4 березня 2024 р. № 195). – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-08/ed20240515#Text>.
4. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. – Київ, 1998. – 198 с.
5. Про затвердження Вимог з безпеки до вибору майданчика для розміщення атомної станції: наказ, Вимоги від 07.04.2008 № 68 / Держатомрегулювання України // Офіційний вісник України. – 2008. – № 39. – Ст. 1315. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0467-08#Text>.
6. Бончук Ю. В. Санітарно-захисні зони АЕС та радіаційно-гігієнічні вимоги до їх призначення / Ю. В. Бончук // Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. – 2016. – Вип. 21. – С. 91–105.
7. СОУ НАЕК 023:2014. Забезпечення радіаційної безпеки. Порядок встановлення розмірів санітарно-захисної зони АЕС. – Київ: ДП «НАЕК «Енергоатом», 2014. – 37 с.
8. 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 р. № 153/766.
9. Гусев Н. Г. Радиоактивные выбросы в биосфере: справочник / Н. Г. Гусев, В. А. Беляев. – Москва: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
10. Atmospheric dispersion in nuclear power plant siting: A safety guide, Safety series No. 50-SG-S3. – Vienna: IAEA, 1980.
11. Muller H. ECOSYS-87: A Dynamic Model for Assessing Radiological Consequences of Nuclear Accidents / H. Muller, G. Prohl // HealthPhysics. – 1993. – Vol. 64 (3). – P. 232–252.
12. Müller H. Model description of the terrestrial food chain and dose module FDMT in RODOS PV6.0. Version 1.1. RODOS(RA3)-TN(03)06 / Müller H., Gering F., Pröhl G. – GSF – Institut für Strahlenschutz, 2004.
13. ICRP Publication 119: Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60 / K. Eckerman, J. Harrison, H.-G. Menzel, C. Clement // Annals of the ICRP. – 2012. – Vol. 41, Suppl. 1. – 130 p.
14. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety Reports Series No. 19. – Vienna: IAEA, 2001.
15. Хмельницька АЕС. Енергоблок № 2. Остаточний звіт з аналізу безпеки. Глава 2. Характеристика району та майданчика АЕС. – ДП «НАЕК «Енергоатом», ВП «Хмельницька АЕС», 2023.
16. Звіт про метеорологічні спостереження в районі Хмельницької АЕС у 2022 році. – ДП «НАЕК «Енергоатом», ВП «Хмельницька АЕС», 2023.
17. Звіти про стан радіаційної безпеки на ХАЕС за 2013–2023 роки. – ДП «НАЕК «Енергоатом».
18. Строительство энергоблоков № 3 и 4 Хмельницкой АЭС. Технико-экономическое обоснование. Том 13.3. Оценка воздействий на окружающую среду (ОВОС). Общая характеристика энергоблоков. 43-814.203.004. ЭО.13.03. – КИЭП, 2017. – 133 с.
19. URP-GW-G0R-031, Revision 0, AP1000® plant input data for Khmelnytskyi feasibility study deliverable 21.1. – Westinghouse Electric Company LLC, 2022.
20. 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.
21. UK AP1000® Environment Report UKP-GW-GL-790, Revision 7. – Westinghouse Electric Company LLC, 2017. – Available at: <https://www.westinghousenuclear.com/media/s5glx03v/ukp-gw-gl-790.pdf>.
22. Хмельницкая АЭС. Энергоблок № 2. Оценка воздействий на окружающую среду. Том 3. Книга 2. Раздел 3. Общая характеристика энергоблока и хозяйственной деятельности в зоне его влияния. 43-915.201.012. ОВ03.02. – КИЭП «Энергопроект», 2000.
23. Звіт з оцінки впливу на довкілля планованої діяльності. Будівництво енергоблоків № 3, 4 Хмельницької АЕС. 571816.202.001. – Відокремлений підрозділ «Атомпроектінжиніринг» ДП «НАЕК «Енергоатом». Київ, 2019. – 511 с.
24. ML11171A348 – Westinghouse AP1000 DesignControlDocumentRev. 19 – Tier 2 Chapter 11 – Radioactive Waste Management – Section 11.3 Gaseous Waste Management System. – Westinghouse Electric Company LLC, 2011. – Available at: <https://www.nrc.gov/docs/ML1117/ML11171A348.pdf>.
25. Radioactive Waste Management AP1000 Design Control Document Tier 2 Material 11.3–10 Revision 19. – Westinghouse Electric Company LLC, 2011.
26. 24.1.42.ОБ.04.01.03 «Хмельницкая АЭС. Энергоблок № 1. Отчет по анализу безопасности. Анализ проектных аварий. Книга 3». Редакция 2. – Киев: ГП «НАЭК «Энергоатом», 2021.
27. Calculation of distance factors for power and test reactor sites. Technical information document (TID)14844 / Di Nunno J. J. Et al. – U. S. Atomic Energy Commission, 1962.
28. AP1000 safety analysis report input document. Tier 2, Chapter 15, Revision A. – Westinghouse Electric Company LLC, 2023.

M. M. Talerko¹, T. D. Lev¹, A. V. Nosovskyi¹,
V. M. Rudko¹, V. M. Piskun¹, A. M. Novikov¹,
I. P. Shedemenko¹, O. V. Blokhina²

¹ Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 12, Lysohirska st., Kyiv, 03028, Ukraine

² Separate Division "Atomproektengineering" of JSC NNEGC
"Energoatom", 6, Simi Prakhovykh st., Kyiv, 01033, Ukraine

Assessment of the Size of the Khmelnytskyi NPP Sanitary Protection Zone Taking into Account the Construction of Power Units No. 5, 6 with AP1000 Reactor

The size of the sanitary protection zone (SPZ) of the Khmelnytskyi NPP was evaluated, taking into account the potential impact of power units No. 3, 4 with VVER-1000 reactor and No. 5, 6 with AP1000 reactor by Westinghouse Electric Company. The calculations were carried out taking into account the requirements of the standard SOU NAEK 023:2014 "The procedure for establishing the dimensions of the sanitary protection zone of nuclear power plants". The size of the SPZ were determined on the basis of not exceeding certain radiation levels at the boundary of the SPZ for conditions of normal operation, anticipated operational occurrences and the maximum design basis accident. For emissions during normal operation of facilities at the industrial site of the Khmelnytskyi NPP, the criterion of not exceeding the effective dose of exposure to the population is met at distances of 450–650 m from power units No. 1–4. Radionuclide emission from power units with AP1000 reactors do not lead to exceeding the dose criterion during normal operation at any distance from the power unit. It was found that under the conditions of normal operation of power units with AP1000 reactors, ¹⁴C makes the main contribution to the formation of the effective radiation dose within the SPZ (about 87% of the total). However, in general, the contribution of emissions from AP1000 is insignificant compared to emissions from VVER-1000.

It is shown that not exceeding the criterion for the effective dose of exposure of the critical reference age group "1 year" in the case of the maximum design basis accident at power units with VVER-1000 reactors is decisive for establishing the dimensions of the SPZ. The contributions of the "air" component (inhalation path and external radiation from activity in the air) and external radiation from depositions on the earth's surface to the calculated

value of the effective dose for the maximum design basis accident at power units with VVER-1000 reactors are 88% and 12%, respectively. The main part of the effective dose is formed due to the contribution of the aerosol component of the emission, primarily ^{141,144}Ce (almost 63%), as well as ^{134,137}Cs, ⁹⁰Sr and ^{103,106}Ru.

The calculated boundary of the SPZ of the Khmelnytskyi NPP, taking into account the potential impact of all 6 power units, is an elliptical figure with the lengths of the semi-axes of 2,600 m and 2,200 m. The calculated boundaries of the SPZ of the Khmelnytskyi NPP almost completely fit into the existing boundaries (a circle with a radius of 2700 m). A conclusion was made that re-establishment of the dimensions of the sanitary protection zone of the Khmelnytskyi NPP is not advisable after the commissioning of the new units No. 3, 4 with VVER-1000 reactors and No. 5, 6 units with AP1000 reactors.

Keywords: sanitary protection zone, surveillance zone, nuclear power plant, AP1000 reactor, design basis accident, conditions of normal operation, effective radiation dose.

References

1. [On use of nuclear power and radiation safety. The Law of Ukraine No. 39/95VR, dated 02.02.1995]. *Vi-domosti Verkhovnoii Rady Ukrainy* [The Official Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine], 1995, vol. 12, art. 82. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80#Text>. (in Ukr.)
2. [Basic sanitary rules for radiation protection of Ukraine. State sanitary rules]. *Ofitsiyni Visnyk Ukrainy* [The Official Bulletin of Ukraine], 2005, vol. 23, art. 1322. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0552-05#Text>. (in Ukr.)
3. [NP 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 Ukraine No. 195, dated 04.03.2024). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-08/ed20240515#Text>. (in Ukr.)
4. [Radiation Safety Standards of Ukraine (NRBU-97). State hygiene standards DGN 6.6.1.-6.5.001-98]. Kyiv, 1998, 198 p. (in Ukr.)
5. [On approval the safety requirements for site selection for the placement of a nuclear power plant. Order of the State Committee for Nuclear Regulation of Ukraine No. 68, dated 07.04.2008]. *Ofitsiyni Visnyk Ukrainy* [The Official Bulletin of Ukraine], 2008, no. 39, art. 1315. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0467-08#Text>. (in Ukr.)

6. Bonchuk Iu. V. (2016). [Sanitary protective zones of NPPs, radiation and hygienic requirements for their assignment]. *Problemy Radiatsiynoyi Medycyny ta Radiobiologii* [Problems of Radiation Medicine and Radiobiology], vol. 21, pp. 91–105. (in Ukr.)
7. SE NNEGC “Energoatom” (2014). [Radiation safety. The procedure for the establishment of sizes of the sanitary protective zone of NPP. SOI NNEGC 023:2014]. Kyiv: SE NNEGC “Energoatom”, 37 p. (in Ukr.)
8. [NP 306.2.173-2011. Requirements for determining the dimensions and boundaries of the surveillance 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 No. 153/766, dated 07.11.2011. (in Ukr.)
9. Gusev N. G., Belyaev V. A. (1991). *Radioaktivnyye vybrosy v biosfere* [Radioactive emissions in the biosphere]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 256 p. (in Rus.)
10. International Atomic Energy Agency (1980). *Atmospheric dispersion in nuclear power plant siting: A safety guide*, Safety series No. 50-SG-S3. Vienna: IAEA.
11. Muller H., Prohl G. (1993). ECOSYS-87: A Dynamic model for assessing radiological consequences of nuclear accidents. *Health Physics*, vol. 64, no. 3, pp. 232–252.
12. Müller H., Gering F., Pröhl G. (2004). *Model description of the terrestrial food chain and dose module FDMT in RODOS PV6.0*. Version 1.1. RODOS(RA3)-TN(03)06. GSF – Institut für Strahlenschutz.
13. Eckerman K., Harrison J., Menzel H.-G., Clement C. (2012). ICRP Publication 119: Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP*, vol. 41, suppl.1, 130 p.
14. International Atomic Energy Agency (2001). *Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment*. Safety Reports Series No. 19. Vienna: IAEA.
15. [Khmelnyskyi NPP. Power unit No. 2. Final Safety Analysis Report. Chapter 2. Characteristics of the NPP area and site]. SE NNEGC “Energoatom”, SS “Khmelnyskyi NPP”, 2023. (in Ukr.)
16. [Report on meteorological observations in the area of the Khmelnyskyi NPP in 2022]. SE NNEGC “Energoatom”, SS “Khmelnyskyi NPP”, 2023). (in Ukr.)
17. Reports on the state of radiation safety at the Khmelnyskyi NPP for 2013–2023. SE NNEGC “Energoatom”. (in Ukr.)
18. [Construction of power units No. 3 and 4 of the Khmelnyskyi NPP. Feasibility study. Volume 13.3. Environmental impact assessment (EIA). General characteristics of power units. 43–814.203.004.EO.13.03]. Kyiv Research and Design Institute “Energoproject”, 2017, 133 p. (in Rus.)
19. URP-GW-G0R-031, Revision 0. AP1000® Plant Input Data for Khmelnyskyi Feasibility Study Deliverable 21.1. Westinghouse Electric Company LLC, 2022.
20. 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.
21. UK AP1000® Environment Report UKP-GW-GL-790, Revision 7. Westinghouse Electric Company LLC, 2017. Available at: <https://www.westinghousenuclear.com/media/s5glx03v/ukp-gw-gl-790.pdf>.
22. [Khmelnyskyi NPP. Power unit No. 2. Assessment of environmental impacts. Volume 3. Book 2. Section 3. General characteristics of the power unit and economic activity in the zone of its influence. 43-915.201.012.OB03.02]. Kyiv Research and Design Institute “Energoproject”, 2000). (in Rus.)
23. [Report on environmental impact assessment of planned activity. Construction of power units No. 3, 4 of the Khmelnyskyi NPP. 571816.202.001]. Kyiv: Separate Division “Atomproektengineering” of SE NNEGC “Energoatom”, 2019, 511 p. (in Ukr.)
24. ML11171A348. *Westinghouse AP1000 Design Control Document* Rev. 19, Tier 2, Chapter 11 – Radioactive Waste Management – Section 11.3 Gaseous Waste Management System. Westinghouse Electric Company LLC, 2011. Available at: <https://www.nrc.gov/docs/ML1117/ML11171A348.pdf>.
25. *Radioactive Waste Management AP1000 Design Control Document*, Tier 2, Material 11.3–10, Revision 19. Westinghouse Electric Company LLC, 2011.
26. [24.1.42.OB.04.01.03 Khmelnyskyi NPP. Power unit No. 1. Safety analysis report. Analysis of design basis accidents. Book 3. edition 2]. SE NNEGC “Energoatom”, 2021. (in Ukr.)
27. Di Nunno J. J., Anderson F. D., Baker R. E., Waterfield R. L. (1962). Calculation of Distance Factors for Power and Test Reactor Sites, Technical Information Document (TID) 14844. U.S. Atomic Energy Commission, 43 p.
28. *AP1000 Safety Analysis Report Input Document*. Tier 2, Chapter 15, Revision A. Westinghouse Electric Company LLC, 2023.

Надійшла / Received 16.10.2024

Рекомендована до друку / Accepted 04.11.2024

Т. Д. Лев, В. М. Піскун, Ю. В. Яценко, І. П. Шедеменко

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

Комплексний аналіз характеристик лісових пожеж та метеорологічних умов, що впливають на їхнє розповсюдження, на території Українського Полісся за період 2006–2022 рр.

Ключові слова:

природні пожежі,
індекс пожежної небезпеки,
статистичний аналіз
характеристик пожежі,
кліматичні моделі,
супутникова інформація,
метеорологічна ситуація,
радіонукліди

Досліджено просторово-часові характеристики природних пожеж на території Українського Полісся з урахуванням впливу метеорологічних факторів та локальних умов місцевості. Виконано статистичний аналіз характеристик лісових пожеж на території шести регіонів, закріплених за метеостанціями, за обробленими даними (сумарними даними за місяць, рік) про пожежі за період 2006–2022 рр. Відзначено: 1) річна кількість пожеж збільшилася у три рази, а площі загорання у 12 разів, досягаючи в окремі роки від 825 км² (2014 і 2020 рр.) до 1653 км² (2015 р.); 2) найбільша кількість загорань спостерігалася на території агроландшафту, загалом від 70 до 90 % від площі регіону. За відносно короткий період (16 років) відзначається динаміка зростання річних сум площ загорання. Описано екстремальні випадки з максимальним числом точок загорання (від 1500 до 1800) з площею до 100–120 км² на території метеостанцій м. Коростень та м. Сарни з детальним аналізом погодних умов. Використані дані проєкту Copernicus: три глобальні набори кліматичних даних, дані характеристик пожеж та чотири індекси пожежної небезпеки, щоб проаналізувати використання показників пожежонебезпечної погоди для оцінки пожежонебезпеки в умовах екстремальних випадків. Описано вплив метеорологічних умов та синоптичної ситуації на поширення пожеж територією, вільною від лісових масивів з використанням архіву синоптичних карт для Європейської території та сучасних геоінформаційних технологій. Відзначено вплив великомасштабних природних факторів та місцевих локальних умов на рівень пожежної небезпеки території регіону, що розглядається. Результати виконаних досліджень та можливість використання погодних показників пожежонебезпеки, отриманих з використанням архівних даних чи кліматичних моделей, дадуть змогу покращити оцінки вторинного радіоактивного забруднення середовища внаслідок лісових пожеж у зоні відчуження на території Українського Полісся.

Вступ

Лісові пожежі залишаються одним із найпотужніших природних катастрофічних явищ і водночас є природною особливістю у функціонуванні багатьох

екосистем. Взаємодія між рослинністю та кліматичними умовами протягом тривалих періодів часу встановлює особливу схему повторення лісових пожеж у певній екосистемі, відому як її режим пожеж. Відхилення від переважаючого режиму пожеж — часу,

© Т. Д. Лев, В. М. Піскун, Ю. В. Яценко, І. П. Шедеменко, 2024. Ліцензія CC BY 4.0

частоти, розміру та інтенсивності лісових пожеж — можуть призвести до значних екологічних змін як у пожежозалежних екосистемах, яким для зростання та розвитку потрібні пожежі, так і в пожежочутливих екосистемах, де пожежі приносять більше негативних, ніж позитивних наслідків [1, 2]. З 2003 до 2016 р. в усьому світі сталося понад 13 млн окремих пожеж, кожна тривалістю 4–5 діб. У середньому при кожному загоранні вигорала площа 440 га по всьому світі. Сезони пожежонебезпечної погоди поширилися на 29,6 млн км² (25,3 %) поверхні Землі, вкритої рослинністю, що призвело до збільшення середньої тривалості глобального сезону пожежонебезпечної погоди на 18,7 %, подвоєння (збільшення на 108,1 %) глобальної площі, що вигорає, порушеної тривалими сезонами пожежонебезпечної погоди та збільшенням глобальної частоти тривалих сезонів такої погоди на 62,4 млн км² (53,4 %) за період 1979–2013 рр. [2]. У звіті щодо України [3] показано, що за 30 років (1980–2010 рр.) кількість та площа природних пожеж, у тому числі лісових, характеризуються стійкою тенденцією до збільшення. Зокрема, у період 1980–1989 рр. кількість пожеж варіювала з 792 до 2377 випадків на рік, за 1990–1999 рр. цей показник збільшився більше, ніж удвічі, з 1818 до 6743 і зберігся на рівні 3205–6383 на рік за період 2000–2010 рр. Річна кількість пожеж за вказаний період стабільно збільшилася в 2,6 раза, тоді як середній показник «річна площа пожеж» змінювався таким чином: а) 1980-і роки: 1673 пожежі/1176 га; б) 1990-і роки: 3917 пожеж/3962 га; в) 2000–2010 рр.: 4367 пожеж/2006 га.

Більшість пожеж відбувається з вини відвідувачів лісу (до 93–96 % в окремі роки), до 4 % викликані іскрами від транспортних засобів, до 3 % стається від сільськогосподарських спалювань, до 1 % — від різної господарської діяльності на лісгосподарських землях [4]. Сільськогосподарські пожежі є другою за поширеністю причиною лісових пожеж. Загалом, згідно з аналізом супутникових знімків, 70 % від загальної кількості лісових пожеж в Україні — це сільськогосподарські та лугопасовищні пожежі. Часто сільськогосподарські підприємства незаконно проводять підпали на сільськогосподарських полях після збирання сільськогосподарських культур або населення спалює рослинні залишки на невеликих городах. Вогонь поширюється, пожежі проникають у ліси та можуть призвести до великих пожеж [1–4].

Площі покритих лісами територій в Україні становлять близько 10 млн га. Рівень лісистості в країні (відношення площі, вкритої лісовою рослинністю,

до загальної площі території) за підсумками 2009 р. становить близько 16 %, що на 4 % менше від оптимального рівня. Українське Полісся лежить у зоні мішаних лісів. З лісів переважають соснові (бори), дубово-соснові та дубово-грабові. У лісах рослини ростуть ярусами. Верхній ярус утворюють дерева, середній, який називають підліском, — кущі, нижній — трав'янисті рослини та гриби. У північній частині зони мішаних лісів із хвойних дерев переважає сосна звичайна, а з листяних — дуб звичайний. На південь, крім дуба, разом із сосною ростуть граб, береза, липа, осика, клен, вільха. Підлісок утворюють кущі ожини, шипшини, барбарису, ліщини, малини. На заболочених місцях поширені брусниця та чорниця [4–6].

На сьогоднішній день дослідження в галузі оцінки та прогнозування наслідків лісових пожеж інтенсивно ведуться як за кордоном, так і в нашій країні [6–12]. Просторово-часові характеристики цього небезпечного природного явища вивчаються з урахуванням змін погодних умов, використовуючи дані глобальних і регіональних прогностичних кліматичних моделей і щоденні дані супутникового моніторингу територій різних країн (MODIS Terra і Aqua, VIIRS) [11, 13].

Метою цього дослідження було виявлення просторового розподілу характеристик природних пожеж на території Українського Полісся, забруднений радіонуклідами після аварії на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС), з оцінкою впливу метеорологічних умов на характер та площу поширення пожеж за період 2006–2022 рр. При аналізі використовувалися дані супутникового моніторингу територій різних країн (MODIS Terra та Aqua, VIIRS) та дані мережі гідрометеорологічних спостережень для періодів вибраних випадків з екстремальною кількістю вогнищ загорянь на території Полісся. Комплексна оцінка характеристик пожеж та метеорологічних параметрів була проведена з використанням засобів геоінформаційної системи MapInfo та за допомогою статистичного апарату аналізу часових рядів з оцінкою статистичної значущості використовуваних характеристик.

Для окремих випадків з максимальними пожежами було проведено оцінку пожежної небезпеки із застосуванням різних способів розрахунку показника пожежної небезпеки за погодними параметрами.

Використані матеріали та територія досліджень

У розвитку природних пожеж основну роль відіграють кліматичні умови, топографія та тип лісу.

Лісові пожежі під впливом багатьох умов розподіляються за територією і в часі дуже нерівномірно. Умови, що впливають на виникнення та поведінку пожеж, можна розділити на три основні групи: лісорослинні (постійні), метеорологічні (змінні), а також додаткові, до яких віднесемо грозову активність та антропогенне навантаження. Вплив цих умов виражається оцінкою лісопожежної небезпеки з використанням метеорологічних параметрів: FWI¹ [12–14] та модифікований показник Нестерова (РРО_н²) [15, 16], що відображає баланс посушливих та зволожуючих факторів погоди.

Комплексна оцінка умов виникнення та розповсюдження природних пожеж проводилася з використанням поточних метеорологічних даних, даних кліматичних моделей за період 2006–2022 рр., супутникових даних про характеристики природних пожеж, отриманих за проектами Copernicus.eu та NASA.gov. Інформаційні матеріали, що використовувалися, представлені такими наборами даних:

1) набір архівних даних (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cems-fire-historical?tab=overview>) (FWI-ERA5, період 2006–2022 рр.), що забезпечує повну історичну реконструкцію метеорологічних умов, сприятливих для виникнення, поширення та стійкості пожеж. У цьому наборі даних індекси пожежної небезпеки розраховані за допомогою прогнозу погоди на

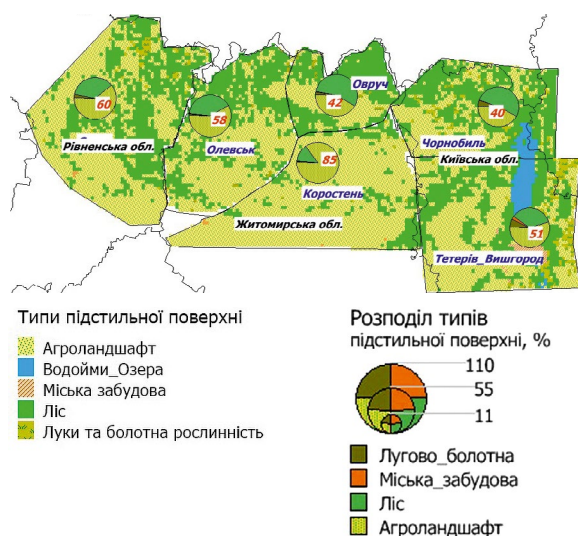
основі історичного моделювання, наданого реаналізом ERA5 ECMWF [17, 18];

2) набір прогностичних даних FWI (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-tourism-fire-danger-indicators?tab=overview>), отриманих за допомогою глобальних та регіональних кліматичних моделей [19–21];

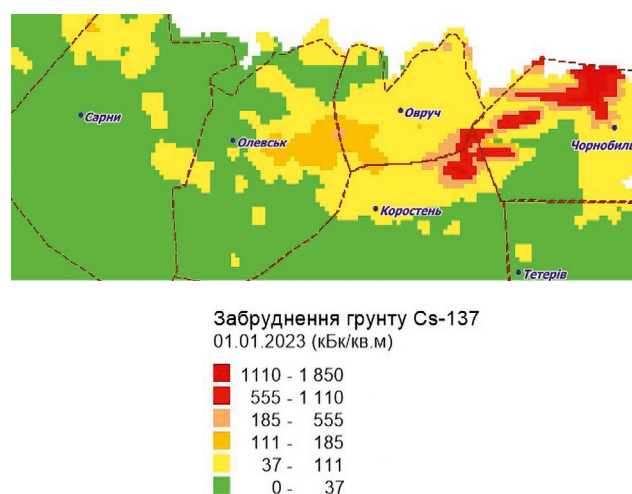
3) набір поточної (<https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer>, період 2006–2020 рр.) метеорологічної інформації (температура повітря, відносна вологість, кількість опадів, швидкість вітру, що інтерполюються у вузли регулярної сітки (1 × 1 км) та співмірних з метеостанцією даного регіону [22];

4) набір даних характеристик пожеж (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>, період 2006–2023 рр.), отриманих за допомогою спектральних радіометрів середньої роздільної здатності (MODIS) з платформ Terra та Aqua, а також набір радіометрів візуалізації видимого інфрачервоного діапазону (VIIRS) (375 м) з платформ Suomi NPP та NOAA-20 [23, 24].

Статистичний аналіз даних щодо характеристик лісових пожеж за період 2006–2020 рр. було проведено територією радіоактивного забруднення Українського Полісся з метою виявлення особливостей просторових географічних та метеорологічних умов займання лісових пожеж для шести регіонів,



а



б

Рис. 1. Територія досліджень із просторовим розподілом типів підстильної поверхні (а) та радіоактивного забруднення ґрунту ¹³⁷Cs (б)

¹ Fire Weather Index – стандартизований індекс пожежної небезпеки, що викликана погодними умовами.

² Показник пожежної небезпеки В. Г. Нестерова.

Таблиця 1. Характеристика території досліджень

Регіон метеостанції	Площа, км ²	Тип підстильної поверхні, площа у %			Середня висота місцевості, м	Середнє забруднення ґрунтів на 2023 р., кБк/м ²
		Лугово-болотна рослинність	Ліс	Агроландшафт		
Чорнобиль	5520	4,5	51,0	40,5	125,0	260
Коростень	7940	0,7	14,5	85,0	180,0	82
Олевськ	6180	1,0	41,0	58,0	195,0	53
Овруч	2942	2,9	56,0	42,0	165,0	103
Сарни	9013	2,7	36,5	60,2	170,0	30
Тетерів, Вишгород	8320	6,5	34,0	51,0	115,0	38

закріплених за метеостанціями загальною площею 39 915 км² (рис. 1).

Детальні дані про розподіл типів підстильної поверхні (ліси, агроландшафти, лучно-болотна рослинність, водна поверхня, міська забудова), середню висоту місцевості та середній рівень радіоактивного забруднення ґрунтів ¹³⁷Cs станом на 2023 р.³ наведено у табл. 1.

Як видно з табл. 1, на 85 % території, закріпленої за метеостанцією м. Коростень, розташовані агроландшафти (середня висота місцевості 190 м) і лише на 14 % – лісова рослинність. По території, що закріплена за метеостанцією м. Сарни, агроландшафти займають 60 %, а лісові масиви – 40 %. Агроландшафт переважає територіями метеостанцій міст Олевськ і Тетерів. У регіонах метеостанцій міст Чорнобиль та Овруч просторовий розподіл агроландшафту та лісових територій відповідно у відсотках (40/51, 41/56). Слід зазначити, що в Чорнобильському регіоні близько 28 % території має забруднення ¹³⁷Cs > 185 кБк/м² (>5 Ки/км²), у Коростенському – близько 7 %.

Досі ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr роблять істотний внесок у радіоактивне забруднення лісової деревини в деяких районах України, забруднених унаслідок аварії на ЧАЕС. Наприклад, у дослідженні М. М. Лазарева та співавторів [27] показано, що забруднення деревини ¹³⁷Cs все ще зберігається в Житомирській області, що була однією з областей України, яка найбільше постраждала від Чорнобильської аварії. Концентрація питомої активності ¹³⁷Cs у пробах попелу дров, отриманих від приватних домогосподарств цього району, суттєво варіювала – від 230 до 32 900 Бк/кг, що було зафіксовано в м. Народичі. Крім того, приблизно в 30 % проб попелу з цього міста концентрація питомої ак-

тивності ¹³⁷Cs перевищувала 10 000 Бк/кг, що можна віднести до низькоактивних радіоактивних відходів, які підлягають регульованому контролю згідно з українськими нормами [28]. Оцінки забруднення лісової деревини ⁹⁰Sr, представлені в роботі [27], дають змогу припустити, що є висока ймовірність того, що у дровах, заготовлених у більшості лісів Іванківського району, рівень забруднення ⁹⁰Sr може перевищувати 60 Бк/кг. Лише невелика частина лісів, розташованих у східній частині Іванківського району, швидше за все, відповідатиме українським гігієнічним нормам, що висуваються до дров. Концентрація активності ⁹⁰Sr в деревині лісів, розташованих на великих територіях північно-східної частини Іванківського району, могла перевищувати допустимий рівень (ДР) ⁹⁰Sr для дров у 8 разів. Слід очікувати, що ліси, що ростуть на цих територіях, ще можуть бути радіоактивно забруднені вище ДР протягом періоду, що перевищує три періоди напіврозпаду ⁹⁰Sr (понад 87 років) [29].

На рис. 2 представлено просторовий розподіл точок загорання (2016–2020 рр.) за типами підстильної поверхні, території радіоактивного забруднення після аварії 1986 р. на ЧАЕС. Аналіз просторових даних показує, що на території радіоактивного забруднення (регіони метеостанцій міст Чорнобиль, Овруч та Олевськ) здебільшого спостерігалися лісові пожежі.

Просторово-часовий аналіз динаміки характеристик пожеж спільно з метеорологічними параметрами

Проведено статистичний аналіз даних про характеристики природних пожеж, метеорологічні умови,

³ <https://www.iaea.org/2021/09/28/monitoring-radioaktivnih-rechovin-u-vodojmah-ta-gruntah.htm>.

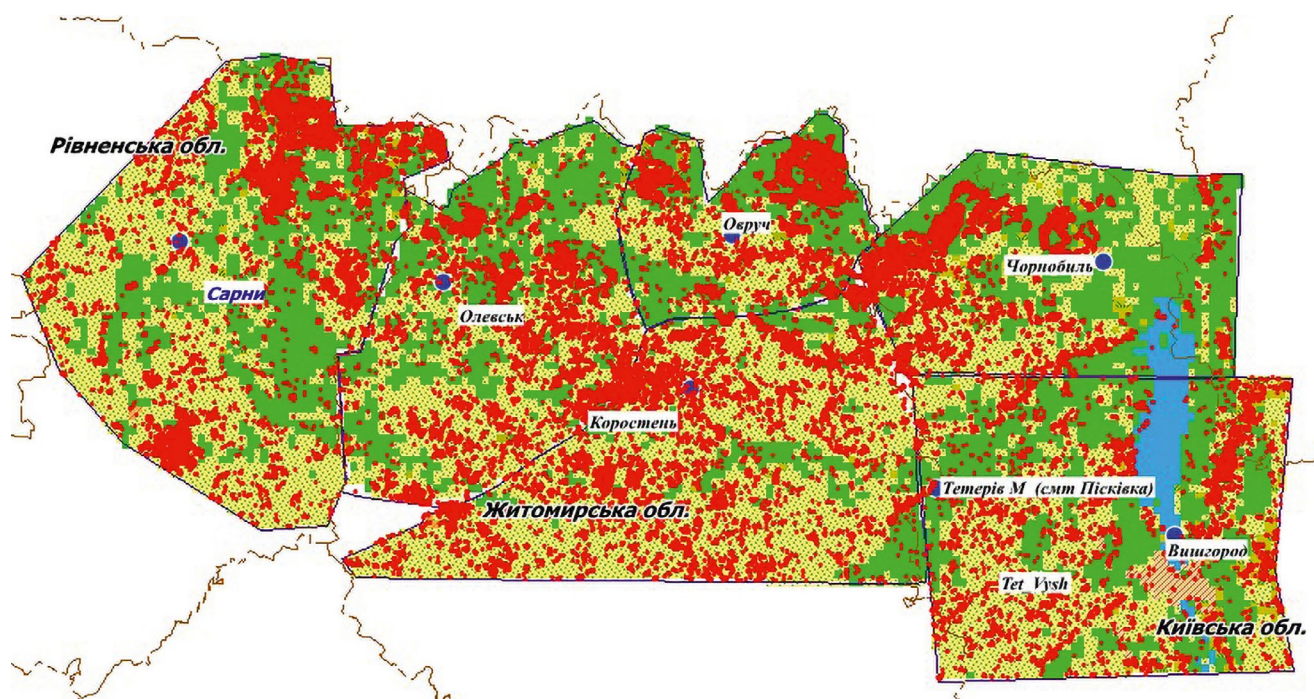


Рис. 2. Територія пожеж за період 2016–2020 рр.

що супроводжують розглянуті пожежі за таким алгоритмом:

оцінено динаміку числа загорань за роками та регіонами за період 2006–2022 рр.;

оцінено динаміку кількості діб із пожежами по територіях, закріплених за метеостанціями у період 2006–2022 рр.;

проведено розрахунок числа загорань / кількості діб за роками та територіями обраних метеостанцій (2006–2022 рр.);

розраховано загальну кількість випадків загорань за територіями метеостанцій та окремо для агро-

ландшафту (%) від загальної кількості випадків за п'ятирічними періодами;

вибрано дати з максимальним числом загорань на території дослідження;

представлено динаміку метеорологічних параметрів разом із характеристиками пожеж, дано опис синоптичних ситуацій з екстремальними випадками природних пожеж.

Результати порівняльного аналізу розподілу числа випадків спалахів за п'ятирічні періоди наведено в табл. 2. Виділено періоди з 2006 по 2020 рр. за п'ятирічками для регіонів м. Коростень та м. Сарни

Таблиця 2. Загальна кількість випадків спалахів за територіями метеостанцій та окремо для агроландшафту (%) від загальної кількості випадків за п'ятирічними періодами

Регіон метеостанції	2006–2010 рр.			2011–2015 рр.			2016–2020 рр.			2021–2023 рр. (01.01.21–01.09.23)		
	Агро	%	Всього	Агро	%	Всього	Агро	%	Всього	Агро	%	Всього
Чорнобиль	540	74,7	723	3010	62,9	4786	2020	47,6	4245	1955	42,7	4581
Коростень	1827	93,7	1950	9655	92,1	10484	5127	86,4	5935	1074	72,8	1476
Олевськ	686	65,0	1055	4746	72,2	6577	2901	57,1	5078	448	70,7	634
Овруч	319	71,4	447	1281	57,3	2237	943	25,1	3755	471	46,4	1015
Сарни	675	72,0	937	8731	59,5	14678	5451	58,8	9272	1534	68,2	2248
Тетерів — Вишгород	1292	74,3	1738	5409	67,0	8073	2253	60,5	3725	3582	71,2	5033

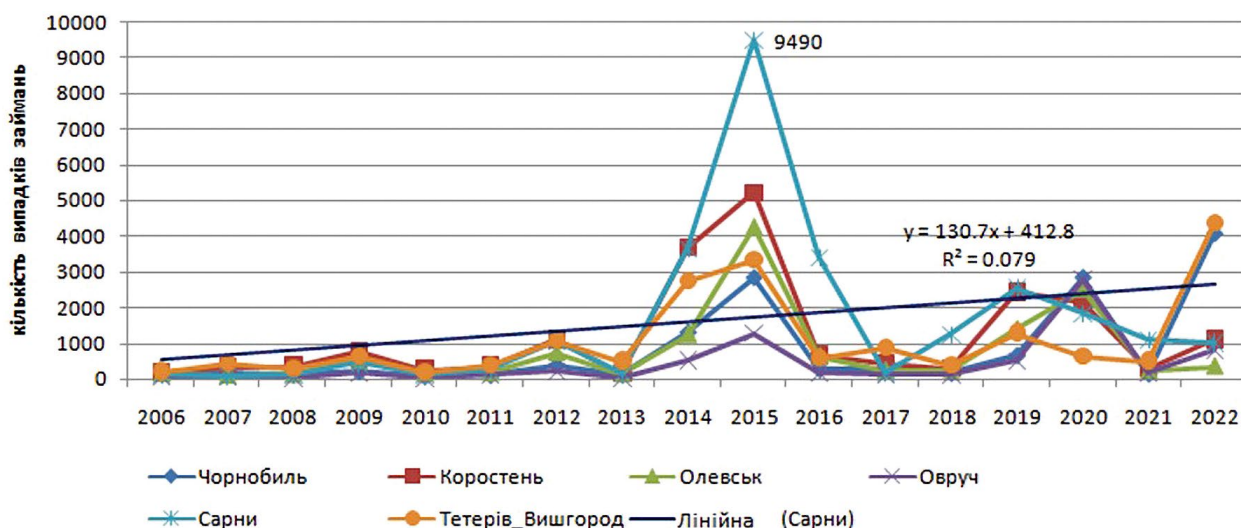


Рис. 3. Динаміка пожеж (кількість точок загорання) по територіях, закріплених за метеостанціями, у період 2006–2022 рр.

з максимальним числом точок загорань, на території яких максимальний відсоток пожеж (92 та 60 % відповідно) припадає на агроландшафт — територію сільгоспвиробництва. Окремо було розглянуто випадки локальних лісових пожеж у квітні 2020 р. по території Житомирської області (Лугинський та Овруцький райони). За період 2021–2023 рр. максимальна кількість пожеж припадала на регіони міст Чорнобиля та Тетерева, що пов'язано з військовими діями на цих територіях.

Найбільша кількість випадків спалахів характерна для тих регіонів, у яких переважають площі з агроландшафтами. За 2011–2015 рр. на території метеостанції м. Коростень загалом було відмічено 10 484 випадків спалахів, зокрема в агроландшафті — 92 % випадків;

відповідно по регіону м. Сарни із 14 678 спалахів в агроландшафті — 60 %. Для всієї території дослідження частка спалахів в агроландшафтах у середньому становить до 67 % від загальної кількості випадків за 2006–2023 рр.

Динаміка річних даних щодо кількості пожеж за період 2006–2022 рр. представлена на рис. 3, яка показує зростання пожеж з 2013 р., виділяючи періоди 2015, 2019, 2020 та 2022 рр. із максимальною кількістю пожеж.

Динаміка кількості діб з пожежами, наведена на рис. 4, показує, що за кількістю діб з пожежами виділяються регіони з метеостанціями міст Коростень, Тетерів та Чорнобиль з максимумами за 2009, 2012, 2015, 2019, 2021 та 2022 рр. Максимальна річна кількість пожеж зафіксована для м. Коростень: 2015 р. — 167 діб,

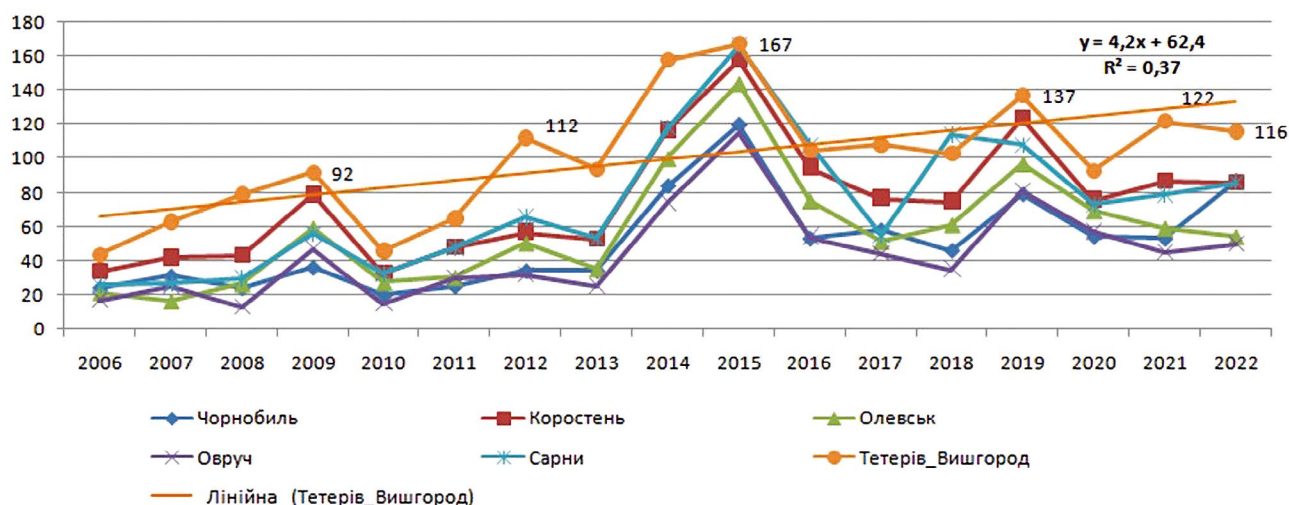


Рис. 4. Динаміка тривалості пожеж за територіями, закріпленими за метеостанціями, у період 2006–2022 рр.

2019 р. — 137, 2021 р. — 122 та 2022 р. — 116 діб. Апроксимація кривої ходу річної кількості діб із пожежами лінійним трендом демонструє збільшення тривалості періодів із пожежами в регіонах метеостанцій (рис. 4) кожні 10 років на 50–60 діб. Це підтверджує дослідження та результати робіт [1–3].

Проведено оцінку статистичної значущості⁴ характеристик лісових пожеж (середні дані за дату та місяць) за обраними територіями (віднесеними до метеостанцій — м. Чорнобиль, м. Коростень, м. Сарни) з використанням програмного комплексу Real Statistics⁵ і представленою такими параметрами:

t -критерій Стюдента — t -stat (визначення статистичної значущості відмінностей середніх величин);

ефект Коена (Cohen d) — розмір ефекту (величина впливу);

показник значущості p (p -value) — статистично значуща різниця між середніми для двох груп.

Статистична значимість у нашому випадку — це ймовірність того, що різниця між двома наборами даних про кількість загорань для просторово неоднорідної території обумовлена реальною відмінністю варіантів, що тестуються, та не є випадковою. Якщо результат статистично значущий, це означає, що його отримання внаслідок випадкових подій чи флуктуацій є малоімовірним.

Інструмент аналізу даних реальної статистики (Real Statistics)⁶ поєднує аналіз рівних та нерівних

дисперсій, надає довірчі інтервали та розмір ефекту Коена. Також надається друга міра величини ефекту, що заснована на коефіцієнті кореляції.

В аналізі використовувалися дані для регіонів м. Чорнобиль — м. Коростень та м. Коростень — м. Сарни за період 2006–2010 рр. за датами пожеж та середньомісячні дані за період 2011–2016 рр.

Дані обробки (тестування — t -test) з використанням t -критерію Стюдента, ефекту Коена та показника значущості p (p -value) наведені в табл. 3.

Оскільки для обох пар даних розраховане значення t -критерію Стюдента (t -stat = 3,07 та 3,09) більше за критичне (t -crit = 1,65 якщо рівень значущості $\alpha = 0,05$ та ступені свободи $df = 362$ та 373) та ймовірність помилково відхилити нульову гіпотезу про рівність середніх менша за 0,05 (p -value = 0,0011 < 0,05), то робимо висновок про статистичну значущість відмінностей між порівнюваними величинами — кількостями точок загорання за добу для регіонів м. Чорнобиль — м. Коростень і м. Коростень — м. Сарни з ймовірністю помилки 5 %. Параметр Cohen $d = 0,288$ вказує на те, що величина відмінностей середніх значень двох наборів даних невелика і дорівнює 0,288 стандартного відхилення. Причиною того, що регіон м. Коростень вирізняється за середньодобовою кількістю загорання, може бути переважання агроландшафту (85 % території) на відміну від інших регіонів (див. табл. 1).

Таблиця 3. Оцінка статистичної значущості параметра «число загорань» за даними для різних регіонів в умовах нерівних дисперсіях та ймовірності помилки 5%

Статистика	Регіон метеостанції			
	Чорнобиль	Коростень	Коростень	Сарни
Кількість днів із займаннями	135	231	231	172
Середня кількість займань за добу	5,0	8,4	8,4	5,0
Стандартне відхилення	46,604	153,456	153,456	47,266
Спільне стандартне відхилення	114,1206		108,1733	
Ефект Коена (Cohen d)	0,288		0,287	
Показник значущості (p -value)	0,00114		0,00107	
Кількість ступенів свободи (df)	362		373	
t -критерій Стюдента (t -stat)	3,07		3,09	
Критичне значення (t -crit), при $\alpha = 0,05$	1,65		1,65	

⁴ Статистична значущість — це ймовірність того, що різниця між двома наборами числових даних обумовлена реальною відмінністю варіантів, що тестуються, і не є випадковою.

⁵ Інструмент аналізу даних реальної статистики (Real Statistics Data Analysis Tool).

⁶ <https://real-statistics.com>.

Таблиця 4. Оцінка статистичної значущості середньомісячних значень параметра «кількість загорань» для різних регіонів з імовірністю помилки $\leq 5\%$

Статистика	Регіон метеостанції			
	Чорнобиль	Коростень	Чорнобиль	Сарни
Кількість місяців	41	48	41	46
Середня кількість займань за місяць	117	218	117	319
Стандартне відхилення	245,832	505,849	245,832	802,393
Спільне стандартне відхилення	407,457		607,697	
Ефект Коена (Cohen d)	0,24956		0,33295	
Показник значущості (p -value)	0,1109		0,10954	
Кількість ступенів свободи (df)	70		54	
t -критерія Стюдента (t -stat)	1,23		1,62	
Критичне значення (t -crit), при $\alpha = 0,05$ (імовірність помилки 5%)	1,66		2,00	

Для випадків (період 2011–2015 рр.) із середньомісячними даними по регіонах м. Чорнобиль — м. Коростень та м. Чорнобиль — м. Сарни результати можна вважати значимими, але з імовірністю помилки близько 11 %. Результати розрахунків наведено в табл. 4.

Для двох пар даних t -stat < t -crit, p -value = 0,11 > 0,05, т. ч. застосовування p -значення та критичного значення призводить до одного й того ж висновку: в період 2011–2015 рр. з імовірністю 89 % між регіонами немає відмінностей у середньомісячній кількості загорання. Ефект Коена, що дорівнює Cohen d = 0,25 для східного та центрального регіонів, збільшується до Cohen d = 0,33 для найбільш віддалених один від одного регіонів м. Чорнобиль – м. Сарни.

Характеристики лісових пожеж — потужність випромінювання вогню (Frp) в мегаватах і температура яскравості вогняного пікселя (Brightness) у кельвінах не є статистично значимими, оскільки значення t -stat < t -crit та p -value > 0,05.

Проаналізуємо випадки з максимальним числом загорань територією агроландшафту (трав'яні пожежі) та екстремальні випадки лісових пожеж із максимальним поширенням територією.

Аналіз екстремальних випадків із максимальним числом загорань

Розглянемо випадки з максимальною кількістю загорань (трав'яна пожежа), що наведені в табл. 5 для метеостанції м. Коростень (період з 4 по 12 березня 2015 р.), у табл. 6 для метеостанції м. Сарни (період з 24 серпня по 2 вересня 2015 р.) та ситуації максимального поширення лісової пожежі.

Пожежа в агроландшафті. У період з 4 по 12 березня 2015 р. сталася велика за площею пожежа в регіоні метеостанції Коростень (див. табл. 5, рис. 5).

Для виявлення впливу метеорологічних параметрів на розповсюдження пожежі було розглянуто: 1) просторовий розподіл точок загорання з використанням супутникових даних MODIS TERRA (див. рис. 5, а), топографічної карти (див. рис. 5, б), карти типів підстильної поверхні з нанесенням точок загорання за потужністю випромінювання (див. рис. 5, в); 2) з аналізом синоптичної ситуації та оцінкою динаміки метеорологічних параметрів (рис. 6, табл. 6).

Таблиця 5. Випадок з максимальною кількістю загорань за період з 4 по 12 березня 2015 р. (9 днів) для території метеостанції м. Коростень

Рік	Місяць	День	Кількість пожеж	AvgBright	AvgFrp
2015	3	04	32	331,72	9,08406
2015	3	05	11	339,242	6,33636
2015	3	06	3	310,267	16,6667
2015	3	07	68	329,33	11,1038
2015	3	08	79	330,082	7,73494
2015	3	09	1072	330,703	9,74964
2015	3	10	548	327,709	13,6711
2015	3	11	43	325,912	7,24605
2015	3	12	85	331,818	12,2772

Примітка. AvgBright — середня протягом місяця температура яскравості вогню пікселя вимірюється в кельвінах, AvgFrp — середня за місяць потужність випромінювання вогню в мегаватах.

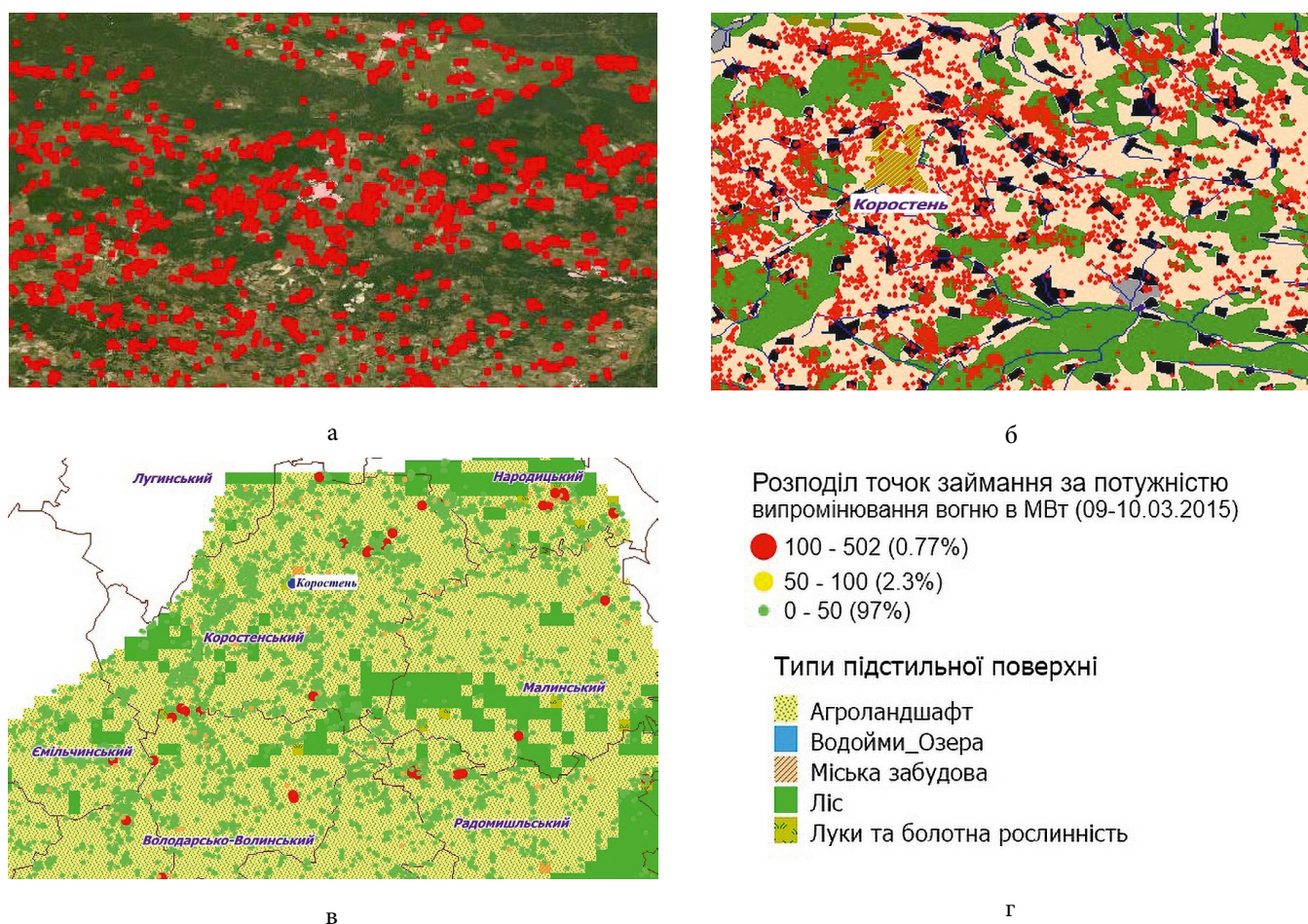


Рис. 5. Аналіз даних про поширення пожеж із використанням супутникових даних MODIS TERRA за 9–10 березня 2015 р. району з метеостанцією м. Коростень, з розподілом точок загорання за потужністю випромінювання вогню та типами підстильної поверхні

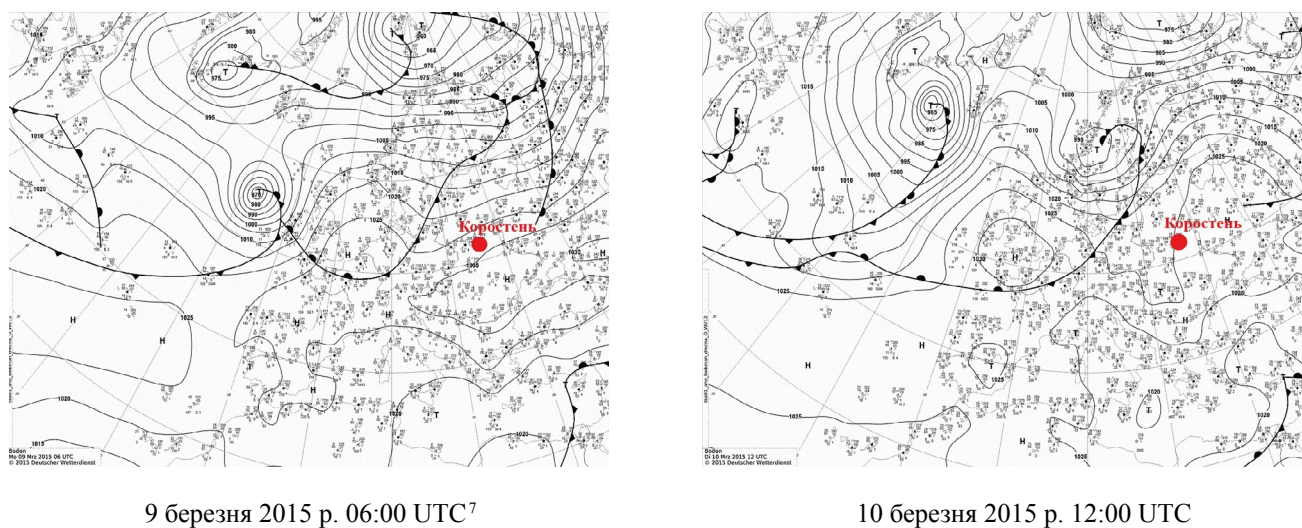


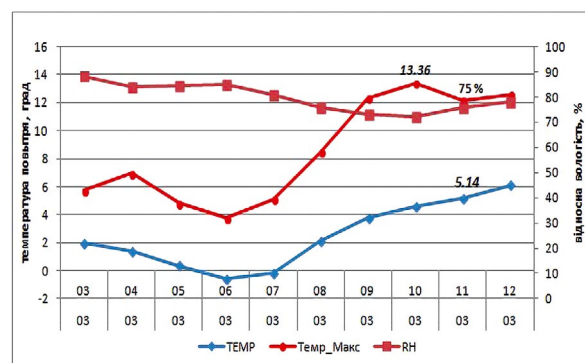
Рис. 6. Приземний аналіз синоптичних умов території Європи 9–10 березня 2015 р.

⁷ UTC — Universal Time Coordinated, міжнародний координований час, що збігається з часом за Гринвічем.

Таблиця 6. Метеорологічні параметри (а) та їхня динаміка (б) за період з 3 до 12 березня 2015 р. по м. Коростень

MONTH	DAY	TEMP	Темп_Макс	RH	RAIN
03	03	1.96	5.71	88.38	5.29
03	04	1.43	6.95	83.94	0.91
03	05	0.37	4.82	84.38	0.38
03	06	-0.54	3.76	84.75	0.25
03	07	-0.20	5.1	80.94	0.01
03	08	2.15	8.47	76.00	0.00
03	09	3.79	12.31	73.12	0.00
03	10	4.57	13.36	72.12	0.00
03	11	5.14	12.15	75.88	0.01
03	12	6.11	12.55	78.06	0.94

а



б

Примітка. Month — місяць, Day — день, TEMP — температура повітря на висоті 2 м, °C, Темп_Макс — максимальна температура, °C, RH — відносна вологість, %, RAIN — добова сума опадів, мм.

Як видно з наведених знімків, основна маса точок займання лежить на території звільнених сільсько-господарських угідь після збирання агропродукції, які розташовані поблизу сільської забудови та з часом заростають травами та чагарником. Займання сталося внаслідок підпалу трав'яного настилу для підготовки полів до переорювання для майбутніх польових робіт, яке далі поширилося на лісовий масив. Таке розташування точок займання вказує на антропогенний характер виникнення пожеж (спалювання сухої трави перед оранням землі). Крім того, величини потужності випромінювання вогню представлені в 97 % невеликими значеннями в межах 0–50 МВт, що вказує на спалах трав'яного покриву [11].

Розглянемо вплив метеорологічних умов та синоптичної ситуації на поширення пожеж територією, вільною від лісових масивів. У табл. 6 наведено основні метеорологічні параметри гідротермічного (температура та вологість) стану атмосфери та динаміки параметрів у період максимальних пожеж.

З табл. 6 видно, що на території м. Коростень з 7 по 9 березня відзначалося різке підвищення приземної температури (на 2 °C за добу для середньодобової та на 3–4 °C для максимальної температури повітря) зі швидкістю вітру близько 3 м/с та падінням відносної вологості з бездощовим періодом протягом тижня. Відповідно до аналізу архіву синоптичних карт приземного тиску [28] така динаміка метеорологічних умов була пов'язана із ситуацією, що склалася над Східною Європою та впливала на територію України, особливо на її північні області (див. рис. 6). Над Північною Атлантикою та архіпелагом Шпіцберген сформувалися потужні циклони, що з півдня були обмежені широкою

розмитою смугою високого тиску без яскраво виражених замкнених центрів. Над Азорськими островами почав зароджуватися антициклон, що рухався на захід у бік Великобританії. Протягом 9–10 березня фактично вся територія України знаходилася під впливом розмитого поля високого тиску та крайньої західної частини баричного гребеня (з ізобарою 1030 гПа). У системі північних циклонів розвинулися теплі та холодні фронти, що рухалися в системі загальної циркуляції із заходу на схід і своїми крайніми відрогами могли

Таблиця 7. Випадок із максимальним числом займань за період з 24 серпня по 3 вересня 2015 р. для території метеостанції м. Сарни

Рік	Місяць	День	Кількість пожеж	AvgBright	AvgFrp
2015	8	24	172	325,162	23,0653
2015	8	25	442	328,005	15,3598
2015	8	26	155	320,87	7,24148
2015	8	27	483	315,41	6,41874
2015	8	29	178	319,273	5,78809
2015	8	30	363	321,821	10,5418
2015	8	31	276	319,996	7,38978
2015	9	01	595	328,697	10,1872
2015	9	02	1363	321,682	10,2105
2015	9	03	161	304,05	1,52665

Примітка. AvgBright — середня протягом місяця температура яскравості вогню пікселя вимірюється в кельвінах, AvgFrp — середня за місяць потужність випромінювання вогню в мегаватах.

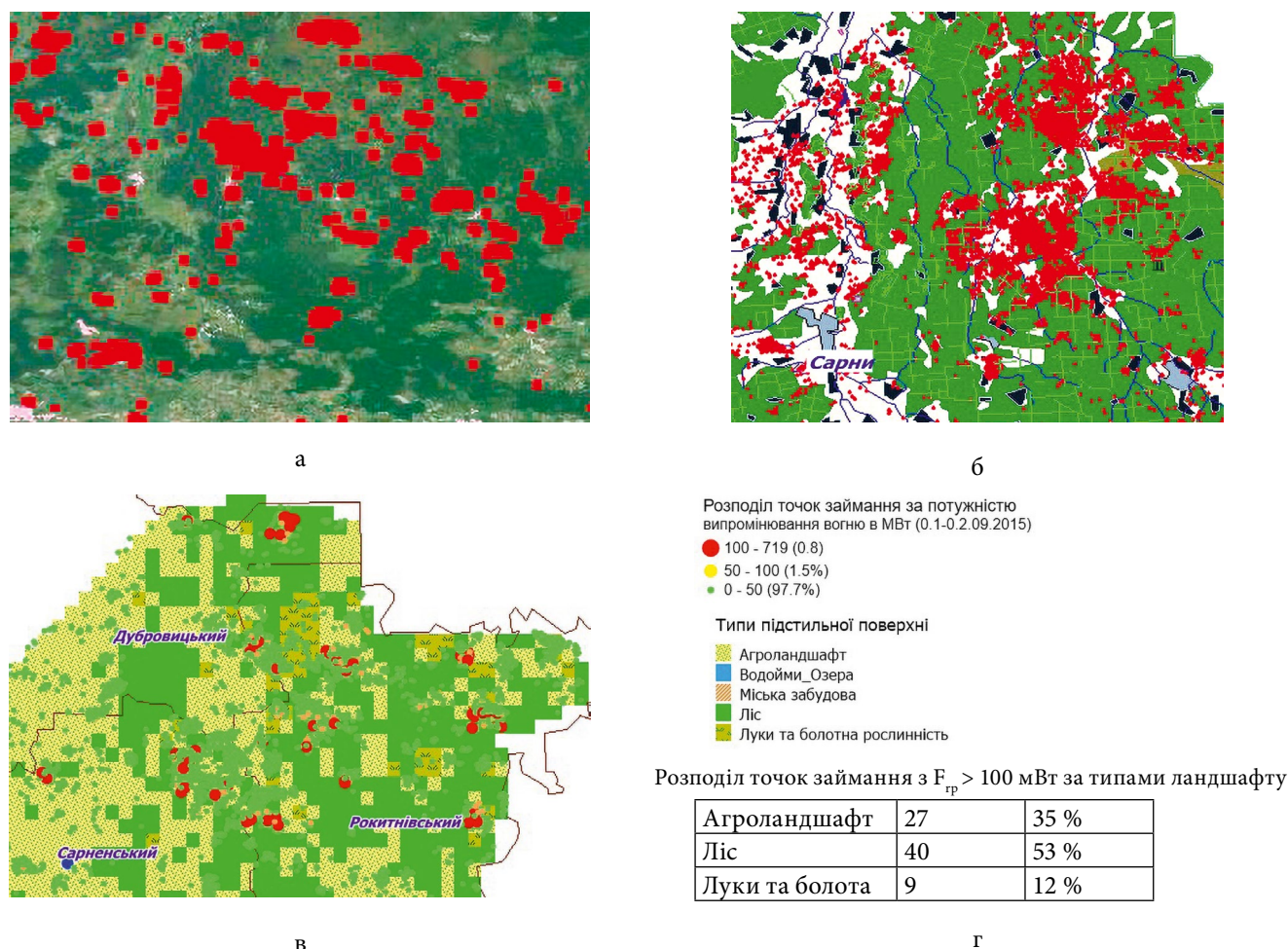


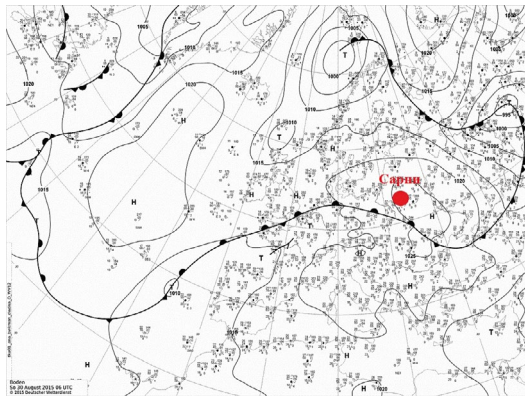
Рис. 7. Зображення, отримане за допомогою приладу супутника MODIS TERRA (а) 1–2 вересня 2015 р. району з метеостанцією м. Сарни, та представлені джерела загорання на топографічній карті (б), на тематичній карті типів підстильної поверхні з розподілом точок загорання за потужністю випромінювання вогню (в) з легендою (г)

чіпляти північні регіони України. Фактично протягом 9–10 березня північ України знаходилася під впливом малоградієнтного поля високого тиску (зі значеннями 1025–1030 гПа), що вплинуло на встановлення стійкої сухої та малохмарної погоди з переважанням теплої повітряної маси, що знаходилася в теплому секторі циклону з центром над Скандинавією. Фактично були сформовані умови, що могли сприяти високому рівню пожежонебезпеки, оскільки стійка малохмарна погода з відсутністю вологи і порівняно високими температурами могла сприяти поширенню чи виникненню пожеж.

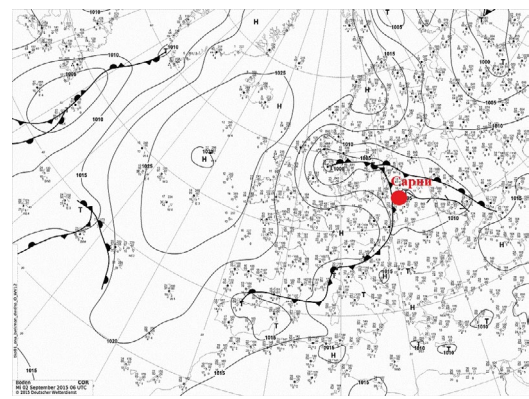
Лісова пожежа 2015 р. Розглянемо випадок (з 1 по 2 вересня) з екстремальною кількістю точок загорання територією метеостанції м. Сарни в період з 24 серпня по 3 вересня 2015 р. з описом динаміки метеорологічних умов (табл. 7), просторового розподілу точок загорання (рис. 7), синоптичної ситуації (рис. 8), які вплинули на поширення пожеж.

За супутниковими даними [23] 53 % осередків займання з потужністю випромінювання вогню понад 100 МВт (позначено червоними точками) зафіксовано на вкритих лісовою рослинністю територіях (див. рис. 7). Представлені метеорологічні характеристики та їхня динаміка (табл. 8) у зазначений період показують зростання температури як максимальної (з 27 до 36 °С), так і середньодобової (з 21 до 27 °С) при зниженні відносної вологості з 51 до 37 %. У таких «сухих та жарких» умовах за відсутності опадів та середньої швидкості вітру 2–3 м/с відбувається збільшення кількості загорань по території м. Сарни 1–2 вересня 2015 р. Слід зазначити, що річна сума опадів з 2014 р. до 2015 р. зменшилася з 522 до 369 мм/рік, що відповідає мінімуму за 40-річний період 1981–2019 рр.

Погодні умови в регіоні м. Сарни з 30 серпня по 3 вересня 2015 р. визначалися поточною синоптичною ситуацією, що склалася над Європою. Над територією



а



б

Рис. 8. Приземні карти погоди Європі за 06:00 UTC30 серпня 2015 р. (а); за 06:00 UTC2 вересня 2015 р. (б) [28]

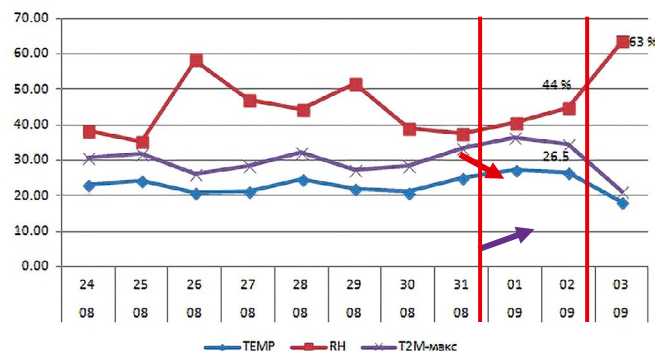
Україні це було розмите поле високого тиску з окремими замкнутими ізобарами (1020 гПа), що розділяло циклони з центрами над Данією, півднем Скандинавського півострова, північно-західними регіонами РФ та розмитою областю низького тиску над Туреччиною в кінці серпня, що змінилося полем низького тиску тилової частини циклону. До 30 серпня Україна знаходилася в тилівій частині циклону. Тоді над Центральною та Східною Європою почала формуватися замкнена ізобара з тиском 1020 гПа. Це зумовило стійку ясну малохмарну погоду над північними територіями України. З 31 серпня по 1 вересня територією України з південного-заходу на північний-схід пройшов теплий фронт; 2 вересня північні території України знаходилися в теплому секторі циклону, атмосферний тиск знизився (1010 гПа), але поле все ще було розмите. За теплим фронтом встановилася хмарна тепла

погода. Уже 3 вересня через північно-західні області України пройшов холодний фронт з притаманною йому погодою зі зливовими опадами.

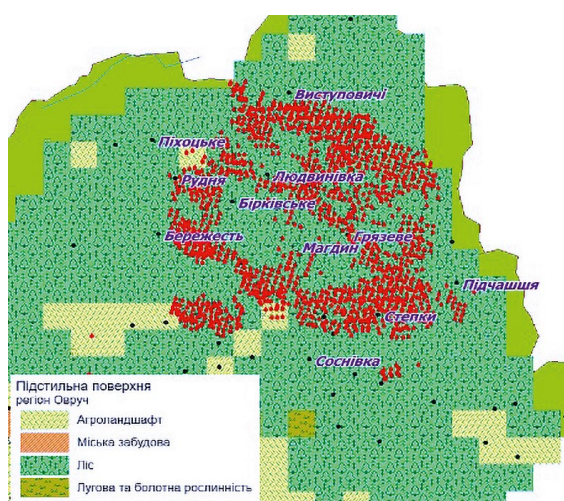
Великомасштабна лісова пожежа. На прикладі великомасштабної пожежі у Житомирській області за період з 15 по 20 квітня 2020 р. розглянемо випадок впливу швидкості вітру спільно з гідротермічними характеристиками повітря (температурою та вологістю) на поширення лісових пожеж [29–31]. Загалом пожежа знищила близько 4000 га лісу. На території шести лісництв Овруцького району масштабні лісові пожежі, що почалися 16 квітня, знищили та пошкодили 43 нежитлові та 38 житлові будинки, найбільших збитків завдано селам Нижня Рудня, Острови, Магдін та Лічмани [30–31]. Просторове поширення пожеж у лісових масивах територією Овруцького та Лугинського районів показано на карті типів підстильної поверхні (рис. 9).

Таблиця 8. Метеорологічні параметри та їхня динаміка за період з 24 серпня по 3 вересня 2015 р. на території метеостанції м. Сарни

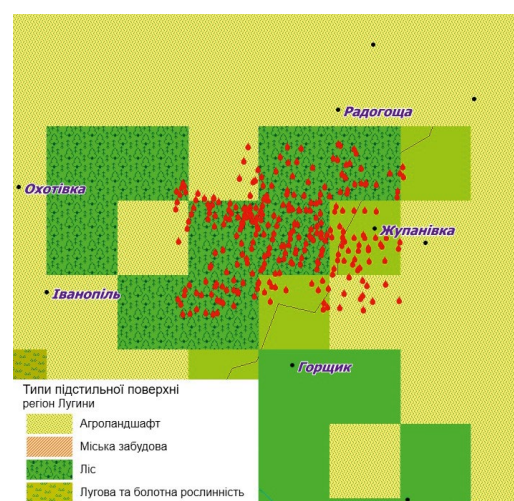
MONTH	DAY	TEMP	T2M-макс	RH	RAIN
08	24	23.03	30.65	38.31	0.00
08	25	24.31	31.96	35.44	0.00
08	26	20.94	26.14	58.25	0.94
08	27	21.40	28.51	47.00	0.00
08	28	24.76	32.4	44.38	0.00
08	29	21.98	27.48	51.75	0.03
08	30	21.05	28.59	38.94	0.00
08	31	25.17	33.33	37.38	0.01
09	01	27.19	36.37	40.50	0.00
09	02	26.52	34.62	44.81	0.01
09	03	18.23	21.13	63.56	0.76



Примітка. Month — місяць, Day — день, TEMP — температура повітря на висоті 2 м, °C, Temp_Макс — максимальна температура, °C, RH — відносна вологість, %, RAIN — добова сума опадів, мм.

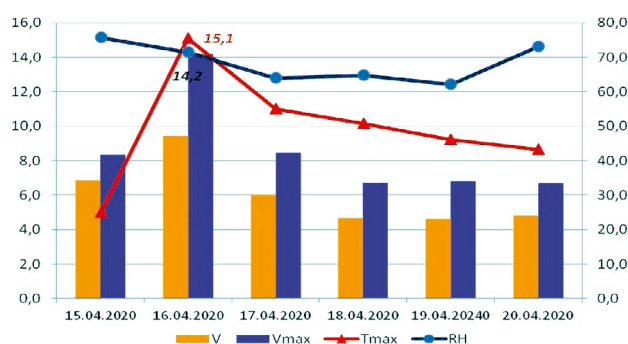


а

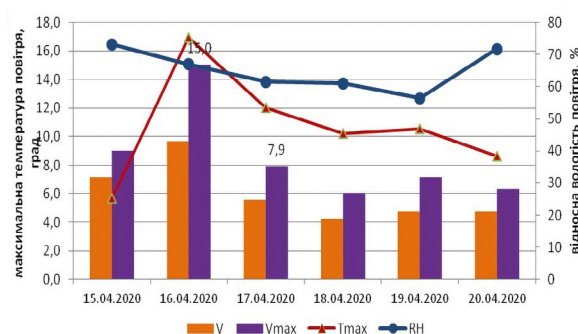


б

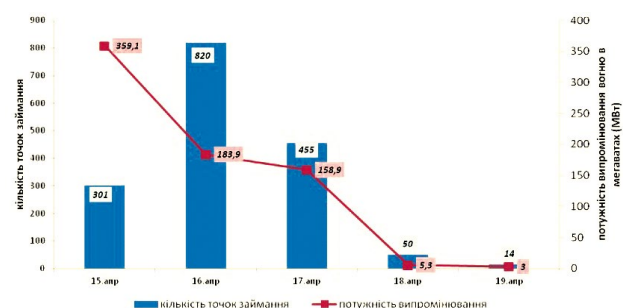
Рис. 9. Просторовий розподіл лісових пожеж у районі с. Людвинівка Овруцького району (а) та с. Радогоща Лугинського району (б) Житомирської області за період 15–20 квітня 2020 р.



а

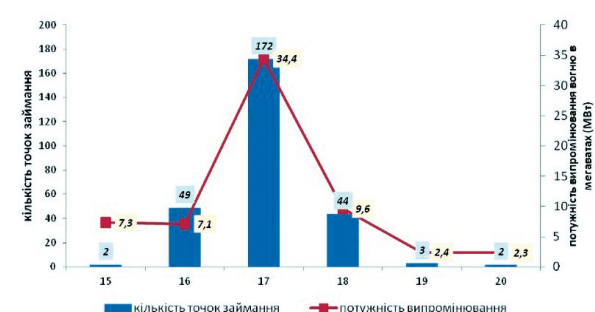


б



б

с. Людвинівка



г

с. Радогоща

Рис. 10. Динаміка метеорологічних параметрів біля земної поверхні (V — швидкість вітру, м/с; Vmax — максимальна швидкість вітру, м/с; Tmax — максимальна температура повітря, °C; RH — відносна вологість повітря, %) та характеристики пожеж (кількість точок загорання, потужності випромінювання вогню, МВт) біля с. Людвинівка Овруцького району (а, б) та с. Радогоща Лугинського району (в, г) 15–20 квітня 2020 р.

У районі с. Людвинівка загальна кількість точок займання становила 1640 на території близько 300 км² з максимумом 16 квітня — 820 точок. При цьому максимальна потужність випромінювання пожежі (359 МВт) спостерігалася 15 квітня за меншої території загорання та знизилася до 184 МВт зі збільшенням площі горіння (рис. 10, б). У Лугинському районі, біля с. Радогощі на площі близько 40 км² у цей період максимум горіння спостерігався 17 квітня (272 точки загорання) з потужністю випромінювання від місць горіння 34,4 МВт з різким зниженням наступного дня до 9,6 МВт (див. рис. 10, г). Додатково до характеристик пожеж (кількість точок займання та потужність випромінювання вогню) у цей період було розглянуто динаміку ходу метеорологічних параметрів (швидкості вітру, температури та вологості повітря), що наведені на рис. 10 для с. Людвинівка та с. Радогоща.

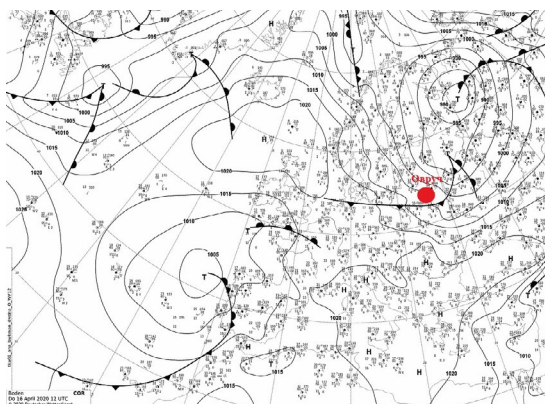
Представлені результати показують, що збільшення кількості точок займання супроводжувалося збільшенням швидкості вітру, підвищенням температури повітря та збільшенням сухості атмосферного повітря. Показано, що в період пожеж з 16 по 17 квітня 2020 р. спостерігалися найбільш сприятливі умови для поширення пожеж: максимальні швидкості вітру досягали 14–15 м/с, максимальна температура для квітня піднялася до 15 °С за відносної вологості повітря 60–65 %. Такі умови визначалися відповідною синоптичною ситуацією. До 16 квітня вся територія України перебувала в області малоградієнтного поля підвищеного тиску. На погодні умови з 16 квітня починає впливати глибокий циклон, що зсунувся із заходу в район Кольського півострова. Північні області країни знаходяться у вузькому теплому секторі відрога північно-західного циклону (рис. 11, а), що

зумовило різке потепління. Наближення та проходження протягом дня сухого холодного фронту спричинило великі швидкості вітру. Надвечір 16 квітня північні області України були за холодним фронтом. З 17 квітня (див. рис. 11, б) над усією територією України формується розмите поле підвищеного тиску між антициклоном над Скандинавією і циклоном, що заповнюється, з центром на північному сході європейської території РФ. Установлюється прохолодна малохмарна погода.

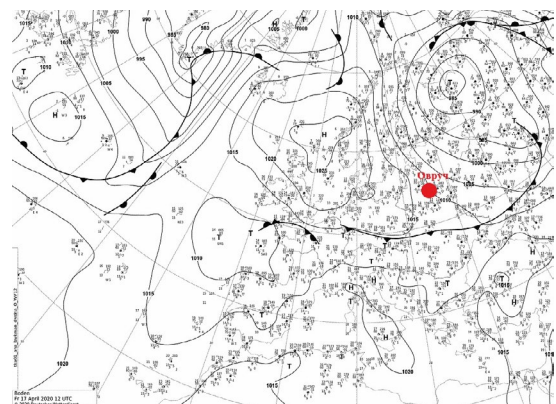
Для розглянутих випадків із максимальною площею займання на території метеостанції м. Коростень та м. Сарни проведемо порівняльний аналіз погодних показників пожежної небезпеки, розрахованих різними методами та моделями.

Показники пожежної небезпеки для розглянутих екстремальних пожеж

Оцінка пожежної небезпеки — це система, яка відображає вплив існуючих чи очікуваних значень факторів пожежної небезпеки (погодних та природних умов) у вигляді одного чи більше числових індексів, які є критеріями необхідності захисту території від пожежі. Розглянуті випадки з максимальною кількістю точок загорання були оцінені із застосуванням різних способів розрахунку показника пожежної небезпеки за погодними параметрами: FWI — метеорологічний індекс, реалізований у Глобальній моделі прогнозування пожеж ЕЦСПП (GEFF), що враховує вплив вологості палива та погодних умов на поведінку пожежі [12–14, 18]; PPO — комплексний показник пожежної небезпеки В.Г. Нестерова [15–16], який враховує метеорологічні елементи, що впливають на зміну вологості лісових



а



б

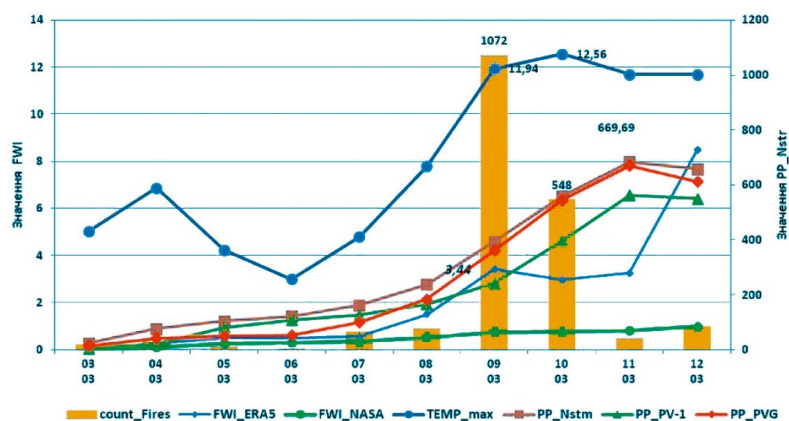
Рис. 11. Приземні карти погоди в Європі за 12:00 UTC 16 квітня 2020 р. (а), за 12:00 UTC 17 квітня 2020 р. (б)

горючих матеріалів. У наборі даних щоденних значень показники FWI були змодельовані з використанням моделі GFS (Global Forecast System — глобальна погодна модель) для оцінки пожежної небезпеки в майбутніх кліматичних сценаріях.

Для розглянутих випадків із максимальними пожежами проаналізовано динаміку поведінки погодних показників пожежної небезпеки: індексу FWI, що був розрахований за трьома кліматичними моделями [19–21], даних реаналізу ERA5 [17], за даними NASA [22]; показника В.Г. Нестерова PPO та його модифікацій [32–33] з урахуванням вологості надґрунтового покриву, з диференційованими поправками на опади за даними NASA.

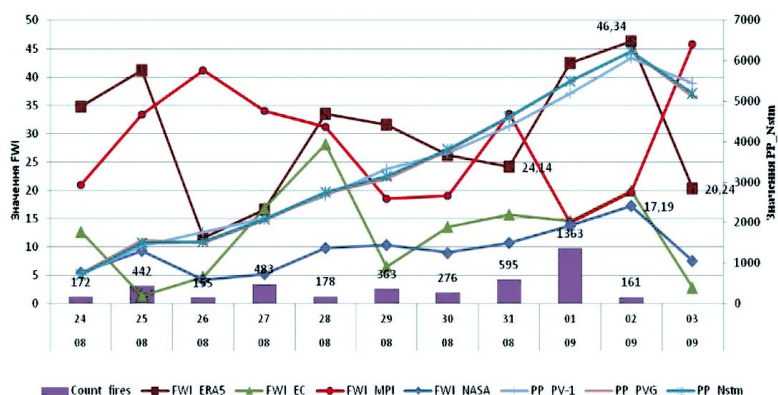
Для розрахунку індексу FWI та показника PPO використовувалися полуденні значення температури повітря, температури точки роси, відносної вологості, швидкості вітру та накопичених за 24 год опадів за поточними даними NASA [34] та спрогнозованими даними за кліматичними моделями [19]. Використовувалась авторська програма розрахунку індексу FWI та показника PPO за поточними даними NASA [14, 32]. Подана динаміка параметрів для двох ситуацій по територіях м. Коростень та м. Сарни на рис. 12 показує:

для весняного сезону (м. Коростень) значення FWI за використовуваними трьома кліматичними моделями дорівнюють постійній величині, рівній 1,0



День	FWI_ERA5	FWI_NASA
3	0,05	0,02
4	0,29	0,11
5	0,50	0,27
6	0,52	0,30
7	0,58	0,36
8	1,52	0,53
9	3,44	0,75
10	2,96	0,77
11	3,27	0,82
12	8,51	0,99

а



День	FWI_ERA5	FWI_NASA	FWI_EC	FWI_MPI
24	34,79	5,43	12,68	20,99
25	41,14	9,29	1,36	33,36
26	11,58	4,15	4,62	41,12
27	16,57	5,17	16,83	34,05
28	33,53	9,75	28,10	31,20
29	31,57	10,34	6,47	18,53
30	26,17	8,97	13,48	19,00
31	24,14	10,72	15,70	33,45
01	42,42	13,81	14,59	14,26
02	46,34	17,19	19,90	19,67
03	20,24	7,46	2,77	45,74

б

Count_fires — кількість точок загорання; FWI_ERA5 — за даними реаналізу ERA5; FWI_NASA — за поточними даними NASA; FWI_MPI — за даними кліматичної моделі Німеччини MPI-M-MPI-ESM-LR/MPI-CSC-REMO2009; FWI EC — за даними кліматичної моделі МОНС-HadGEM2-ES/MONC-HadGEM3-GA7; Temp_max — максимум температури повітря; PP Nstm — PPO В.Г. Нестерова. PV-1 — PPO з урахуванням поправок на опади; PP PVG — PPO з урахуванням гігроскопічності горючих лісоматеріалів.

Рис. 12. Динаміка індексів пожежної небезпеки (FWI, PPO) та кількість точок загорання: а — на території м. Коростень за період з 3 по 12 березня 2015 р.; б — на території м. Сарни за період з 24 серпня по 3 вересня 2015 р.

(у моделях закладено початок пожежонебезпечного періоду з квітня);

за архівними даними Reanalysis ERA5 і NASA значення різняться в кілька разів і практично не відповідають дням із максимальною кількістю точок займання (рис. 12, а);

значення показників РРО Нестерова повільно зростають відповідно до перебігу температури, але максимуми значень спостерігаються через 1–2 доби після періоду з максимальною кількістю загорання (рис. 12, а);

для літнього періоду (м. Сарни) у період пожеж динаміка значень FWI за кліматичними моделями при щоденних розрахунках не показує певного тренду, максимуми значень спостерігаються через день після пожеж як для значень FWI, так і для значень РРО (рис. 12, б);

значення FWI за архівними даними (ERA5, NASA) відрізняються одне від одного вдвічі (різні категорії пожежної небезпеки — FWI ERA5 — «дуже високий», FWI NASA — «помірний»), але в середньому відповідають динаміці пожеж із відставанням на 1 добу. Як показано в таблиці (див. рис. 12, б), виділяються два критичні дні з максимумом значень FWI за архівними даними ERA5, NASA, що відрізняється від значень, отриманих за прогностичними моделями (FWI EC, FWI MPI);

значення показника РРО В. Г. Нестерова та його модифікацій у періоди максимальних пожеж не відрізнялися за величиною (високий рівень пожежної небезпеки) та лінійно відповідно до температури повітря у 15 °C зростали до 3 вересня 2015 р., а потім, зі зниженням температури на 10 °C та підвищенням вологості на 20 %, усі значення кліматичних показників різко зменшилися і пожежі припинилися.

Для розглянутих випадків пожеж у с. Людвинівка та с. Радогоща у квітні 2020 р. були розраховані модифіковані показники РРО Нестерова, які за значеннями РРО (від 400 до 1000) належать до низького рівня пожежної небезпеки. Зростання показників РРО спостерігалось з 16 по 19 квітня, а максимум місць займання відзначалося 16, 17, 18 квітня. Тому за значеннями РРО період з 16 по 19 квітня можна віднести до періоду з низьким рівнем пожежної небезпеки.

Таким чином, показники пожежної небезпеки за метеорологічними параметрами (модифіковані варіанти показника РРО В. Г. Нестерова) найбільш адекватно описують динаміку пожежної небезпеки за архівними та поточними даними (ERA5, NASA)

у періоди максимальних пожеж з максимумом протягом двох діб.

Висновки

За обробленими даними про пожежі за період 2006–2022 рр. по території Українського Полісся річна кількість пожеж збільшилась у три рази, а площі загорання у 12 разів, досягаючи в окремі роки від 800 км² у м. Коростень (2014 р., 2020 р.) до 2200 км² у м. Сарни (2015 р.). Зазначено збільшення кількості днів з пожежами кожні 10 років на 50–60 діб для території обраних регіонів метеостанцій. Найбільша кількість займань характерна для регіонів, у яких переважають площі з агроландшафтами. Для всієї території дослідження частка займань в агроландшафтах у середньому становить до 67 % від загальної кількості випадків за 2006–2022 рр.

Проведена оцінка статистичної значущості відмінностей у середньодобовій та в середньомісячній кількості займань на територіях окремих регіонів показує просторові відмінності розглянутих характеристик пожеж. Причиною того, що регіон м. Коростень вирізняється за середньодобовою кількістю займань, може бути переважання агроландшафту (від 86 до 93 % території в різні роки) на відміну від інших регіонів (див. табл. 2).

У роботі було розглянуто випадки періодів з максимальною кількістю точок загорання в період пожеж та проведено аналіз метеорологічних умов та синоптичних ситуацій для регіонів, що розглядаються. Отримані результати демонструють вплив погодних умов на характер та територіальне поширення точок займання. Відзначається вплив великомасштабних факторів (малоградієнтне баричне поле антициклонічного типу або проходження холодного фронту з підвищеними швидкостями вітру) та місцевих локальних умов (тип регіонального землекористування) на рівень пожежної небезпеки території регіону.

Оскільки періоди та території пожеж невеликі, розглядати та робити оцінку пожежної небезпеки з використанням даних глобальних моделей недоцільно. Прогнозовані за кліматичними моделями CORDEX дані FWI можна розглядати як середньомісячні або сезонні прогнози для оцінки тренду показника пожежної небезпеки на майбутнє на наступні 3–5 років. Оцінка пожежної небезпеки з використанням показника РРО вимагає додаткових досліджень на більш широкому матеріалі з проведенням статистичного аналізу всіх використовуваних чинників.

Список використаної літератури

- Wildfires under climate change. A burning issue / A. Dowdy, L. Purcell, S. Boulter, L. C. Moura. – Report. UN environment programme frontiers, 2022. – Available at: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/38061/Frontiers_2022CH2.pdf.
- Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013 / W.M. Jolly, M.A. Cochrane, P.H. Freeborn, Z.A. Holden [et al.] // *Nature Communications*. – 2015. – Vol. 6. – Art. 7537. – doi.org/10.1038/ncomms8537.
- Ukraine Forest Fire Report 2010 // *International Forest Fire News (IFFN)*. – 2010. – No. 40 (July–December). – P. 61–75.
- Ходаков В. Е. Лесные пожары: методы исследования: монография / В. Е. Ходаков, М. В. Жарикова. – Херсон : Гринь Д. С., 2011. – 470 с.
- Ковриго В. П. Почвоведение с основами геологии / В. П. Ковриго, И. С. Кауричев, Л. М. Бурлакова. – Москва : Колос, 2000. – 416 с.
- Швиденко А. З. Уразливість лісів України до зміни клімату: монографія / А. З. Швиденко, І. Ф. Букша, С. В. Краковська. – Київ : Ніка-Центр, 2018. – 184 с.
- Гончаренко Л. Как изменение климата отразится на украинских лесах. – Режим доступа: <https://ecopolitic.com.ua/news/kak-izmenenie-klimata-otrazitsya-na-ukrainskih-lesah>.
- Kasischke E. S. Recent changes in the fire regime across the North American boreal region – Spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska / E. S. Kasischke, M. R. Turetsky // *Geophysical Research Letters*. – 2006. – Vol. 33. – L09703. – doi.org/10.1029/2006GL025677.
- Stocks B. J. Large forest fires in Canada, 1959–1997 / B. J. Stocks [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 108 (D1). – P. 8149. – doi.org/10.1029/2001JD000484.
- Rigo D. Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty / D. Rigo, G. Libertà, T. Houston Durrant [et al.]. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2017. – doi.org/10.2760/13180, JRC108974.
- Виявлення і моніторинг потенційно небезпечних пожеж на території України за даними супутникового сканування / А. В. Орещенко, В. І. Осадчий, М. В. Савенець, В. О. Балабух // *Вісник НАН України*. – 2020. – № 11. – С. 33–44. – doi.org/10.15407/vsn2020.11.033.
- Van Wagner C. E. The development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Technical Report 35/ C. E. Van Wagner // Ottawa, Ont., Can. : Canadian Forest Service, 1987.
- European Fire Danger Application: Product User Guide. – Official reference number service contract: 2018/C3S_422_Lot2_TEC/SC2. climate.copernicus.eu.
- Van Wagner C. E. Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Technical Report 33/ C. E. Van Wagner, T. L. Pickett // Ottawa, Ont., Can. : Canadian Forest Service. – 1985.
- Нестеров В. Г. Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса / В. Г. Нестеров, М. В. Гриценко, Т. А. Шабунина // *Метеорология и гидрология*. – 1968. – № 9. – С. 102–104.
- Софронов М. А. Оценка пожарной опасности по условиям погоды с использованием метеопрогнозов / М. А. Софронов, Т. М. Софронова, А. В. Волокитина // *Лесное хозяйство*. – 2004. – № 6. – С. 31–32. – Режим доступа: http://forest.akadem.ru/Articles/04/sofronov_1.pdf.
- ERA5-based global meteorological wildfire danger maps / C. Vitolo, F. Di Giuseppe, C. Barnard [et al.] // *Sci. Data*. – 2020. – Vol. 7. – P. 216. – <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0554-z>.
- Lawson B. D. Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System / B. D. Lawson, O. B. Armitage // Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre. – Edmonton, AB, 2008. – 84 p.
- Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store: Fire danger indicators for Europe from 1970 to 2098 derived from climate projection. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). – 2020. – doi.org/10.24381/cds.ca755de7.
- CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4 // Report meteorology and climatology. – 2014. – No. 116.
- Bukovsky M. S. Regional climate change projections from NA-CORDEX and their relation to climate sensitivity / M. S. Bukovsky, L. O. Mearns // *Climatic Change*. – 2020. – Vol. 162. – P. 645–665. – doi.org/10.1007/s10584-020-02835-x.
- The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications: Version 2 (MERRA-2) / Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J [et al.] // *J. Climate*. – 2017. – Vol. 30 (14). – P. 5419–5454. – doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.
- Fire Information for Resource Management System (FIRMS). Product Title: MODIS / Aqua+Terra Thermal Anomalies / Fire locations 1 km FIRMS V0061 NRT (Vector data). – doi.org/10.5067/FIRMS/MODIS/MCD14DL.NRT.0061.
- Giglio L. The Collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire product / L. Giglio, W. Schroeder, C. O. Justice // *Remote Sensing of Environment*. – 2016. – Vol. 178. – P. 31–41.
- Lazarev M. M. Justification of the possibility of the fuel wood usage from the northern areas of Polissya / M. M. Lazarev,

- L. M. Otreshko, O. V. Kosarchuk [et al.] // Problems of Chornobyl Exclusion Zone. – 2018. – Vol. 19. – P. 46–57.
26. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України (ОСПУ-2005). – Київ, 2005.
27. Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chornobyl accident: Part 2. Strontium-90 transfer to culinary grains and forest woods from soils of Ivankiv district / I. Labunska, S. Levchuk, V. Kashparov [et al.] // Environment International. – 2021. – Vol. 146. – No. 1. – Art. 106282.
28. Deutschen Wetterdienst – DWD. – Available at: https://www.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html.
29. Наслідки весняних пожеж у Лугинському лісгоспі. – Режим доступу: <https://epl.org.ua/announces/naslidky-vesnyanyh-pozhezh-u-lugynskomu-lisgospi/>.
30. Лісові пожежі в Житомирській області перекинулися на села, людей евакуюють. – Режим доступу: https://lb.ua/society/2020/04/18/455634_lesnie_pozhari-zhitomirskoy-oblasti.html.
31. У Житомирській області дев'ятий день не можуть погасити лісову пожежу, викликану підпалом сухої трави. – Режим доступу: https://lb.ua/society/2020/04/12/455116_zhitomirskoy-oblast_devyatiy_den.html.
32. Глаголев В. А. Алгоритм краткосрочного прогноза / В. А. Глаголев // Региональные проблемы. – 2018. – Т. 21. – № 1. – С. 37–41.
33. Gubenko I. M. Comparative analysis of methods for calculating fire hazard indices / I. M. Gubenko, K. G. Rubinstein // Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation. – 2012. – No. 347. – P. 207–222.
34. NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER). – Available at: <https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer>.

into account the influence of meteorological factors and local conditions of the area. A statistical analysis of the characteristics of forest fires on the territory of 6 regions, assigned by weather stations, was carried out, based on the processed data (total data for the month, year) on fires for the period from 2006 to 2022. The following was noted: 1) the annual number of fires increased by 3 times, and the burning area by 12 times, reaching in certain years from 825 km² (2014, 2020) to 1,653 km² (2015); 2) the largest number of fires was observed on the territory of the agricultural landscape, in general from 70% to 90% of the area of the region. Over a relatively short period (16 years), the dynamics of the growth of the annual sums of burned areas is noted. Extreme cases with the maximum number of ignition points (from 1,500 to 1,800) with an area of up to 100–120 km² in the territory of the Korosten and Sarny weather stations are described with a detailed analysis of weather conditions. Copernicus data used: three global climate datasets, fire characteristics data and four fire danger indices to analyze the use of fire weather indicators to assess fire danger in extreme cases. The influence of meteorological conditions and the synoptic situation on the spread of fires in the territory free from forest massifs is described using the archive of synoptic maps for the European territory and modern technologies of geoinformation systems. The influence of large-scale natural factors and local conditions on the level of fire danger of the territory of the region under consideration is noted. The results of the executed research and the possibility of using weather indicators of fire danger, obtained using archival data or climate models, will allow improving estimates of secondary radioactive pollution of the environment due to forest fires in the Exclusion Zone.

Keywords: natural fires, fire danger index, statistical analysis of fire characteristics, climate models, satellite information, meteorological situation, radionuclides.

**T. D. Lev, V. M. Piskun, Yu. V. Yatsenko,
I. P. Shedemenko**

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

Comprehensive Analysis of Forest Fires Characteristics and Meteorological Conditions Affecting their Spread in the Territory of Ukrainian Forests for the Period 2006–2022

The spatio-temporal characteristics of natural fires on the territory of Ukrainian Polissia were studied, taking

References

1. Dowdy A., Purcell L., Boulter S., Moura L. C. (2022). *Wildfires under climate change. A burning issue. UN environment programme frontiers. Report*. Available at: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/38061/Frontiers_2022CH2.pdf.
2. Jolly W. M., Cochrane M. A., Freeborn P. H., Holden Z. A., Brown T. J., Williamson G. J., Bowman D. M. J. S. (2015). Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, vol. 6, art. 7537. doi.org/10.1038/ncomms8537.

3. Ukraine Forest Fire Report 2010 (2010). *International Forest Fire News (IFFN)*, vol. 40 (July-December), pp. 61–75.
4. Khodakov V. E., Zharikova M. V. (2011). *Lesnye pozhary: metody issledovaniia* [Forest Fires: Research Methods]. Kherson: Grin D. S., 470 p. (in Rus.)
5. Kovrigo V. P., Kaurichev I. S., Burlakova L. M. (2000). *Pochvovedenie s osnovami geologii* [Soil Science with Basics of Geology]. Moscow: Kolos, 416 p. (in Rus.)
6. Shvydenko A. Z., Buksha I. F., Krakovska S. V. (2018). *Urazlyvist lisiv Ukrainy do zminy klimatu* [Vulnerability of Ukrainian forests to climate change]. Kyiv: Nika-Tsentr, 184 p. (in Ukr.)
7. Goncharenko L. *Kak izmenenie klimata otrazitsia na ukrainskikh lesakh* [How climate change will affect Ukrainian forests]. Available at: <https://ecopolitic.com.ua/news/kak-izmenenie-klimata-otrazitsya-na-ukrainskikh-lesah/Ecopolitic.com.ua>. (in Rus.)
8. Kasischke E. S., Turetsky M. R. (2006). Recent changes in the fire regime across the North American boreal region – Spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska. *Geophysical Research Letters*, vol. 33, L09703. doi.org/10.1029/2006GL025677.
9. Stocks B. J. [et al.] (2002). Large forest fires in Canada, 1959–1997. *J. Geophys. Res.*, vol. 108(D 1), p. 8149. doi.org/10.1029/2001JD000484.
10. Rigo D., Libertà G., Houston Durrant T., Artés Vivancos T., San-Miguel-Ayán J. (2017). *Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi.org/10.2760/13180, JRC 108974.
11. Oreshchenko A. V., Osadchyi V. I., Savenets M. V., Balabukh V. O. (2020). Vyivlennia i monitorynh potentsiino nebezpechnykh pozhezh na terytorii Ukrainy za danymy suputnykovoho skanuvannia [Detection and monitoring of potentially dangerous fires on the territory of Ukraine based on satellite scanning data]. *Visnyk NAN Ukrainy [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]*, no. 11, pp. 33–44. doi.org/10.15407/vsn2020.11.033. (in Ukr.)
12. Van Wagner C. E. (1987). *The development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Technical Report 35. Ottawa, Ont., Can.: Canadian Forest Service, 1987.
13. European Fire Danger Application: Product User Guide (2018). Official reference number service contract: 2018/C3S_422_Lot2_TEC/SC2.climate.copernicus.eu.
14. Van Wagner C. E., Pickett T. L. (1985). *Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Technical Report 33, Ottawa, Ont., Can.: Canadian Forest Service, 1985.
15. Nesterov V. G., Gritchenko M. V., Shabunina T. A. (1968). *Ispolzovanie temperatury tochki rosy pri raschete pokazatel'ia gorimosti lesa* [Use of the dew point temperature when calculating the flammability index of the forest]. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Meteorology and hydrology], no. 9, pp. 102–104. (in Rus.)
16. Sofronov M. A., Sofronova T. M., Volokitina A. V. (2004). *Otsenka pozharanoi opasnosti po usloviyam pogody s ispolzovaniem meteoprognozov* [Assessment of fire danger according to weather conditions using weather forecasts]. *Lesnoye khozyaistvo* [Forestry], vol. 6. pp. 31–32. Available at: http://forest.akadem.ru/Articles/04/sofronov_1.pdf. (in Rus.)
17. Vitolo C., Di Giuseppe F., Barnard C., Coughlan R., San-Miguel-Ayán J., Libertà G., Krzeminski B. (2020). *ERA5-based global meteorological wildfire danger maps*. *Sci. Data*, vol. 7, p. 216. doi.org/10.1038/s41597-020-0554-z.
18. Lawson B. D., Armitage O. B. (2008). *Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System*. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre – Edmonton, AB, 84 p.
19. Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store (2020). *Fire danger indicators for Europe from 1970 to 2098 derived from climate projection*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi.org/10.24381/cds.ca755de7.
20. CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4 (2014). *Report meteorology and climatology*, vol. 116.
21. Bukovsky M. S., Mearns L. O. (2020). Regional climate change projections from NA-CORDEX and their relation to climate sensitivity. *Climatic Change*, vol. 162, pp. 645–665. doi.org/10.1007/s10584-020-02835-x.
22. Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J. [et al.] (2017). The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, vol. 30(14), pp. 5419–5454. doi.org/10.1175/jcli-d-16-0758.1.
23. Fire Information for Resource Management System (FIRMS). Product Title: MODIS / Aqua+Terra Thermal Anomalies / Fire locations 1 km FIRMS V0061 NRT (Vector data). doi.org/10.5067/FIRMS/MODIS/MCD14DL.NRT.0061.
24. Giglio L., Schroeder W., Justice C. O. (2016). The Collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire product. *Remote Sensing of Environment*, vol. 178, pp. 31–41.
25. Lazarev M. M., Otreshko L. M., Kosarchuk O. V., Polishchuk S. V., Yoshchenko L. V. (2018). Justification of the possibility of the fuel wood usage from the northern areas of Polissya. *Problems of the Chornobyl Exclusion Zone*, vol. 19, pp. 46–57.
26. *Osnovni sanitarni pravyla zabezpechennia radiatsiinoi bezpeky Ukrainy* [Basic sanitary rules for ensuring radiation safety of Ukraine]. Kyiv, 2005. (in Ukr.)

27. Labunska I., Levchuk S., Kashparov V., Holiaka D., Yoschenko L., Santillo D., Johnston P. (2021). Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chornobyl accident: Part 2. Strontium-90 transfer to culinary grains and forest woods from soils of Ivankiv district. *Environment International*, vol. 146, no. 1, p. 106282.
28. Deutschen Wetterdienst – DWD. Available at: https://www.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html.
29. *Naslidky vesnianykh pozhezh u Luhynskomu lishospi* [Consequences of spring fires in the Luhyn forest farm]. Available at: <https://epl.org.ua/announces/naslidky-vesnyanyh-pozhezh-u-lugynskomu-lisgospi>. (in Ukr.)
30. *Lisovi pozhezhi v Zhytomyrskii oblasti perekynulysia na sela, liudei evakuiovuiut* [Forest fires in the Zhytomyr region have spread to villages, people are being evacuated]. Available at: https://lb.ua/society/2020/04/18/455634_le-snie_pozhari_zhitomirskoy-oblasti.html. (in Ukr.)
31. *U Zhytomyrskii oblasti deviatyi den ne mozhut pohasyty lisovu pozhezhu, vyklykanu pidpalom sukhoi travy* [In the Zhytomyr region, for the ninth day, they cannot extinguish a forest fire caused by setting fire to dry grass]. Available at: https://lb.ua/society/2020/04/12/455116_zhitomirskoy-oblast_devyatyi_den.html. (in Ukr.)
32. Glagolev V. A. (2018). Algorithm of short-term forecast of meteorological fire danger in the Far East on basis of global climate models. *Regionalnye problemy* [Regional problems], vol. 21, no. 1, pp. 37–41. (in Rus.)
33. Gubenko I. M. (2012). Comparative analysis of methods for calculating fire hazard indices. *Proceedings of the Hydro-meteorological Research Center of the Russian Federation*, no. 347, pp. 207–222. (in Rus.)
34. *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER)*. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer>.

Надійшла / Received 06.10.2024

Рекомендована до друку / Accepted 24.10.2024

В. К. Шинкаренко, А. М. Новіков

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

Викиди ^{137}Cs в повітря при спалюванні забрудненої біомаси. Огляд лабораторних досліджень

Ключові слова:

лісові пожежі,
лабораторне спалювання
забрудненої біомаси,
емісія ^{137}Cs з димом

Зроблено огляд літератури щодо емісії цезію під час лабораторного спалювання забрудненої біомаси та представлено результати порівняння емісії ^{137}Cs при горінні та тління, отримані авторами. Зразок лісової підстилки, зібраної в Чорнобильській зоні відчуження, спалювали в спеціально сконструйованій печі в режимах полум'я і тління. Під час полум'яного спалювання на аерозольному фільтрі було зареєстровано 8,4 % активності ^{137}Cs , тоді як під час тління з іншої частини того ж зразка в повітря було вивільнено менше 1 %. Результат добре узгоджується з відомими літературними даними і демонструє сильну залежність викидів ^{137}Cs від режиму горіння. Виявлені розбіжності в літературних даних щодо коефіцієнтів емісії можуть бути обумовлені різницею в дисперсному складі досліджуваних фракцій диму, а також використанням дещо некоректної методики визначення активності емісії по залишковій активності золи, при якій всі втрати активності в ході експерименту автоматично відносяться до емісії з димом. Зроблено висновки, що за різних початкових умов лісової пожежі коефіцієнти емісії ^{137}Cs навіть для однієї і тієї ж ділянки лісу можуть суттєво відрізнятися.

Вступ

Лісові пожежі та спалювання біомаси супроводжуються викидами в атмосферу аерозольних частинок, вуглекислого та чадного газів, а також парів широкого спектру органічних сполук [1, 2]. На радіоактивно забруднених територіях пожежі можуть спричинити викиди акумульованих радіонуклідів, що становить потенційну небезпеку. Оцінка таких викидів в атмосферу [3–8] та їхніх радіоекологічних наслідків як на місцевому, так і на глобальному рівнях є предметом активних досліджень [9–16].

Спалювання біомаси є одним з найпотужніших джерел генерації аерозольних часток у світі, яке ретельно вивчається з точки зору його радіаційного, геохімічного та екологічного впливу. Ці дослідження проводились у різних формах, включаючи лаборатор-

ні спалювання, натурні експерименти, дистанційне зондування й моделювання. Однак різноманітність методів дослідження ускладнює порівняння та аналіз результатів [17].

Аналогічна ситуація спостерігається і в галузі дослідження викидів радіонуклідів під час лісових пожеж на забруднених територіях. Зокрема, для ^{137}Cs , одного з головних компонентів радіоактивного забруднення біосфери, літературні дані про його частку, що потрапляє в атмосферу під час лісових пожеж, розходяться більш ніж на порядок. У роботі [3] проводили лабораторне спалювання різних видів палива рослинного походження з домішкою стабільного ^{133}Cs . У результаті викид цезію в атмосферу під час лісової пожежі було оцінено в 40–70 % від його вмісту в паливі. В іншій роботі, де теж у лабораторних умовах спалювали лісовий опад, збагачений ^{133}Cs ,

© В. К. Шинкаренко, А. М. Новіков, 2024. Ліцензія CC BY 4.0

у зібраних аерозольних частках було зафіксовано рівень викиду ^{137}Cs від 1 до 2,5 % [4].

Необхідно відзначити, що значний розкид даних про викид в атмосферу під час лісових пожеж та спалювання біомаси спостерігається також і для більш поширеного і більш дослідженого хімічного аналога цезію — калію. Так, середні значення викиду калію для позатропічних лісів згідно з літературними даними, наведеним в огляді [18], коливаються від 0,08 до 0,41 г на 1 кг палива.

Метою цієї роботи є огляд літературних даних щодо викидів цезію при спалюванні забрудненої біомаси та експериментальна перевірка впливу режиму горіння на ефективність цього процесу.

Матеріали та методика експерименту

Для дослідження була використана проба лісової підстилки із зони відчуження ЧАЕС, відібрана поблизу с. Копачі. Проба після витримання в сухому приміщенні й досягнення повітряно-сухої вологості була старанно перемішана і розділена на кілька частин масою 50–60 г. Після визначення активності ^{137}Cs за допомогою напівпровідникових спектрометрів *SBS* та *Canberra* частини проби були спалені в умовах полум'яного та тліючого режимів горіння в спеціально виготовленій пічці, що забезпечувала повне уловлювання димових часток на пористому скляному фільтрі [19]. Для створення полум'яного режиму горіння пробу розпушували й запалювали знизу крізь колосникову сітку. Для забезпечення ж переважно тліючого горіння пробу злегка обтискували, під пробу на колосникову сітку вкладали аркуш цигаркового паперу, а саму пробу підпалювали зверху.

Результати та обговорення

Виявлені в літературі дані щодо лабораторних визначень атмосферних викидів цезію при спалюванні забруднених матеріалів рослинного походження наведено в табл. 1. Спробуємо пояснити наявні розбіжності визначень відсотків викиду цезію. Здавалося б, що завдяки контрольованим умовам лабораторного спалювання, результати, одержані різними дослідниками, повинні були б бути більш близькими. На наш погляд, існує кілька причин таких розбіжностей.

Насамперед це невизначеність терміну «викид з димом». Справа в тому, що аерозольні частки в димі від спалювання органічних решток являють собою складну суміш часток різного розміру. Вони включа-

ють субмікронні частки конденсаційного походження, більш крупні агрегати таких часток (зазвичай діаметром до 2,5–15 мкм), грубі (2–20 мкм) та гігантські частки попелу діаметром до міліметра і більше [1, 17]. Субмікронні частки можуть транспортуватися потоками повітря на великі відстані, тоді як гігантські частки попелу випадають, як правило, поблизу місця пожежі. Залежно від мети дослідження і конструкції обладнання термін «викид з димом» може стосуватись різних фракцій аерозольних часток від часток певного розміру і до всього, що не залишилося в золі і вважається викинутим з димом.

Уловлювання аерозольних часток поблизу зони горіння, залежно від конструктивних особливостей лабораторної установки, може супроводжуватись захопленням на фільтр певного відсотка часток золи. Зважаючи на більш високу питому активність ^{137}Cs в золі та відносно велику масу таких часток, це явище може призвести до суттєвого завищення відсотка викинутого ^{137}Cs .

При визначенні відсотка викиду за залишком у золі до викиду з димом, разом із власне димовими аерозольними частинками, зараховуються також усі частинки попелу, що покинули зону горіння. Існує також ризик завищення результатів через втрати частини золи на етапі від завершення спалювання до вимірювання її активності. Деяка кількість золи неминуче залишається в контейнері для спалювання, частина може бути втрачена під час пересипання, а в умовах відкритого спалювання частина золи може бути рознесена вітром. Як видно з таблиці, незважаючи на ці недоліки, цей метод набув широкого поширення завдяки простоті технічної реалізації.

З таблиці видно, що автори деяких робіт замість дослідження поведінки ^{137}Cs досліджували поведінку стабільного ізотопу ^{133}Cs . Як відомо, єдиний стабільний ізотоп ^{133}Cs у природі є досить рідкісним розсіяним елементом. Його концентрація в ґрунтах і рослинності зазвичай дуже низька, коливаючись у межах $<1\div30$ мг/кг для ґрунтів і $<0,1\div3$ мг/кг для рослинності [18]. Серед великої кількості техногенних радіоактивних ізотопів цезію – в основному продуктів поділу важких ядер – лише три мають періоди піврозпаду більше 2 років. Це ^{135}Cs з періодом напіврозпаду 1,33 млн років, ^{137}Cs з періодом напіврозпаду 30,1671 року і ^{134}Cs з періодом напіврозпаду 2,0652 року. З них найбільш важливим у радіологічному відношенні є ^{137}Cs , оскільки внаслідок повільного розпаду активності ^{135}Cs занадто малі, а ^{134}Cs , навіть після Фукусімської аварії, на цей час у навколишньому середовищі практично відсутній [21].

Порівнюємо співвідношення мас ^{137}Cs та ^{133}Cs у зразку сухої рослинної маси, що містить 50 мг/кг стабільного ^{133}Cs із забрудненням ^{137}Cs до рівня 100 кБк/кг. Оскільки активність 1 г ^{137}Cs становить $3,215 \cdot 10^{12}$ Бк [22], маса ^{137}Cs з активністю 100 кБк $\approx 31,3$ нг, а співвідношення мас $^{133}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ відповідно ≈ 1600 . Звідси випливає, що загальний вміст атомів цезію у зразках ґрунтів чи рослинності від рівня забруднення радіоактивним цезієм не залежить. Хімічні властивості атомів стабільного та радіоактивного цезію однакові. Але оскільки під час аварійного викиду радіоактивного цезію склад його сполук кардинальним чином відрізнявся від сполук стабільного цезію в навколишньому середовищі, то поведінка цих ізотопів у початковий період теж буде різною. З плином часу процеси міграції та ізотопного обміну наблизяться до рівноважного розподілу. Для ізотопів цезію цей процес виявився досить-таки повільним — з часу Чорнобильської аварії вирівнювання співвідношень $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ в ґрунті і рослинності ще не відбулося.

Якщо вважати, що практично весь цезій потрапив до складу біопалива через кореневе надходження, то з цієї точки зору цезій у складі біопалива вже термалізований — хімічні властивості сполук його ізотопів тотожні. Але на сьогодні ще зберігається ймовірність знаходження в складі палива гарячих часток із зовсім іншим складом і, відповідно, властивостями.

Установлено, що відсоток викинутого в атмосферу цезію значно зростає з підвищенням температури спалювання чи нагрівання золи [3, 5, 17, 24, 25]. Очевидно, це пов'язано з процесами утворення та випаровування летких сполук цезію з подальшою

конденсацією їхніх парів на аерозольних частках по мірі охолодження диму. Такими леткими і стійкими за характерних для полум'я умов сполуками цезію насамперед є його галогеніди. На рис. 1 представлено залежності тиску насичених парів галогенідів деяких лужних металів від температури. Бачимо, що галогеніди цезію більш леткі порівняно з елементами аналогами — калієм і рубідієм і що найбільш летким серед них є йодид цезію. Щоправда, ймовірність утворення такої сполуки досить мала, враховуючи низьку концентрацію атомів йоду в навколишньому середовищі. З огляду на більшу поширеність атомів хлору порівняно з бромом і йодом при згорянні палива найбільш імовірним є утворення CsCl з подальшим потраплянням в атмосферу у вигляді парів та їхньою конденсацією на аерозольних частках. Схожим чином ведуть себе також сполуки калію й рубідію. Так, серед неорганічних видів викидів, як правило, домінують лужні землі та галогеніди. Згідно з даними лабораторних спалювань калій знаходиться у формі переважно KCl з незначним внеском K_2SO_4 . На калій та хлорид припадає по 2–5 % маси тонкодисперсних частинок. Висловлено припущення, що хлорид калію присутній в ядрі частинок диму з чорним вуглецем. Сірка у формі сульфату також присутня на рівні ~ 1 % від маси дрібнодисперсних частинок [27, 28].

Серед інших летких сполук цезію в процесі переробки опроміненого ядерного палива виявлено його пертехнетат CsTcO_4 з температурою плавлення 590°C [24]. Але на відміну від ядерного палива в забрудненій радіонуклідами лісовій рослинності ізомери технецію якщо й присутні, то в незрівнянно малих кількостях, порівнюючи навіть зі стабільним йодом.

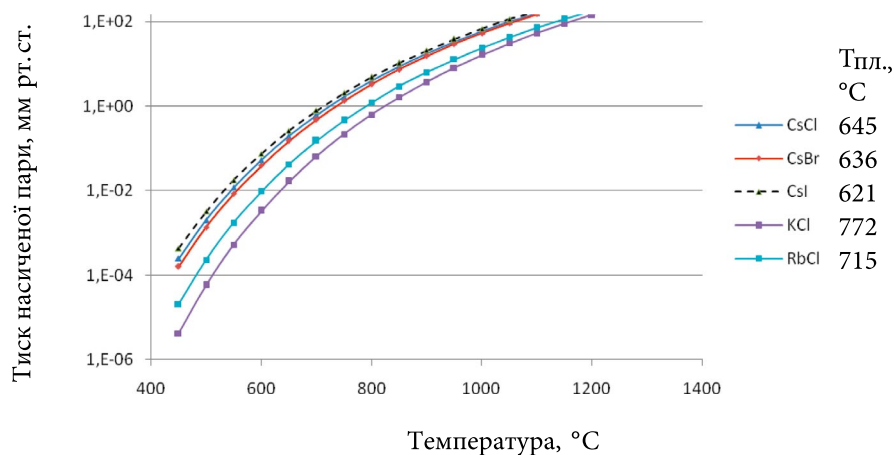


Рис. 1. Залежність тиску насиченої пари галогенідів деяких лужних металів від температури [26]. Поряд з формулою сполуки наведена її температура плавлення

Результати визначення частки викинутих в атмосферу радіонуклідів при спалюванні біомаси

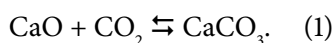
Об'єкт дослідження	Методика дослідження	Спосіб визначення	Цезій у повітрі, %	Літ.
Дерево, сосна, дошки з корою, окроплені розчином солі ^{133}Cs перед спалюванням	Додавання стабільного ^{133}Cs до палива. Відкрите спалювання. Дрова — вогнище у великому контейнері, солома — валок з контейнерами для збору золи під валком	Вміст ^{133}Cs у паливі мінус вміст у золі	89	3
Дерево, осика, дошки з корою, окроплені розчином солі ^{133}Cs та витримані протягом доби перед спалюванням			44	
Солома (три спалювання)			7; 60; 35	
Сумарна оцінка викиду при спалюванні рослинності під час польової пожежі (деревина, солома, торф та зелені рослини)	Додавання стабільного ^{133}Cs до палива. Лабораторне спалювання в муфельній пічці при контрольованій температурі		40–70	
Забруднені лісові горючі матеріали	Спалювання в пічці, відбір частини димового потоку	Об'ємна активність ^{137}Cs у димі	3–5*	8
Поверхнева підстилка та гілки	Спалювання малих наважок (≈ 50 мг) забруднених матеріалів у трубчатій печі при 800°C	Активність ^{137}Cs в аерозольних частках	45 ± 7	5
Гілки вільхи			77 ± 9	
Листя вільхи			92 ± 5	
Органічний ґрунт			$2,4 \pm 0,5$	
Хвоя сосни	Додавання стабільного ^{133}Cs до палива. Відкрите спалювання в спеціальному приміщенні, відбір аерозолію на висоті 15 м	^{133}Cs на фільтрі	1–2,5	4
Торф, тління			0	
Хвоя сосни		Вміст ^{133}Cs у паливі мінус вміст у золі	40–50	
Бореальний ліс. Суха лісова підстилка	Моделювання умов верхової пожежі, нагрівання зразка інфрачервоним випромінюванням	Активність ^{137}Cs в паливі мінус активність у золі	29	6
Органічний ґрунт (потенційно можливі значення)			< 37	
Органічний ґрунт (вміст кисню в повітрі 21 %)			$49,6 \pm 7,5$	7
Органічний ґрунт (вміст кисню в повітрі 5–13 %)			$14,3 \pm 13,2$	
Торф			< 39	6
Торф (вміст кисню в повітрі 21 %)			$31,4 \pm 2,1$	7
Торф (вміст кисню в повітрі 5–13 %)			$7,6 \pm 6,3$	
Лісова підстилка (соснові голки, тощо) зібрані в зоні відчуження ЧАЕС	Спалювання в пічці, полум'яне горіння	Повне уловлювання диму, активність на фільтрі	8,7	**
	Спалювання в пічці, тліюче горіння		< 1	

* Автори наводять цифри без пояснення способу їхнього одержання.

** Ця робота.

Концентрація атомів стабільного ^{133}Cs в рослинній масі мала в порівнянні з вмістом інших елементів, у процесі згоряння частина атомів цезію входить до складу зольних сполук у вигляді домішки з формуванням твердих розчинів. Навіть у разі штучного збільшення вмісту сполук цезію (CsNO_3 чи Cs_2CO_3) у золі до 10 % від її маси рентгенодифракційними методами не було зафіксовано утворення окремих цезійвмісних фаз [25].

Нагрівання золи супроводжується зсувом рівноваги реакцій у бік утворення летких сполук, здатних покинути зону реакції. Цей процес у твердому середовищі контролюється дифузією і, отже, пришвидшується з підвищенням температури та тривалості нагрівання золи. Наприклад, після нагрівання золи, збагаченої цезієм до ~10 %, протягом 7 год при температурі 600 °C у залишку залишилось близько 1 % цезію, тоді як при температурі 700 °C — лише 0,1 % [25]. Аналогічна поведінка спостерігається для інших елементів, здатних утворювати леткі сполуки за високих температур. Так, у роботі [29] досліджували залежність від температури виходу золи та її складу при спалюванні соснової тирси в електропечі. За підвищення температури від 538 до 1093 °C вихід золи зменшився на 45 %. Основною причиною зниження маси золи є утворення карбонатів за низьких температур спалювання та їхнє розкладання за високих:



З ростом температури спалювання відсоток вмісту більшості металів у золі збільшувався внаслідок вивільнення CO_2 і зменшення загальної маси золи, проте вміст калію (рис. 2), натрію та цинку зменшу-

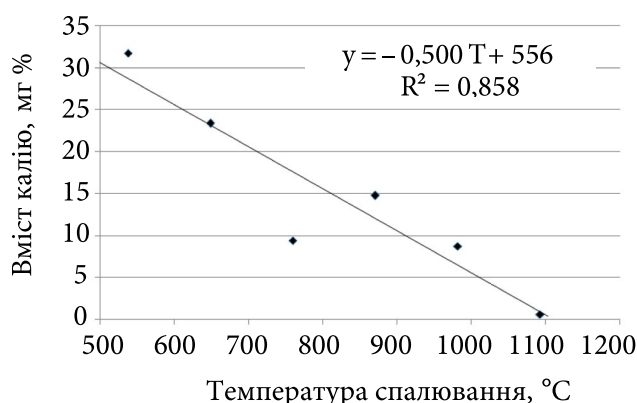


Рис. 2. Залежність відсотка вмісту калію в золі соснової тирси від температури спалювання. Графік побудований на основі даних, наведених у [29]

вався, імовірно, завдяки відносно низьким температурам кипіння їхніх сполук [29].

Ще більша різниця у відсотках викиду (іноді більш ніж на порядок) спостерігається при переході від полум'яного горіння до тліючого [3–5, 7, 14, 17]. Цьому можуть сприяти два фактори — зниження температури горіння; зона тління, як правило, вкрита шаром більш холодного попелу, який може слугувати субстратом для конденсації летких сполук цезію. У нашому експерименті при спалюванні лісової підстилки на аерозольному фільтрі осіло 8,4 % активності ^{137}Cs для полум'яного режиму горіння і менше 1 % для тліючого.

У процесі горіння під дією високих температур відбувається піроліз органічного палива з утворенням широкого спектра органічних сполук у газоподібному стані. Згоряння цих сполук і утворює полум'я. Під дією високих температур частина органіки в полум'ї може відщеплювати водень та воду з утворенням поліароматичних сполук із графітоподібною структурою. Ці сполуки виступають ядрами конденсації вуглецю з подальшим формуванням частинок сажі (так званий чорний вуглець). За умови надходження в зону горіння достатньої кількості кисню спостерігається повне згоряння вуглецю, з диму зникає кіптява. Такий дим містить мінеральні аерозольні частки переважно конденсаційного походження. По мірі охолодження диму на мінеральних частках та частках вуглецю відбувається конденсація парів води та незгорілих органічних сполук (так званий білий вуглець) з утворенням рідких та напіврідких аерозольних часток.

Коли з органічного палива вивітрюється більшість летючих речовин, починається тліюче горіння вугілля, що залишилось. Воно по своїй суті є поверхневим процесом. Кисень дифундує до поверхні й екзотермічно реагує з вуглецем при температурі вище 440 °C з утворенням чадного газу CO . В умовах підвищення температури до 640–710 °C і наявності кисню CO може окислюватись до CO_2 . Тліюче горіння може відбуватись і безпосередньо при горінні органічного палива за умови недостатнього надходження кисню або високого вмісту води [17].

Дрібні частинки палива з високим співвідношенням поверхні до об'єму, нещільно упаковане паливо і низький вміст води сприяють полум'яному горінню. Трава, листя, нещільно упакована підстилка і дрібні деревні уламки мають схильність переважно до полум'яного горіння за умови помірного або низького вмісту води. Тління є важливим процесом

при згорянні деревного палива великого діаметра, домінуючим при горінні дернини, органічного ґрунту і торфу. Відносна частка тліючого горіння збільшується зі збільшенням вологості палива [1].

Для тління характерні більш низькі температури горіння, неповне згорання органічних продуктів піролізу палива та значне зростання вмісту чадного газу в продуктах згорання, що свідчить про дефіцит кисню в зоні горіння. Тління супроводжується появою густого білого диму, аерозольні частки якого часто рідкі або напіврідкі, вони містять воду та широкий спектр органічних речовин. Як індикатор співвідношення «полум'яне горіння — тління» широко використовується модифікований коефіцієнт згорання МКЗ (MCE, modified combustion efficiency):

$$\text{МКЗ} = \frac{C_{\text{CO}_2}}{C_{\text{CO}_2} + C_{\text{CO}}}, \quad (2)$$

де C_{CO} і C_{CO_2} — концентрації чадного та вуглекислого газів у продуктах згорання відповідно [1, 30].

Під час лісових пожеж процеси горіння — займання/дистиляція, полум'я, тління і тління/окислення вугілля — відбуваються одночасно і часто в безпосередній близькості [1]. Лабораторне спалювання може бути застосоване для дослідження кожного з цих процесів, але воно не може оцінити вклад окремого процесу в їхній сукупності. Крім того, камери згорання не можуть адекватно відтворити розмір пожежі, температуру та вентиляцію [17].

Оскільки температура та тривалість нагрівання продуктів згорання, перш за все золи, визначається впливом низки факторів, насамперед складом палива, його вологістю та щільністю розташування, а також режимом надходження повітря, можна зробити висновок, що для тієї ж ділянки лісу, при тому ж рівні забруднення, викид ^{137}Cs з димом за різних умов (вологість, насамперед підстилки, напрямок та сила вітру) може бути суттєво різним. Потрібно також врахувати, що основна активність ^{137}Cs в лісах зони відчуження зосереджена саме в підстилці [31], для якої співвідношення горіння/тління, залежно від умов спалювання, здатне змінюватись в широких межах.

Висновки

Під час лісової пожежі одночасно і в безпосередній близькості протікають різноманітні процеси горіння. Лабораторні спалювання дають змогу аналізувати окремі процеси в контрольованих умовах, проте вони не можуть повністю відобразити внесок

цих процесів у масштабах реальної пожежі. Камери згорання не здатні адекватно відтворити масштаб пожежі, динаміку доступу повітря до зони горіння та відповідне поле температур.

Наявні в літературних джерелах відмінності в коефіцієнтах емісії цезію, найімовірніше, зумовлені різницею в дисперсному складі уловлених димових фракцій, застосуванням методики визначення викидів на основі залишку в золі, а також конструктивними особливостями камер згорання та варіаціями в паливних матеріалах.

Коефіцієнт емісії цезію під час лісової пожежі значною мірою залежить від характеристик органічного палива, зокрема виду і стану рослинності. Але навіть для однієї і тієї ж ділянки лісу цей коефіцієнт може вважатися константою лише умовно, оскільки він є функцією багатьох параметрів: вологості горючих матеріалів, типу пожежі, режиму горіння, температури та часу нагрівання золи. Ці фактори, у свою чергу, залежать від припливу кисню до зони горіння, пов'язаного із швидкістю і напрямком вітру. Таким чином, за різних погодних умов коефіцієнт емісії цезію для однієї і тієї ж ділянки лісу може змінюватись у кілька разів або навіть на порядок. Оцінка меж цієї варіації потребує подальших досліджень на реальних пожежах і в натурних експериментах.

Список використаної літератури

1. Peterson D. L. Wildland Fire Smoke in the United States: A Scientific Assessment / D. L. Peterson, S. M. McCaffrey, T. Patel-Weynand // Springer Nature, 2022. – 341 p. – doi.org/10.1007/978-3-030-87045-4.
2. Koppmann R. A review of biomass burning emissions, part I: gaseous emissions of carbon monoxide, methane, volatile organic compounds, and nitrogen containing compounds / R. Koppmann, K. Von Czapiewski, J. S. Reid // Atmospheric chemistry and physics discussions. – 2005. – Vol. 5. – P. 10455–10516. – Available at: <https://acp.copernicus.org/preprints/acpd-2005-0301/acpd-5-10455-2005.pdf>
3. Burning radionuclide question: What happens to iodine, cesium and chlorine in biomass fires? / B. D. Amiro, S. C. Sheppard, F. L. Johnston [et al.] // The Science of the Total Environment. – 1996. – Vol. 187. – P. 93–103. – Available at: doi.org/10.1016/0048-9697(96)05125-X
4. Cesium emissions from laboratory fires / W. M. Hao, S. Baker, E. Lincoln [et al.] // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2018. – Vol. 68 (11). – P. 1211–1223. – Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10962247.2018.1493001>.

5. Distribution of radionuclides between atmosphere and ash during combustion of contaminated vegetation / L. J. Zhou, R. Rao, E. Corcoran, D. Kelly // *Journal of environmental radioactivity*. – 2016. – Vol. 165. – P. 159–167. – Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/103/49103588.pdf.
6. Experimental wildfire induced mobility of radiocesium in a boreal forest environment / J. Martinsson, G. Pédehontaa-Hiaa, V. Malmborg, D. Madsen, C. Rääf // *Science of the Total Environment*. – 2021. – Vol. 792. – Art. 148310. – Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721033817>.
7. Influence of variable oxygen concentration on the combustion derived release of radiocesium from boreal soil and peat / J. Martinsson, G. Pédehontaa-Hiaa, D. Madsen, C. Rääf // *Science of the Total Environment*. – 2022. – Vol. 815. – Art. 152725. – Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721078049>.
8. Дворник А. М. Радиоактивные продукты горения / А. М. Дворник, А. А. Дворник // *Проблемы лесоведения и лесоводства: Сборник научных трудов ИЛ НАН Беларуси*. – Вып. 74. – Гомель : Институт леса НАН Беларуси. – 2014. – С. 431–435.
9. Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part I. Fire experiments / V. I. Yoschenko, V. A. Kashparov, V. P. Protsak [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2006. – Vol. 86. – No. 2. – P. 143–163. – Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/52/067/52067297.pdf.
10. Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part II. Modeling the transport process / V. I. Yoschenko, V. A. Kashparov, S. E. Levchuk [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2006. – Vol. 87(3). – P. 260–278. – Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/52/067/52067292.pdf.
11. Distribution and influence of forest fires on the ecological and radiation situation in radioactively contaminated areas / V. Sydorenko, S. Yeremenko, V. Vambol [et al.] // *Procedia Structural Integrity*. – 2022. – Vol. 36. – P. 318–325. – doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.041.
12. Newman-Thacker F. Investigating the drivers of the unprecedented Chernobyl Power Plant Wildfire in April 2020 and its effects on ^{137}Cs dispersal / F. Newman-Thacker, L. Turnbull // *Natural hazards*. – 2021. – Vol. 109 (2). – P. 1877–1897. – Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-021-04902-7>.
13. Пазухин Э. М. Лесной пожар как фактор перераспределения радионуклидов чернобыльского генезиса в окружающей среде / Э. М. Пазухин, А. А. Боровой, Б. И. Огородников // *Радиохимия*. – 2004. – Т. 46 (1). – С. 93–96. – Режим доступа: http://www.physchembio.ru/mediafiles/journals/9_journal/issues/2004_46_1/R_2004_46_1_93-96.pdf.
14. Forest fires in the territory contaminated as a result of the Chernobyl accident: radioactive aerosol resuspension and exposure of fire-fighters / V. A. Kashparov, S. M. Lundin, A. M. Kadygrib [et al.] // *Journal of environmental radioactivity*. – 2000. – Vol. 51 (3). – P. 281–298. – doi.org/10.1016/S0265-931X(00)00082-5.
15. Evaluation of radioactive air contamination due to a forest fire within the Exclusion Zone on June 5–8, 2018 / M. M. Talerko, T. D. Lev, S. I. Kireev [et al.] // *Nuclear Power and the Environment*. – 2019. – Vol. 2. – P. 47–57. – doi.org/10.31717/2311-8253.19.1.7.
16. Resuspension of radionuclides into the atmosphere due to forest fires / J. Paatero, K. Vesterbacka, U. Makkonen [et al.] // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2009. – Vol. 282(2). – P. 473–476. – doi.org/10.1007/s10967-009-0254-9.
17. A review of biomass burning emissions, part II: Intensive physical properties of biomass burning particles / J. S. Reid, R. Koppmann, T. F. Eck, D. P. Eleuterio // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* – 2004. – Vol. 4. – P. 5135–5200. – doi.org/10.5194/acp-5-799-2005.
18. Andreae M. O. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning / M. O. Andreae, P. Merlet // *Global Biogeochem. Cycles*. – 2001. – Vol. 15 (4). – P. 955–966. – Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2000GB001382>.
19. Пат. 153772 Україна, МПК G01N 1/00, F23B 80/00. Пристрій для спалювання твердих матеріалів і відбору проб для аналізу речовин, що містяться в диму / В. К. Шинкаренко, А. М. Новіков; заявник і власник ІПБ АЕС НАН України. – № u202300905; заявл. 07.03.2023; опубл. 23.08.2023, бюл. № 34/2023. – Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1755183>.
20. Kabata-Pendias A. Trace elements in abiotic and biotic environments / A. Kabata-Pendias, B. Szteke. – Taylor & Francis, 2015. – 468 p. – Available at: <https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/41690/9781482212815.pdf?sequence=1>.
21. Burger A. Stable and radioactive cesium: a review about distribution in the environment, uptake and translocation in plants, plant reactions and plants' potential for bioremediation / A. Burger, I. Lichtscheidl // *Science of the Total Environment*. – 2018. – Vol. 618. – P. 1459–1485. – doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.298.
22. Tuli J. K. *Nuclear Data Sheets for A=137* / J. K. Tuli // *Nucle-*

- ar Data Sheets*. – 1994. – Vol. 72 (3). – P. 355–408. – doi: [org/10.1006/ndsh.1994.1031](https://doi.org/10.1006/ndsh.1994.1031).
23. Isotopic Ratio of $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ in Soils and Vegetation Cover of Forest Ecosystems / D. N. Lipatov, A. I. Shcheglov, D. V. Manakhov, O. B. Tsvetnova // *Moscow University Soil Science Bulletin*. – 2022. – Vol. 77 (4). – P. 218–226. – Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103/s014768742204010x>.
24. Cains P. Volatilization of ruthenium, caesium and technetium from nitrate systems in nuclear fuel processing and waste solidification. / P. Cains, K. Yewer, S. Waring // *Radiochim. Acta*. – 1992. – Vol. 56. – P. 99–104. – Available at: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1524/ract.1992.56.2.99/html>.
25. Цезій содержащие фазы в древесных золах чернобыльского района / Ф. В. Белкин, С. В. Габелков, Р. В. Тарасов [и др.] // *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. – Вип. 11. – 2009. – С. 136–141. – Режим доступу: http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/7417/18-Belkin.pdf?sequence=1%.
26. Vapour Pressure Chart. – Friday Harbor, Washington: Luxel Corporation. – Available at: <http://luxel.com/wp-content/uploads/2013/04/Luxel-Vapor-Pressure-Chart.pdf>
27. Emissions of trace gases and aerosols during the open combustion of biomass in the laboratory / G. R. McMeeking, S. M. Kreidenweis, S. Baker [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2009. – Vol. 114. – D 19. – doi: [org/10.1029/2009JD011836](https://doi.org/10.1029/2009JD011836).
28. Individual aerosol particles from biomass burning in southern Africa: 1. Composition and size distributions of carbonaceous particles. / M. Posfai, R. Simonics, J. Li [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2003. – Vol. 108. – D 13. – P. 8483. – Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2002JD002291>.
29. Etiegni L. Physical and chemical characteristics of wood ash. / L. Etiegni, A. G. Campbell // *Bioresource technology*. – 1991. – Vol. 37 (2). – P. 173–178. – Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/096085249190207Z>.
30. Emissions of formaldehyde, acetic acid, methanol, and other trace gases from biomass fires in North Carolina measured by airborne Fourier transform infrared spectroscopy / R. J. Yokelson, J. G. Goode, D. E. Ward [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 1999. – Vol. 104. – D 23. – P. 30109–30125. – Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1029/1999JD900817>.
31. Kudzin M. Distribution of ^{137}Cs between the components of pine forest of Chernobyl NPP exclusion zone / M. Kudzin, V. Zabrotski, D. Harbaruk // *Impact of Cesium on Plants and*

the Environment. – 2017. – P. 149–169. – Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-41525-3_9.

V. K. Shynkarenko, A. M. Novikov

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

Air Releases of ^{137}Cs from the Burning of Contaminated Biomass: a Review of Laboratory Research

Forest fires and biomass burning in radioactively contaminated areas present a potential risk of releasing accumulated radionuclides into the atmosphere. This article reviews the literature on caesium (Cs) emissions from laboratory simulations of burning contaminated biomass and presents results from a comparative analysis of ^{137}Cs emissions during flaming and smouldering combustion. A sample of forest litter, collected in the Chornobyl Exclusion Zone, was burned in a specially designed furnace under both combustion modes. During flaming, 8.4% of ^{137}Cs activity was recorded on an aerosol filter, whereas smouldering combustion of another portion of the same sample released less than 1% into the atmosphere. These results align with existing literature and demonstrate a significant dependence of ^{137}Cs emissions on combustion mode.

The authors hypothesise that the decrease in ^{137}Cs emissions during smouldering is due not only to lower temperatures but also to the condensation of volatile compounds in the layer of cooled ash that usually covers the smouldering zone. The discrepancies in emission factors found in the literature can be explained by the difference in the dispersed composition of the smoke fractions studied, the design features of the combustion chambers, and the use of the method of determining emission activity by residual ash activity. This method can cause overestimation of the results, since all activity losses in the experiment are automatically attributed to the emission with smoke.

Discrepancies in emission coefficients across literature may be due to differences in the dispersed composition of smoke fractions as well as methodological variations, the design features of the combustion chambers, such as calculating emission activity based on ash residue. This latter method may lead to overestimation, as it assumes that all activity losses during the experiment are due to smoke emission.

Consequently, the ^{137}Cs emission factor for any given forest area should not be regarded as a fixed value, as it depends on initial fire conditions, including litter moisture,

wind strength, and direction, which influence the balance between flaming and smouldering. Considering that most ^{137}Cs activity in the Exclusion Zone's forests is concentrated in the litter layer, where combustion regimes can vary significantly, these factors are essential to accurately assess radiation risks.

Keywords: forest fires, contaminated biomass burning, ^{137}Cs smoke emissions.

References

- Peterson D. L., McCaffrey S. M., Patel-Weynand T. (2022). *Wildland fire smoke in the United States: A scientific assessment*. Springer Nature, 341 p. doi.org/10.1007/978-3-030-87045-4.
- Koppmann R., Von Czapiewski K., Reid J.S. (2005). A review of biomass burning emissions, part I: gaseous emissions of carbon monoxide, methane, volatile organic compounds, and nitrogen containing compounds. *Atmospheric chemistry and physics discussions*, vol. 5, pp. 10455–10516. Available at: <https://acp.copernicus.org/preprints/acpd-2005-0301/acpd-5-10455-2005.pdf>.
- Amiro B. D., Sheppard S. C., Johnston F. L., Evenden W. G., Harris D. R. (1996). Burning radionuclide question: What happens to iodine, cesium and chlorine in biomass fires? *Science of the Total Environment*, vol. 187 (2), pp. 93–103. doi.org/10.1016/0048-9697(96)05125-X.
- Hao W. M., Baker S., Lincoln E., Hudson S., Lee S. D., Lemieux P. (2018). Cesium emissions from laboratory fires. *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 68 (11), pp. 1211–1223. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10962247.2018.1493001>.
- Zhou L. J., Rao R., Corcoran E., Kelly D. (2016). Distribution of radionuclides between atmosphere and ash during combustion of contaminated vegetation. *Journal of environmental radioactivity*, vol. 165, pp. 159–167. Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/103/49103588.pdf.
- Martinsson J., Pédehontaa-Hiaa G., Malmborg V., Madsen D., Rääf C. (2021). Experimental wildfire induced mobility of radiocesium in a boreal forest environment. *Science of the Total Environment*, vol. 792, art. 148310. Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148310.
- Martinsson J., Pédehontaa-Hiaa G., Madsen D., Rääf C. (2022). Influence of variable oxygen concentration on the combustion derived release of radiocesium from boreal soil and peat. *Science of the Total Environment*, vol. 815, art. 152725. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721078049>.
- Dvornik A. M., Dvornik A. A. (2014). Radioactive products of combustion [*Problems of forestry and silviculture: Collection of scientific papers of IL NAS of Belarus*], vol. 74, pp. 431–435. Available at: <https://www.twirpx.com/file/1561141.pdf>. (in Rus.)
- Yoschenko V. I., Kashparov V. A., Protsak V. P., Lundin S. M., Levchuk S. E., Kadygrib A. M., Zvarich S. I., Khomutinin Yu. V., Maloshtan I. M., Lanshin V. P., Kovtun M. V., Tschiersch J. (2006). Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part I. Fire experiments. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 86 (2), pp. 143–163. Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/52/067/52067297.pdf.
- Yoschenko V. I., Kashparov V. A., Levchuk S. E., Glukhovskiy A. S., Khomutinin Y. V., Protsak V. P., Tschiersch J. (2006). Resuspension and redistribution of radionuclides during grassland and forest fires in the Chernobyl exclusion zone: part II. Modeling the transport process. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 87 (3), 260–278. Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/52/067/52067292.pdf.
- Sydorenko V., Yermenko S., Vambol V., Vambol S., Poberezhna L. (2022). Distribution and influence of forest fires on the ecological and radiation situation in radioactively contaminated areas. *Procedia Structural Integrity*, vol. 36, pp. 318–325. doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.041.
- Newman-Thacker, F., Turnbull, L. (2021). Investigating the drivers of the unprecedented Chernobyl Power Plant Wildfire in April 2020 and its effects on ^{137}Cs dispersal. *Natural hazards*, vol. 109 (2), 1877–1897. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-021-04902-7>.
- Pazukhin E. M., Borovoy A. A., Ogorodnikov B. I. (2004). Forest fire as a factor of redistribution of radionuclides of Chernobyl genesis in the environment. *Radiochemistry*, vol. 46 (1), 93–96. Available at: http://www.physchembio.ru/mediafiles/journals/9_journal/issues/2004_46_1/R_2004_46_1_93-96.pdf.
- Kashparov V. A., Lundin S. M., Kadygrib A. M., Protsak V. P., Levchuk S. E., Yoschenko V. I., Kashpur V. A., Talerko, N. M. (2000). Forest fires in the territory contaminated as a result of the Chernobyl accident: radioactive aerosol resuspension and exposure of fire-fighters. *Journal of environmental radioactivity*, vol. 51 (3), pp. 281–298. doi.org/10.1016/S0265-931X(00)00082-5.
- Talerko M. M., Lev T. D., Kireev S. I., Kashpur V. O., Kuzmenko G. G. (2019). Evaluation of radioactive air contamination due to a forest fire within the Exclusion Zone on June 5–8, 2018. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 14 (2), pp. 47–57. doi.org/10.31717/2311-8253.19.1.7.

16. Paatero J., Vesterbacka K., Makkonen U., Kyllönen K., Hellen H., Hatakka J., Anttila P. (2009). Resuspension of radionuclides into the atmosphere due to forest fires. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 282 (2), pp. 473–476. doi.org/10.1007/s10967-009-0254-9.
17. Reid J. S., Koppmann R., Eck T. F., Eleuterio D. P. (2005). A review of biomass burning emissions part II: intensive physical properties of biomass burning particles. *Atmospheric chemistry and physics*, vol. 5 (3), pp. 799–825. Available at: doi.org/10.5194/acp-5-799-2005.
18. Andreae M. O., Merlet P. (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global biogeochemical cycles*, vol. 15(4), pp. 955–966. Available at: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2000GB001382.
19. Shynkarenko V. K., Novikov A. M. *Prystrii dlia spalivannia tverdykh materialiv i vidboru prob dlia analizu rehovyn, shcho mistiatsia v dymu* [Device for combustion of solid materials and sampling for analysis of substances contained in smoke]. Patent for utility model UA, no. 153772. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1755183. (in Ukr.)
20. Kabata-Pendias A., Szteke B. (2015). *Trace elements in abiotic and biotic environments*. Taylor & Francis, 468 p. Available at: https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/41690/9781482212815.pdf?sequence=1.
21. Burger A., Lichtscheidl I. (2018). Stable and radioactive cesium: a review about distribution in the environment, uptake and translocation in plants, plant reactions and plants' potential for bioremediation. *Science of the Total Environment*, 618, 1459–1485. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.298.
22. Tuli J. K. (1994). Nuclear data sheets update for A=137. *Nuclear Data Sheets*, vol. 72 (3), pp. 355–408. doi.org/10.1006/ndsh.1994.1031.
23. Lipatov D. N., Shcheglov A. I., Manakhov D. V., Tsvetnova O. B. (2022). Isotopic Ratio of $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ in Soils and Vegetation Cover of Forest Ecosystems. *Moscow University Soil Science Bulletin*, vol. 77 (4), pp. 218–226. Available at: https://link.springer.com/article/10.3103/s014768742204010x.
24. Cains P. W., Yewer K. C., Waring S. (1992). Volatilization of ruthenium, caesium and technetium from nitrate systems in nuclear fuel processing and waste solidification. *Radiochimica Acta*, vol. 56 (2), pp. 99–104. Available at: https://www.degruyter.com/document/doi/10.1524/ract.1992.56.2.99/html.
25. Belkin F. V., Gabelkov S. V., Tarasov R. V., Poltavtsev N. S., Litvinenko L. M., Ryzhova T. P. (2009). Cesium-containing phases in wood ashes from the Chernobyl region. *Problems of Safety of Nuclear Power Plants and Chernobyl*, vol. 11, 136–141. Available at: http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/7417/18-Belkin.pdf?sequence=1.
26. *Vapour Pressure Chart*. Friday Harbor, Washington: Luxel Corporation. Available at: http://luxel.com/wp-content/uploads/2013/04/Luxel-Vapor-Pressure-Chart.pdf.
27. McMeeking G. R., Kreidenweis S. M., Baker S., Carri-co C. M., Chow J. C., Collett Jr, J. L., Hao W. M., Holden A. S., Kirchstetter T. W., Malm W. C., Moosmüller H., Sullivan A. P., Wold, C. E. (2009). Emissions of trace gases and aerosols during the open combustion of biomass in the laboratory. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 114, D 19. doi.org/10.1029/2009JD011836.
28. Pósfai M., Simonics R., Li J., Hobbs P. V., Buseck, P. R. (2003). Individual aerosol particles from biomass burning in southern Africa: 1. Compositions and size distributions of carbonaceous particles. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 108, D 13, art. 8483. Available at: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2002JD002291.
29. Etiegni L., Campbell A. G. (1991). Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresource technology*, vol. 37 (2), pp. 173–178. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/096085249190207Z.
30. Yokelson R. J., Goode J. G., Ward D. E., Susott R. A., Babbitt R. E., Wade D. D., Bertschi I., Griffith D. W. T., Hao W. M. (1999). Emissions of formaldehyde, acetic acid, methanol, and other trace gases from biomass fires in North Carolina measured by airborne Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 104, D 23, pp. 30109–30125. Available at: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1029/1999JD900817.
31. Kudzin M., Zabrotski V., Harbaruk D. (2017). Distribution of ^{137}Cs between the components of pine forest of Chernobyl NPP exclusion zone. *Impact of Cesium on Plants and the Environment*, pp. 149–169. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-41525-3_9.

Надійшла / Received 11.11.2024

Рекомендована до друку / Accepted 28.11.2024

VI Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику»: головні підсумки

26-27 вересня 2024 р. у Великому конференц-залі НАН України в Києві тривала VI Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику», організована громадською організацією «Українське ядерне товариство» (УкрЯТ), Інститутом проблем безпеки атомних електростанцій (ІПБ АЕС) НАН України і Радою молодих вчених при Відділенні енергетики та енергетичних технологій НАН України за підтримки партнерів і спонсорів – Акціонерного товариства (АТ) «Національної атомної енергогенеруючої компанії «Енергоатом»» (НАЕК «Енергоатом»), компаній «Energy Safety Group» (ES Group), «Фенікс Контакт Україна» (Phoenix Contact Ukraine), науково-виробничого підприємства (НВП) «Атомкомплексприлад», приватного акціонерного товариства «Севєродонецьке науково-виробниче об'днання «Імпульс»» (СНВО «Імпульс»), чеських компаній «Witkowitz Atomica» і «Synergatom», Українського товариства оптики та фотоніки, а також за інформаційної підтримки «Громадського радіо», всеукраїнської газети для науковців та освітян «Світ» і науково-технічного журналу «Ядерна енергетика та довкілля». Захід уже декілька років поспіль відбувається у непростих воєнних умовах та попри це цікавить і наукову спільноту, і широку громадськість. Цього



Учасники конференції



Пленарне засідання



Реєстрація учасників

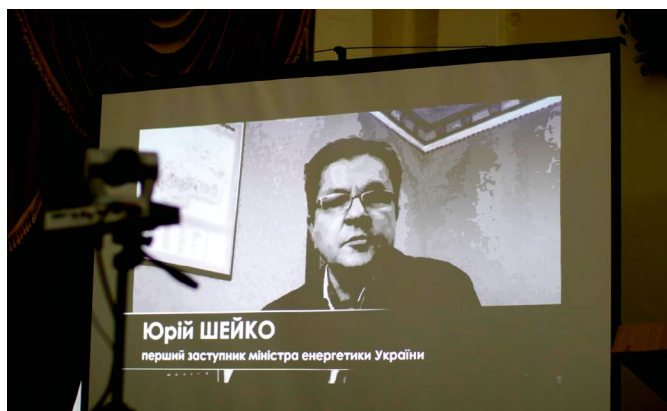
разу до конференції долучилося понад сто провідних фахівців, учених і представників атомної та суміжних галузей.

Конференцію відкрили президент УкрЯТ, заступник генерального директора відокремленого підрозділу (ВП) «Атомпроектінжиніринг» АТ «НАЕК «Енергоатом»» Володимир Холоша, перший заступник міністра енергетики України Юрій Шейко, директор ІПБ АЕС НАН України академік НАН України Анатолій Носовський, а також один із засновників конференції,

начальник зміни блоку Хмельницької атомної електростанції (ХАЕС) Олександр Хомич, які підкреслили важливість інновацій в атомній енергетиці для забезпечення енергетичної безпеки України, зокрема під час війни.



Президент УкрЯТ, заступник генерального директора
ВП «Атомпроектінжиніринг»
АТ «НАЕК «Енергоатом» Володимир Холоша



Перший заступник міністра енергетики України
Юрій Шейко



Директор ІПБ АЕС НАН України
академік НАН України Анатолій Носовський

Далі з доповідями виступили представники: наукових установ НАН України, зокрема: ІПБ АЕС НАН України, Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» (ННЦ «ХФТІ») НАН України, Науково-технологічного комплексу (НТЦ) «Ядерний паливний цикл» ННЦ «ХФТІ» НАН України, Інституту ядерних досліджень НАН України, Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Інституту газу НАН України, Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України;

АТ «НАЕК «Енергоатом», зокрема його філій (ВП «Хмельницька АЕС» і ВП «Атомпроектінжиніринг»), Національної енергетичної компанії «Укренерго», державного підприємства «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки»; закладів вищої освіти (Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Національного університету «Одеська політехніка», Національної академії внутрішніх справ);

компаній, підприємств і організацій, які співпрацюють із підприємствами атомної галузі, — Державного підприємства «УДВП ІЗОТОП», компанії «ES Group», НВП «Атомкомплексприлад», СНВО «Імпульс», АТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект» (АТ «КІЕП»), приватного акціонерного товариства «Укргідропроект»;

Національного комітету CIGRE (Conseil international des grands réseaux électriques — Міжнародної ради з великих електричних систем);

органів державної влади;

представників наукових організацій та підприємств Чехії, Канади й Литви.



Учасники конференції



Завідувач відділення атомної енергетики
ІПБ АЕС НАН України член-кореспондент
НАН України Володимир Борисенко



Заступник головного інженера ХАЕС
Геннадій Самосей

Завідувач відділення атомної енергетики ІПБ АЕС НАН України член-кореспондент НАН України Володимир Борисенко розповів про сучасний стан і перспективи ядерної енергетики.

Заступник головного інженера ХАЕС Геннадій Самосей представив доповідь щодо будівництва нових енергоблоків на цій станції за технологією



Голова Північно-східного наукового центру НАН
України і МОН України, генеральний директор науково-
технологічного комплексу «Інститут монокристалів»
НАН України академік НАН України Володимир
Семиноженко



Старший науковий співробітник НТК «Ядерний
паливний цикл» ННЦ «ХФТІ» НАН України кандидат
фізико-математичних наук Валерій Зуйок

AP1000, наголосивши на важливості спорудження нових енергоблоків в Україні.

Голова Північно-східного наукового центру НАН України і МОН України, генеральний директор науково-технологічного комплексу «Інститут монокристалів» НАН України академік НАН України Володимир Семиноженко присвятив свою доповідь науковим дослідженням синтезу титанату диспрозію для поглинальних елементів поглинальних стрижнів системи управління та захисту реактора ВВЕР-1000.

Старший науковий співробітник НТК «Ядерний паливний цикл» ННЦ «ХФТІ» НАН України кандидат фізико-математичних наук Валерій Зуйок зосередився на головних підсумкових розрахунках обґрунтування продовження строку експлуатації поглинальних стрижнів системи управління та захисту на українських атомних електростанціях.

Присутні розглянули й такі важливі теми, як наукові дослідження у галузі створення нових матеріалів для ядерних реакторів, будівництво нових ядерних енергоблоків атомних електростанцій, можливості розгортання малих модульних реакторів, атомна та воднева когенерація в Україні як важливий крок у розвитку ядерної енергетики. Інші виступи охоплювали проблеми матеріалознавства і впровадження сучасних інформаційних систем для управління експлуатацією та ремонтом енергоблоків, радіаційного моніторингу тощо. Особливу увагу було приділено питанням безпеки, зокрема аналізу ймовірнісної без-

пеки й обґрунтуванню подовження строку експлуатації енергоблоків атомних електростанцій.

Другого дня конференція працювала у форматі двох секційних панелей, під час яких фахівці поділилися власними напрацюваннями у сфері безпеки атомних електростанцій, створення новітніх матеріалів і технологій, поводження з відпрацьованим ядерним паливом, кібербезпеки, підготовки кадрів для галузі тощо. Відбулася також традиційна експертна дискусія щодо функціонування й розвитку атомної енергетики в умовах викликів, пов'язаних із російською агресією.

На думку учасників заходу, конференція «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику» відкриває широкі можливості для обміну досвідом і знаннями, представлення розробок і напрацювань фахівців, а також є важливою нагодою налагодити міжгалузеву співпрацю й комунікацію задля розбудови національної ядерної галузі.



Пленарне засідання



Учасники конференції



Учасники конференції

Правила для авторів

Загальні вимоги

1. Редакція збірника «Ядерна енергетика та довкілля» приймає раніше неопубліковані авторські статті, що відповідають профілю видання та мають наукове та практичне значення. Тексти статей та всі матеріали до них повинні бути ретельно відредаговані та перевірені.

2. Статті, які є результатами робіт, проведених у сторонніх організаціях, повинні мати супровідний документ від цих організацій. Разом зі статтею до редакції журналу має бути поданий документ про можливість відкритої публікації матеріалів та згоду авторів на поширення їх через мережу Інтернет.

3. Матеріали, що надходять до редакції для публікування, проходять обов'язкове рецензування. Зауваження рецензентів направляють розробнику матеріалів без вказівки імен рецензентів. Після отримання рецензій і відповіді автора редакційна рада ухвалює рішення про можливість і порядок публікації роботи. Незначні правки стилістичного, номенклатурного та формального характеру вносять до тексту без узгодження з автором.

4. Редакція приймає статті українською або англійською мовою.

5. Рукопис статті можна подати у вигляді електронної копії (на електронному носії або електронною поштою). Стаття повинна бути створена за допомогою текстового редактора Microsoft Word з урахуванням таких вимог: шрифт — Times New Roman; розмір — 11 пт; міжрядковий інтервал — 1,5; розстановка переносів — переносів немає; форматування — по ширині; колір шрифту — чорний; абзацний відступ — 1,5 см; розміри полів, мм: зліва — 24 мм, справа — 16 мм, зверху — 22 мм, знизу — 28 мм.

6. Загальний обсяг статті разом з графічними матеріалами не повинен перевищувати 15 сторінок формату А4.

7. На титулі статті має бути представлено її УДК.

Українською та англійською мовами слід навести: прізвище, ім'я та по батькові автора; його учений ступінь, звання, посаду, ідентифікатор ORCID; повну назву організації, де працює автор, і її поштову адресу; назву статті; анотацію та ключові слова.

8. У разі співавторства додатково слід вказати прізвище, ім'я та по батькові автора, відповідального за контактування з редакцією, його телефон і адресу електронної пошти.

9. Графічний матеріал подають у форматі EPS, TIFF або JPG з густиною точок на дюйм не менше 300 dpi. Зображення повинні бути якомога зрозумілішими. Варто враховувати, що друкована версія журналу виходить чорно-білим друком, тому автору варто звернути увагу на те, щоб через втрату кольору не були втрачені важливі деталі рисунків.

Назви та докладне пояснення змісту слід наводити в підписах під рисунками, а не на самих ілюстраціях. Текст не повинен повторювати інформацію, представлену в рисунках, він має тільки давати основні висновки за ними та резюмувати інформацію. Якщо рисунки мають малу кількість даних, їх варто замінити описом у тексті. Якщо рисунок складається з кількох підрисунків (а, б, в, ...), то підпис до рисунка має містити опис кожного з підрисунків. Розмір шрифту надписів на рисунках і підписів до них — 10 пт, гарнітура — Times New Roman.

Графіки повинні відображати великі обсяги даних ясно і зрозуміло. Оформляючи в статті графіки, автор має переконатися, що в них підписано всі осі, вказано всі одиниці виміру для величин, підписано всі криві й масиви даних.

Схеми допомагають визначити ключові деталі в процесі, тому мають бути позбавлені зайвої інформації. Оформляючи схему, потрібно підписати всі ключові елементи й навести додаткові пояснення в її заголовку та основному тексті.

10. Таблиці нумерують послідовно, відповідно до першого згадування про них у тексті. Перед кожною таблицею повинна стояти її назва. Слід розшифрувати всі нестандартні аббревіатури у виносках, використовуючи таку послідовність символів: *, **. Слід упевнитися, що кожна таблиця процитована в тексті.

11. Формули створюють у формульному редакторі MathType Equation або MS Equation та нумерують у круглих дужках з правого боку. Грецькі і кириличні літери в формулах варто набирати прямим шрифтом (опція «текст»), латинські – курсивом. Позначення величин і символи в тексті і таблицях варто набирати як елементи тексту, а не як об'єкти формульного редактора.

12. Посилання на рисунок, графік, схему або таблицю є обов'язковим у тексті статті та згадується безпосередньо перед рисунком, графіком, схемою або таблицею.

13. Скорочення слів, словосполучень, назв, термінів, за винятком загальноприйнятих, можливе тільки після їх повного першого згадування в тексті. Далі таке слово або формулювання слід вживати лише в скороченому вигляді.

14. Одиниці вимірювання мають бути вказані у відповідних метричних одиницях або в їх десяткових кратних одиницях.

15. Матеріали, які не відповідають зазначеним вимогам, редакцією не розглядаються.

16. Публікація у журналі є безкоштовною. Виплата авторського гонорару не передбачається.

Структура та зміст статті

Стаття повинна бути побудована за традиційним для світової наукової періодики планом: структурована за розділами та завершуватися конкретними висновками, в яких у лаконічній формі викладено результати роботи та пропозиції автора, що впливають із викладеного матеріалу.

Назва статті повинна відображати основну ідею дослідження; акцентувати на важливості дослідження; бути лаконічною; зацікавлювати читачів.

Прізвища авторів англійською мовою подаються відповідно до прийнятої міжнародної системи транслітерації (з української – відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 55 від 27.01.2010 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею»). Наведення прізвища у різних системах транслітерації призводить до дублювання профілів (ідентифікаторів) автора в базі даних (профіль створюється автоматично в разі збігу його даних по двох публікаціях).

У списку авторів вказуються лише ті особи, які зробили значний внесок у створення роботи на інтелектуальному, практичному або концептуальному рівні. Першим вказується той, хто зробив основний внесок у написання статті. У випадках, коли інші особи або організації сприяли дослідженню, опублікованому у статті, про них доречно згадати наприкінці статті у розділі Подяка (Acknowledgement).

Анотація – це стисла інформація про зміст статті. Багато читачів знайомитимуться тільки з анотацією статті, тому вона має бути зрозумілою та інформативною за умови опублікування її окремо від статті. Вона не має повторювати відомості, що містяться в заголовку. Анотація українською мовою має бути розміром приблизно 1000 знаків. Оскільки єдиним джерелом інформації щодо змісту статті для іноземних спеціалістів є анотація англійською мовою, вона має бути більшою за обсягом (не менше 1800 знаків), більш структурованою та не має бути перекладним варіантом анотації українською. Оптимальним для такої анотації є структурування відповідно до основних елементів самої статті (актуальність, матеріали та методи, висновки тощо). Вона має бути інформативною (позбавленою загальних слів), змістовною (відображати основний зміст статті та результатів досліджень) і містити термінологію, характерну для іноземних спеціальних текстів. Неприйнятним є нередагований автоматичний переклад за допомогою онлайн-сервісів.

Ключові слова використовуються для індексування роботи в електронних системах та мережі Інтернет. Чим краще будуть підібрані ключові слова до роботи, тим більше людей зможуть її знайти, здійснюючи пошук за такими самими ключовими словами. Це збільшить читаність статті, а отже, підвищить ймовірність її цитування. Ключові слова повинні відображати зміст статті та бути конкретними у своїй предметній галузі.

Структура статті передбачає такі основні розділи: вступ; стан проблеми та аналіз літературних даних; постановка завдань дослідження; матеріали дослідження, експериментальна частина; інтерпретація результатів та їх апробація; висновки.

Вступ має надати читачеві інформацію (зокрема довідкового характеру), необхідну для того, щоб зрозуміти, яке питання вивчалось, а також причини, з яких автор проводить дослідження. У вступі стисло потрібно відобразити передумови до проведення дослідження: подати загальне розуміння проблеми, яку автор порушив, й аргументовано обґрунтувати актуальність дослідження, описати проблему та тематику, а також навести актуальні знання, пов'язані з розглянутими науково-дослідницькими завданнями.

Стан проблеми та аналіз літературних даних дає змогу виявити «нішу», де автори проводять наукові дослідження. Розділ пишуть на основі публікацій періодичних наукових видань (книги, підручники, монографії, стандарти, звіти до таких не належать). Огляд періодики з проблеми, що досліджується автором, має охоплювати джерела не більше 10-річної давності (у галузі ІТ-технологій – 5-річної давності). Обов'язковим є огляд закордонних наукових періодичних видань. Цей розділ є одним із найважливіших, оскільки з нього випливає, наскільки автор особисто розуміє стан проблеми, яку береться досліджувати.

У літературному огляді висвітлюють не вирішені іншими вченими частини проблеми, які досліджує автор; викладають причини цього дослідження; чітко визначають цілі дослідження, які повинні узгоджуватися з іншою частиною рукопису; наводять посилання на важливі джерела, які дають змогу повніше розкрити суть роботи.

Правильно підібраний літературний огляд передбачає:

- цитування автором найбільш релевантних результатів попередніх досліджень і пояснення того, наскільки вони співвідносяться з поточним дослідженням;

- посилання на дослідження різних дослідницьких груп;

- посилання на оригінальні дослідження, а не на велику кількість оглядових статей;

- максимальна користь цитат для читача (читачеві не цікаво, коли автор посилається на велику кількість своїх робіт або на інші роботи для того, щоб показати глибину своїх знань);

- посилання на результати інших досліджень, які або суперечать отриманим автором результатам (якщо такі є), або підтверджують їх.

Джерела в тексті статті повинні бути відсортовані за порядком згадування.

Матеріали дослідження, експериментальна частина є розділом, зі змісту якого має бути зрозуміло, як отримано всі результати. Варто описати систему дослідження (методи, методику тощо). Методи, які використовували для обробки даних, мають бути обґрунтовані (спиратися на статистику). Автор, який використав методику опублікованого дослідження, повинен послатися на неї та дати резюме процедури в тексті статті.

Результати дослідження мають бути чітко визначені, а підсумкові результати – об'єктивно підтверджені (наприклад, результатами математичного, статистичного, імітаційного моделювання, натурними експериментами, фундаментальними положеннями наукових дисциплін у відповідній предметній галузі).

Забороняється генерування статті засобами штучного інтелекту. Використання таких засобів може бути припустимим для пошуку інформації та покращення читабельності тексту статті. Отримана інформація повина бути ретельно перевірена авторами, які несуть остаточну відповідальність за точність, достовірність і доцільність змісту своєї роботи.

Інтерпретація результатів та їх апробація передбачає приклади практичних рішень (результати чисельних експериментів, графіки, діаграми тощо) на основі отриманих автором наукових результатів. Приклади дають змогу оцінити адекватність запропонованих теоретичних рішень та їх практичну значимість. Потрібно вказати, в умовах якого виробництва були впроваджені або можуть бути впроваджені результати досліджень.

Якщо результати не є основною метою статті, їх можна узагальнити й не публікувати дані детально. Тим не менш, у разі недостатньої кількості інформації читач може втратити довіру до дослідження, припустивши, що автор приховує слабкі докази.

Висновки відображають, наскільки матеріал дослідження відповідає його цілям, сформульованим у вступі. Варто означити, чи існують альтернативні інтерпретації отриманих результатів та порівняти отримані результати з результатами інших досліджень.

Доречно вказати, як результати наукової розвідки можуть вплинути на майбутні дослідження, чи є в дослідженні обмеження. Перевірте відповідність описаних висновків отриманим даним.

Список використаної літератури

Кожна констатація факту чи опис попередніх висновків, цитати, методи, моделі, рисунки, таблиці тощо, запозичені з інших робіт, обов'язково супроводжуються посиланням на першоджерело.

Посилання на список літератури повинні бути пронумеровані послідовно відповідно до їх порядку у тексті.

Правильне описання джерел, на які посилаються автори, є запорукою того, що цитовану публікацію буде враховано в процесі оцінювання наукової діяльності її авторів, а отже, й організації, регіону, країни. За цитуванням журналу визначається його науковий рівень, авторитетність тощо.

Після статті українською мовою має бути розміщено два списки:

1) *Список використаної літератури* — джерела мовою оригіналу, оформлені відповідно до вимог українського стандарту бібліографічного опису ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 «Бібліографічний запис. Бібліографічний опис.

Загальні вимоги та правила складання».

2) *References* — той самий список літератури, де джерела кирилицею транслітеровані в латинському алфавіті та подані за допомогою міжнародної системи запису посилання American Psychological Association (APA).

Для статті англійською мовою достатньо лише списку «References».

Оформлення списку літератури «References»

1. Список літератури («References») для Scopus та інших зарубіжних баз даних (БД) необхідно наводити окремим блоком, повторюючи список, наданий українською/російською мовою, незалежно від того, є в ньому іноземні джерела чи немає.

2. За основу побудови посилання в списку літератури латиницею в журналі «Ядерна енергетика та до-вкілля» взято принципи формування бібліографічних посилань American Psychological Association (APA).

Бібліографічні посилання латиницею для журналу створюють за принципом, що дасть змогу зарубіжним наукометричним базам у найлегший спосіб фіксувати дані про елементи кожного посилання та забезпечити коректні показники їх цитованості.

3. В опис статті необхідно вносити всіх авторів, не скорочуючи перелік до трьох, як це рекомендовано чинними в Україні державними стандартами.

4. Деякі елементи бібліографічного опису подають курсивом, як показано на зразках нижче.

5. У випадках оформлення україно- або російськомовного джерела іншою мовою після заголовка і відомостей про видання, транслітерованих латиницею, в [квадратних дужках] вказується переклад українського (російського) заголовка разом з відомостями про видання в англійську мову.

6. Для транслітерування прізвищ авторів, назв статей, книжок, видавництв тощо варто користуватися онлайн-конвертерами окремо для української та російської мов, посилання на які подані нижче. Ці ресурси пропонують найпоширеніші варіанти транслітерування: для української мови — згідно з чинним стандартом (Паспортний КМУ); для російської — відповідно до правил Держдепартаменту США. Такий підхід дозволить уніфікувати дані для міжнародних баз, адже різні системи транслітерації сприятимуть створенню різних результатів.

Онлайн-конвертер з української мови для транслітерації: <http://translit.kh.ua/?passport>.

Онлайн-конвертер з російської мови для транслітерації: <http://ru.translit.net/?account=bgn>.

Для україномовних і російськомовних статей, які використовують з журналів, рекомендуємо такий варіант структури бібліографічних посилань в References:

ПІБ авторів (транслітерація); рік видання в дужках; назва статті у варіанті, що транслітерується, і переклад назви статті англійською мовою в квадратних дужках []; назва джерела (транслітерація) і переклад назви джерела англійською мовою []; вихідні дані з позначеннями англійською мовою. позначення мови оригіналу (in Rus., in Ukr.).

Приклади оформлення списку літератури References та більше інформації дивіться на сайті журналу pre.org.ua в розділі «Вимоги до статей».

