

СТАЛИЙ РОЗВИТОК:
ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.
ЕНЕРГООЩАДНІСТЬ. ЗБАЛАНСОВАНЕ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Колективна монографія

**СТАЛИЙ РОЗВИТОК:
ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.
ЕНЕРГООЩАДНІСТЬ.
ЗБАЛАНСОВАНЕ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ.**

Колективна монографія

Київ
Яроченко Я.В.
2022



Міністерство освіти і науки України
Львівська обласна державна адміністрація
Національний університет «Львівська політехніка»
Інститут сталого розвитку ім. В. Чорновола
Західний науковий центр НАН України і МОН України
Львівська обласна організація Всеукраїнської Екологічної Ліги

**СТАЛИЙ РОЗВИТОК:
ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.
ЕНЕРГООЩАДНІСТЬ.
ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ.**

Колективна монографія

За редакцією проф. Мальованого М. С.

Київ
Яроченко Я.В.
2022

Міністерство освіти і науки України
Львівська обласна державна адміністрація
Національний університет «Львівська політехніка»
Інститут сталого розвитку ім. В. Чорновола
Західний науковий центр НАН України і МОН України
Львівська обласна організація Всеукраїнської Екологічної Ліги

*Рекомендовано Науковою радою
Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління
(протокол № 5-22 від 24.11.2022 року)*

Відповідальний за випуск:

Вронська Н. Ю. кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету «Львівська політехніка».

Рецензенти:

Пляцук Л. Д. доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій Сумського державного університету.

Шмандій В. М. доктор технічних наук, професор кафедри екології та біотехнології Кременчуцького Національного університету імені Михайла Остроградського.

Адаменко Я. О. доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Масікевич Ю. Г. Масікевич Ю. Г. доктор біологічних наук, професор кафедри гігієни та екології Вищого державного начального закладу України «Буковинський державний медичний університет».

*Колективна монографія опублікована за результатами 7-го Міжнародного конгресу
«Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування»*

С 76 **Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування** : колективна монографія / [авт. кол. : Мадані М. М., Крутоголова І. О., Андрєєва Н. М. та ін.] / за ред. проф. Мальованого М. С. – Київ : Яроченко Я. В., 2022 – 566 с. : рис., таблиці / Online-видання.

ISBN 978-617-7826-23-0 (Online)

Монографія присвячена освітленню результатів наукових доповідей, оголошених на 7-му Міжнародному конгресі «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» та відображає наукові дослідження авторів у сфері: екології, екологічної та цивільної безпеки, туризму, підприємництва та біржової діяльності тощо.

Для науковців, викладачів, аспірантів, докторантів тощо.

УДК: 502.17

РОЗДІЛ 1

**«ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОРІЗНОМАНІТТЯ,
МОНІТОРИНГ, АУДИТ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА ОЦІНКА
РИЗИКУ, ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ»**

1.1.	Мадані М. М. Використання ГІС для екологічної оцінки територіальних комплексів.....	7
1.2.	Крутоголова І. О., Андрєєва Н. М. Методичне забезпечення економіко-екологічної безпеки підприємств енергетичного сектору України.....	32
1.3.	Давибіда Л. І., Єршов М. О. Геопросторовий аналіз параметрів діючої мережі державної системи гідрогеологічного моніторингу України.....	47
1.4.	Лакида П.І., Василишин Р.Д., Мельник О.М. Екосистемні функції лісів у межах національних природних парків Українського Полісся.....	62
1.5.	Іващук О.С., Атаманюк В.М., Чижович Р.А., Манастирська В.А., Собечко І.Б. Дослідження одержання альтернативного твердого палива із відходів харчової промисловості.....	80
1.6.	Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Новікова Ю.П., Петров А.І. Дослідження з переробки торфу на композиційне паливо.....	93
1.7.	Кобзар С.Г., Гапонич Л.С., Голенко І.Л., Топал О.І. Дослідження процесу сумісного спалювання вугілля з паливом з твердих побутових відходів на ТЕС.....	104
1.8.	Назаревич Л.Є., Назаревич А.В. Сейсмічний і геоакустичний моніторинг для запобігання аварій на техногенно навантажених територіях.....	125
1.9.	Сухіна О.М., Антоненко В.М., Улицький О.А. Вартісна оцінка екосистемних послуг для встановлення плати за їх використання чи знищення: еколого-економічний контент національної безпеки (на прикладі національного парку «Бузький Гард»).....	149
1.10.	Уланов М.М. Екологічні засади виробництва водню на існуючих АЕС.....	173
1.11.	Вронська Н.Ю., Бондар О.І., Мальований М.С., Попович О.Р., Тимчук І.С. Актуальні проблеми сталого розвитку. Екологічні та економічні наслідки зміни клімату.....	190

		стор.
1.12.	Пясецька С.І., Щеглов О.А., Гребенюк Н.П. Порівняння полів середньої місячної температури повітря протягом кліматичних норм 1991-2020 рр. відносно 1961-1990 рр.....	202
1.13.	Попович О.Р., Вронська Н.Ю., Мальований М.С., Тимчук І.С. Огляд розвитку вітроенергетики як альтернативного джерела енергії в Україні і світі.....	229
1.14.	Тимофєєв В.Є., Кихтенко Я. В., Савчук С.В., Татарчук О.Г. Оцінка сонячних ресурсів та геліопотенціалу України у світі сучасних змін клімату.....	244
1.15.	Чумаченко С.Н., Луньова О.В., Гончаренко І.О., Луньов А. Концепція оцінювання впливу воєнно-техногенного навантаження на зміни біотичної складової екосистем в умовах ведення бойових дій.....	286

РОЗДІЛ 2

«ІННОВАЦІЙНІ ПРИРОДООХОРОННІ ТЕХНОЛОГІЇ. ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛІВ, ВОДИ ТА ЕНЕРГІЇ. ЕКОІНОВАЦІЇ В АРХІТЕКТУРІ»

2.1.	Павлюк О.В., Баран М.М., Каменських Д.С., Ткаченко Т.В., Євдокименко В.О. Макулатура – альтернативне джерело цінних матеріалів та речовин.....	300
2.2.	Пироженко Є.В. Інформативний метод контролю зразка пивних стоків міні-пивоварні.....	323
2.3.	Юшкевич П.О., Молчанов Л.С., Голуб Т.С. Узагальнення сучасного досвіду удосконалення конструкції футерівки печей віддзеркального типу в контексті раціонального ресурсокористування та сталого розвитку.....	343
2.4.	Сушацький Ю.В., Шепіда М.В., Знак З.О. Гетерогенний процес соно-фентон для деградації левоміцетину.....	357
2.5.	Бордун І.М., Мальований М.С., Борисюк А.К., Нагурський Н.О. Дослідження структури і магнітних властивостей магніточутливого вугілля з бурякового жому.....	381
2.6.	Sabliy L., Zhukova V. Improvement of the technology of local wastewater treatment of the meat plants.....	400

		стор.
2.7.	Чалаєв Д.М., Грабова Т.Л., Гончаров П.В., Базєєв Р.Е. Підвищення ефективності озонної технології очищення повітря в системах ОВіК.....	411
2.8.	Radovenchyk I.V., Trus I.M., Radovenchyk V.M., Gomelya M.D., Hlushchuk V.R. A new method of disposal of concentrated solutions by crystallization of their components.....	424
2.9.	Telyma S.V. Hydroecological analysis of impact of the filtration from main channels on the processes of flooding by the ground waters the adjacent territories in Kherson region.....	452

РОЗДІЛ 3

«ЕКОНОМІКО-УПРАВЛІНСЬКИЙ, ТУРИСТИЧНИЙ ТА ОСВІТНІ АСПЕКТИ У СИСТЕМІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ»

3.1.	Теребух А.А., Паньків Н.Є., Роїк О.Р. Актуальні питання екологічної безпеки в умовах ескалації російсько-української війни.....	480
3.2.	Синельников О.Д., Лоїк В.Б., Бабаджанова О.Ф. Вплив радіаційного опромінення та захист населення в умовах радіаційної небезпеки.....	517
3.3.	Корольчук Л.В. Екологізація освіти України на шляху до сталого розвитку....	532

РОЗДІЛ 1

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОРІЗНОМАНІТТЯ, МОНІТОРИНГ, АУДИТ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА ОЦІНКА РИЗИКУ, ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

ВИКОРИСТАННЯ ГІС ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ

Мадані М.М., Одеський національний технологічний університет, доцент
кафедри екології та природоохоронних технологій, м. Одеса,
Україна

Abstract

A geo-ecological assessment of the Tatarbunar district was carried out on the basis of spatial geo-informational analysis of remote sensing data. The distribution of heating of different types of land in the district and the amplitude of their fluctuations was analyzed based on thermal scanners – TIRS of the Landsat8 satellite. A seasonal analysis of the vegetation cover dynamics was carried out based on the values of the NDVI vegetation index. This is a spatial characteristic of the moisture content of different types of land in the district based on the NDMI index. According to these indicators, it is demonstrated that agricultural arable land has significantly greater heterogeneity than other types of terrestrial land. A comparative analysis of the percentage of the natural reserve fund of the district with other districts of Odesa, Mykolaiv and Kherson regions was carried out. The proposed ecologically balanced territorial structure of the land organization and measures to increase the ecological stability of the agro-landscapes of the district. A detailed hydrogeomorphological analysis of the Karachaus estuary was conducted, on the basis of which reclamation and nature protection measures were proposed.

Вступ

Татарбунарський район розміщується у південно-західній частині Одеської області та відображає основні ландшафтно-господарські особливості регіону: водні, сільськогосподарські, курортні та природоохоронні території. З іншого боку він є типовим аграрним районом області з повсюдним

розорюванням земель, з домінуючим антропогенним впливом у вигляді сільськогосподарської діяльності, яка на 91 % від загальної площі с/г угідь представлена у вигляді рілля, при цьому 4,16 % рілля з деградованими землями. Вже за цими даними зрозуміло, що така Земельна структура та форма природокористування має комплексний негативний вплив на еколого-економічні процеси та не може забезпечити сталий розвиток регіону, зокрема вона є антагоністичною по відношенню до унікальних перехідних екосистем водно-болотних угідь міжнародного значення, розташованих в межах району (деградація водотоків, замулення, забруднення ксенобіотиками, евтрофування, скорочення біологічного різноманіття в них та інше).

До вирішення питань збалансованого природокористування регіону можуть бути залучені дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) – спектрональні супутникові знімки, цифрові моделі рельєфу та геоінформаційні системи (ГІС), які дають змогу одночасно охопити досліджуваний регіон в цілому, здійснювати регулярний моніторинг і істотно зменшити витрати на дорогі експедиційні роботи, що дозволяє отримати великий масив характеристик стану територіальних комплексів району.

Для оцінки рівня перетворюваності природно-територіальних комплексів найбільше поширення отримали кількісні методи оцінки антропогенних змін ландшафтів, на основі співвідношення природних та антропогенних елементів. Методи ландшафтно-екологічної оптимізації та оцінки еколого-господарського балансу території на основі інвентаризації угідь з їх ранжуванням за ступенем антропогенних змін викладанні у роботах О. Л. Попової (2012), Л.П. Царика (2009).

Для України Стойко Н., Прасова В. (2017) розглядали питання планування структури землекористування, враховуючи міжнародний досвід, природні і економічні особливості.

У дослідженнях Гладун Г. Б. (2014) для Одеської області, включаючи Татарбунарський район, розглянуті адаптивно-ландшафтні принципи

застосування поєднаного лісорозведення, у тому числі площі необхідних поєднаних лісосмуг.

Соколов Є.В. (2015) у своїх дослідженнях для Татарбунарського району провів оцінку екологічного стану земельних ресурсів, на основі показників розораності, вмісту гумусу, екологічної стійкості, ерозії та інші, включаючи інтегральні індекси. Продемонстровано, що земельні ресурси району не відповідають вимогам раціонального природокористування, в першу чергу, за рахунок порушення співвідношення площі ріллі.

Аналіз природоохоронного режиму прибережно-захисних смуг (ПЗС) гідроекосистем Татарбунарського району і структури їх угідь проведено в роботі Рубеля О. Е. (2009) та зазначено, що район характеризується дуже низькою інвентаризацією ПЗС з відповідною проектною документацією. В цій же роботі проаналізовані проблеми ефективного і комплексного використання лиману Сасик опрісненого в результаті подачі в нього річкової води з каналу «Дунай-Сасик». В колективній роботі Ю. П. Зайцева, Б. Г. Олександрова (2006) з урахуванням антропогенного впливу проаналізовані особливості гідрологічного, гідрохімічного та гідробіологічного режимів екосистем лиманних комплексів розташованих в межах району, зокрема лиманів Тузловської групи (Шагани, Алібей, Бурнас).

В роботі розглянуті можливості застосування даних дистанційного зондування Землі для функціональної оцінки змінених антропогенною діяльністю угідь, в першу чергу ріллі, проведено аналіз еколого-господарського балансу району на основі геоекологічних коефіцієнтів, виділені ділянки, які в першу чергу мають екологічні ризики екзогенних процесів та впливу антропогенних чинників на основі геоморфологічних особливостей з використання цифрових моделей рельєфу. Запропоновані заходи підвищення екологічної стабільності агроландшафтів та ландшафтно-антропогенної структури угідь району. Проведено гідрографічне районування та виділені водозбірні площі Татарбунарського району. Для одного з них – водозбірного

басейну л. Карачаус проаналізовані гідролого-морфологічні особливості та розроблена схема впровадження заходів щодо сталого природокористування. Представлений картографічний матеріал вищезазначених складових, не дивлячись на те, що матеріали статті несуть в першу чергу демонстраційні та методологічні аспекти, може бути використаний для подальшої, більш глибокої просторово-часової оцінки екологічного стану територіальних комплексів району, спрямованої на розробку менеджмент-планів зі сталого природокористування.

Метою роботи є: функціональна оцінка екологічного стану ландшафтно-господарської структури та розробка рекомендацій з захисту природно-територіальних комплексів Татарбунарського району Одеської області на основі використання ГІС та даних ДЗЗ.

Основними завданнями, спрямованими на виконання мети були:

- оцінка екологічних параметрів (температура прогріву територіальних комплексів, посушливість, стан рослинної біомаси) та їх взаємозв'язку в просторовій і часовій динаміці одночасно на всій території району;
- оцінка стану природокористування та його збалансованість;
- аналіз рельєфу місцевості і виділення ділянок, які в першу чергу мають найбільший екологічний ризик екзогенних процесів та впливу антропогенних чинників;
- гідрографічне районування та розробка заходів зі сталого природокористування та природоохоронних заходів водозбірного басейну л. Карачаус «Тузловського комплексу».

Матеріали та методи досліджень

В якості вихідних даних використовувались супутникові знімки Landsat8 з сенсорами OLI та TIRS (USGS GlobalVisualizationViewer, 2021), цифрові моделі рельєфу просторової роздільної здатності 30 м, які отримані за результатами радарної зйомки в рамках міжнародної місії – «Shuttle radar

topographic mission» (SRTM30). Просторовий розподіл населення проводився на основі даних «OpenStreetMap» (Open Street Map Wiki contributors. Map Features, 2021), з використанням автоматичної інтерполяції методом IDW (обернено-зважених відстаней). Просторовий аналіз та обробка даних здійснювались в програмному ГІС пакеті Qgis v 3.4.6, в якому також здійснювались радіометричне калібрування та атмосферна корекція супутників Landsat8 на основі використання геоінформаційного модулю «Semi automatic plugin».

Для перерахунку спектральної яскравості далекого інфрачервоного випромінювання в одиниці температури були використані значення розрахункових коефіцієнтів відповідно до методики розрахунку (Using the USGS Landsat 8 Product, 2021) з файлу метаданих, який додається до супутникових знімків.

Для кількісної оцінки рослинного покриву був розрахований Normalized Difference Vegetation Index – NDVI (Нормалізований відносний індекс рослинності) (Dalezios, 2002), який є одним з найпоширеніших індексів для вирішення завдань з кількісної оцінки рослинного покриву.

Розподіл обводнення території оцінювався за допомогою модифікованого нормалізованого диференційного водного індексу (NDMI), який є похідною від ближньої і короткохвильової інфрачервоної частинами спектра довжини хвиль та є характеристикою рівень посушливості ландшафтних комплексів (Wilson & Sader, 2002).

Для розрахунку ділянок з потенціалом площинної ерозії був використаний LS-factor (length, slope factor), який об'єднує вплив ухилу і довжини схилу місцевості, розрахований за відповідною методикою на основі цифрової моделі рельєфу (Moore and Burch, 1995).

Виклад основного матеріалу

Аналіз розподілу температури територіальних комплексів Татарбунарського району

Однією з найважливіших фізичних характеристик в екологічних дослідженнях є поверхнева температура, яка характеризує інтенсивність процесів в природних середовищах і ступінь їх однорідності. Аналіз розподілу температури територіальних комплексів Татарбунарського району на основі супутника Landsat8 дозволив виявити високу амплітуду показника. Так, наприклад, за результатами супутникової зйомки Landsat8 максимальне значення температури територіальних комплексів склало $28,50^{\circ}\text{C}$, тоді як мінімальне значення – $16,41^{\circ}\text{C}$, стандартне відхилення температури – $3,88^{\circ}\text{C}$, коефіцієнт варіації 24 % – досить однорідний, головним чином за рахунок розораних ґрунтів без рослинного покриву (рис. 1), доля яких на цю дату склала 78 % від загальної площі суші району. Саме ці ділянки мають найбільший прогрів поверхні (рис. 2).

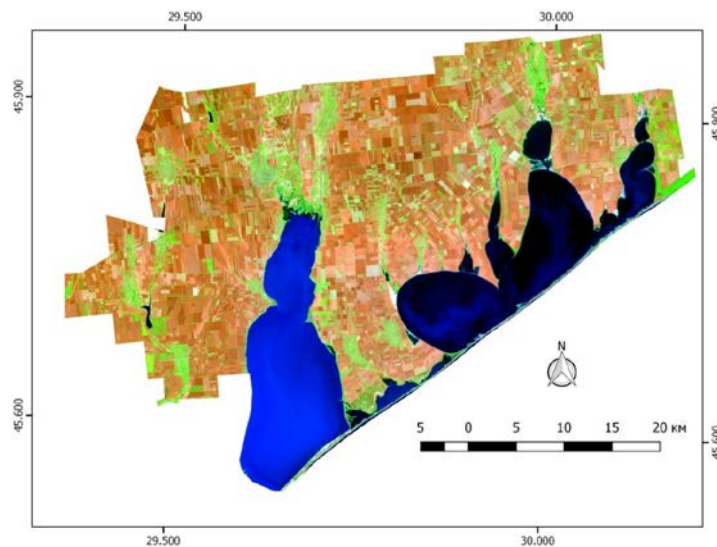


Рис. 1. Кольорово-синтезоване зображення природно-територіальних комплексів Татарбунарського району на основі спектральних каналів супутника Landsat 8: B7 – середній ІЧ2 (SWIR-2); B5 – ближній ІЧ (NIR); B3 – зелений (Green) отримане 22 вересня 2021 року

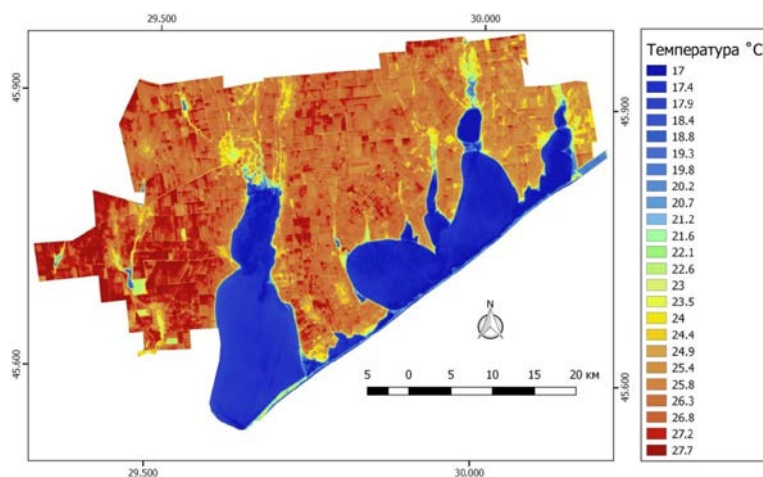


Рис. 2. Розподіл поверхневої температури (LST) природно-територіальних комплексів Татарбунарського району за даними термального каналу B10 супутника Landsat8 отримане 22 вересня 2021 року

Загалом для району найбільший частотний розподіл значень температур припадає на розорані землі та водні об'єкти (рис. 3).

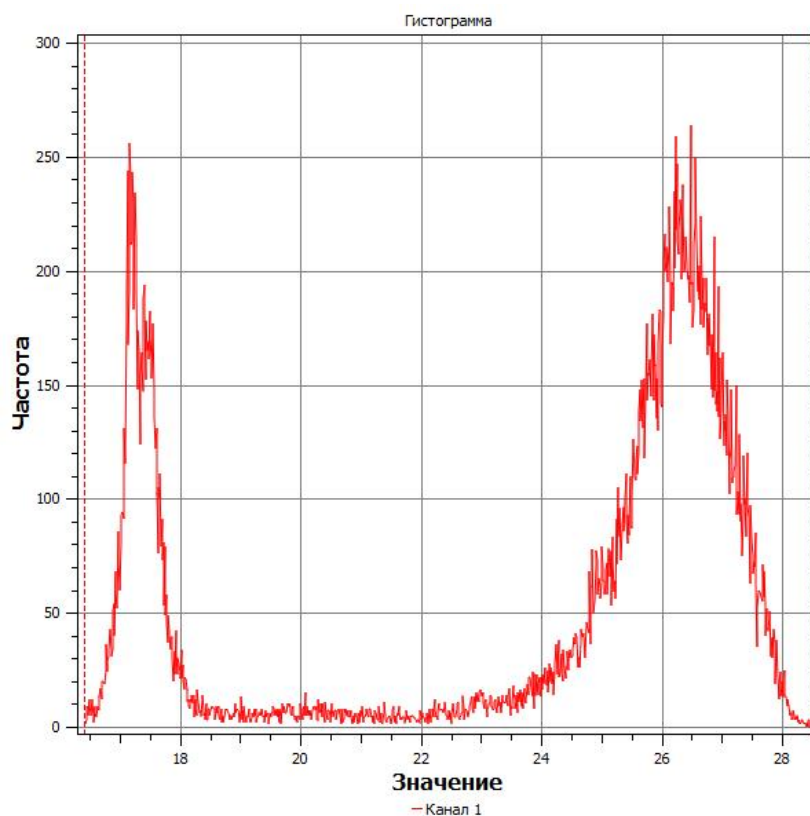


Рис. 3. Гістограма значень розподілу поверхневої температури (LST) територіальних комплексів Татарбунарського району за даними Landsat8 отримане 22 вересня 2021 року

Амплітуда коливань температури наземних угідь на території району склала 9,81 °С для одного і того ж періоду часу, тобто прогрів розораного ґрунту навіть восени більше майже на 10 °С, ніж під рослинним покривом, що безумовно впливає на гідрологічні, геохімічні та біологічні процеси району.

Динаміки рослинного покриву. Просторовий розподіл NDVI за часом на території району дозволив виявити значну зміну показника навіть на протязі одного місяця. Так, наприклад, розрахунок NDVI на момент 24.05.2021 р., показав, що максимальні значення в діапазоні 0,5-0,81 – густий рослинний покрив (табл. 1) мали землі площею 341,66 км² (рис. 4), у кінці літа – 26.08.2021 р. землі з максимальними значеннями індексу в діапазоні 0,5-0,79 займали площу 55,45 км² (рис. 5), а ще через місяць рослинний покрив із значенням індексу в діапазоні більше 0,5 зменшився до площі 13,641 км² (рис. 6), тобто більше ніж в 25 разів у порівнянні з травнем, що в першу чергу пов'язано зі збором врожаю та розорюванням земель.

Таблиця 1

Значення індексу NDVI для різних об'єктів

Тип земельного покриву	NDVI (шкала від: -1 до 1)	NDVI (шкала від: 0 до 255)
Густа рослинність	$0.500 \leq \text{NDVI} \leq 1$	$210 \leq \text{NDVI} \leq 255$
Розріджена рослинність	$0.140 \leq \text{NDVI} < 0.500$	$118 \leq \text{NDVI} < 210$
Бідна рослинність	$0.090 \leq \text{NDVI} < 0.140$	$105 \leq \text{NDVI} < 118$
Гола земля	$0.025 \leq \text{NDVI} < 0.090$	$88 \leq \text{NDVI} < 105$
Хмари	$0.002 \leq \text{NDVI} < 0.025$	$83 \leq \text{NDVI} < 88$
Сніг та лід	$-0.046 \leq \text{NDVI} < 0.002$	$70 \leq \text{NDVI} < 83$
Вода	$-1 \leq \text{NDVI} < -0.046$	$0 \leq \text{NDVI} < 70$

Характерною особливістю агроландшафтів, а саме ріллі, в порівнянні з іншими природно-територіальними комплексами є наявність суттєвої сезонної динаміки кількості і щільності рослинної біомаси, відповідно за значеннями індексу NDVI, особливо в період з травня до жовтня. Ця властивість пов'язана з процесом обробки і вирощування цього типу угідь. При цьому, відповідні

значення рослинної біомаси інших типів угідь за той же період змінюються не так суттєво (табл. 2).

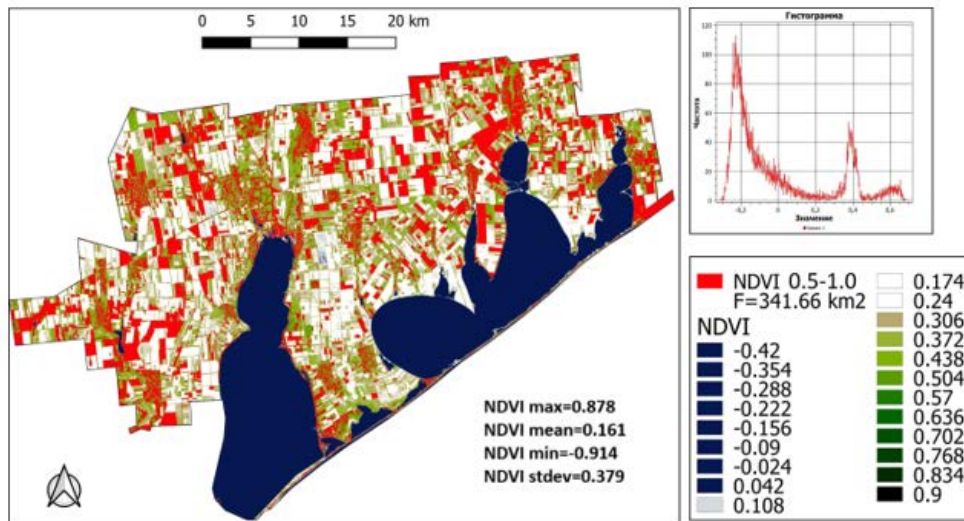


Рис. 4. Розподіл індексу NDVI на території Татарбунарського району
отримане 20 липня 2021 року

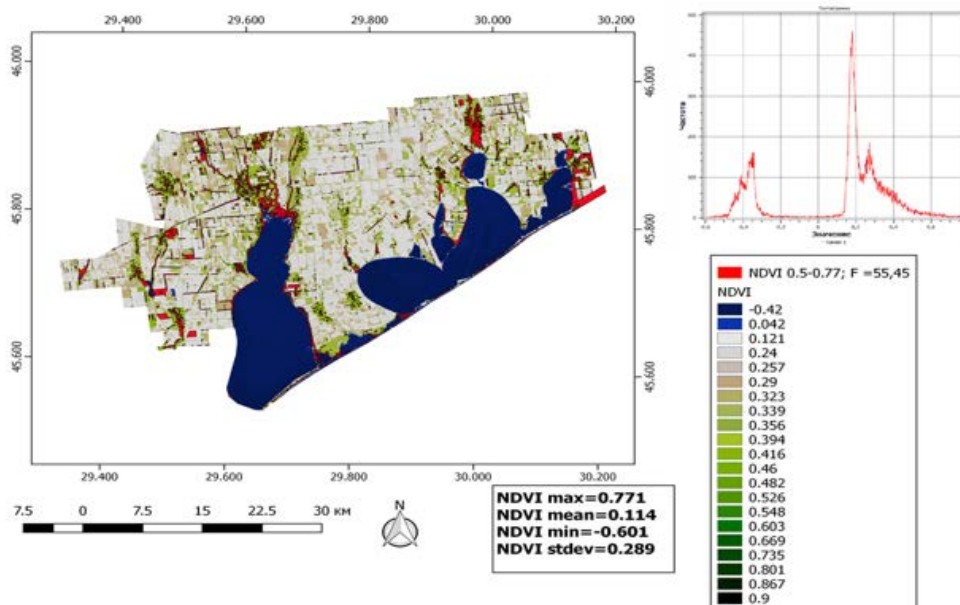


Рис. 5. Розподіл індексу NDVI на території Татарбунарського району
отримане 26 серпня 2021 року

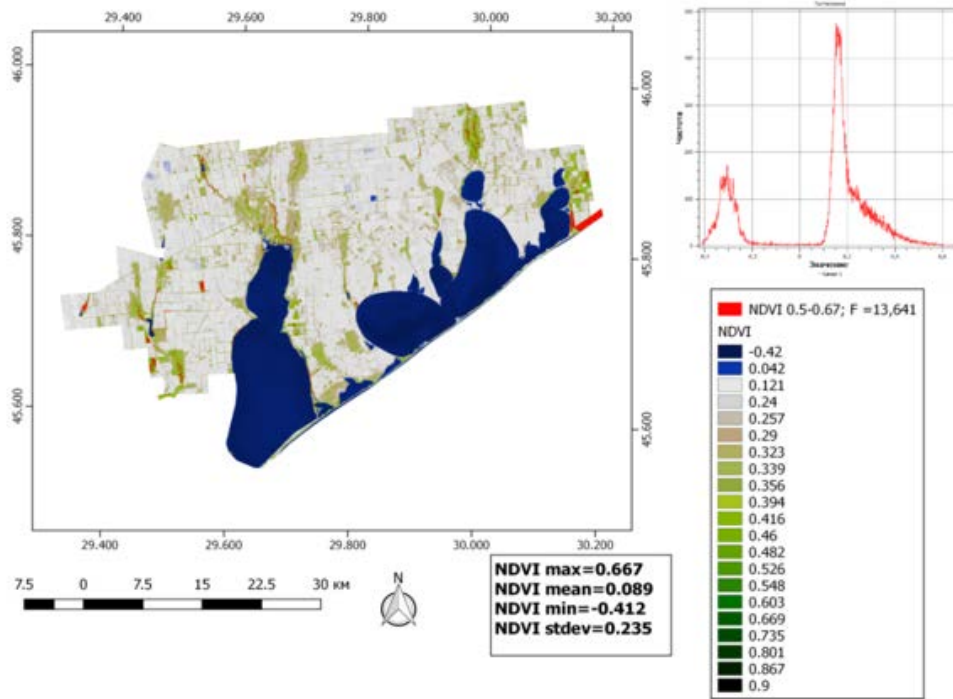


Рис. 6. Розподіл індексу NDVI на території Татарбунарського району
отримане 22 вересня 2021 року

Таблиця 2

Значення індексу NDVI для наземних угідь Татарбунарського району

Тип угіддя	24.05.2021			20.07.2021			22.09.2021		
	Серед.	Макс.	Мін.	Серед.	Макс.	Мін.	Серед.	Макс.	Мін.
Рілля	0,57	0,81	0,11	0,51	0,77	0,08	0,14	0,69	0,05
Луки	0,53	0,79	0,40	0,46	0,70	0,31	0,33	0,56	0,22
Плавні	0,57	0,81	0,43	0,58	0,79	0,50	0,42	0,62	0,31
Ліси	0,75	0,81	0,53	0,74	0,81	0,49	0,55	0,64	0,34

Оцінка водозабезпеченості. Оцінка водозабезпеченості території є важливою характеристикою в області водного господарства та розробки принципів раціонального використання водних ресурсів регіону. Дані спектральної супутникової зйомки поряд з польовими і метеорологічними дослідженнями дозволяють отримати додаткову інформацію вмісту вологи в ґрунтах і в рослинному покриві використовуючи, наприклад нормалізований диференційований індекс зволоженості (NDMI). Високий вміст вологи

характерний для здорової рослинності, яка швидше росте та більш стійка до пожеж.

Як впливає з розподілу індексу 22.09.2021 р. найменші його значення притаманні для розораних ґрунтів, найбільші значення для ділянок з рослинним покривом і прибережних територій (рис. 7).

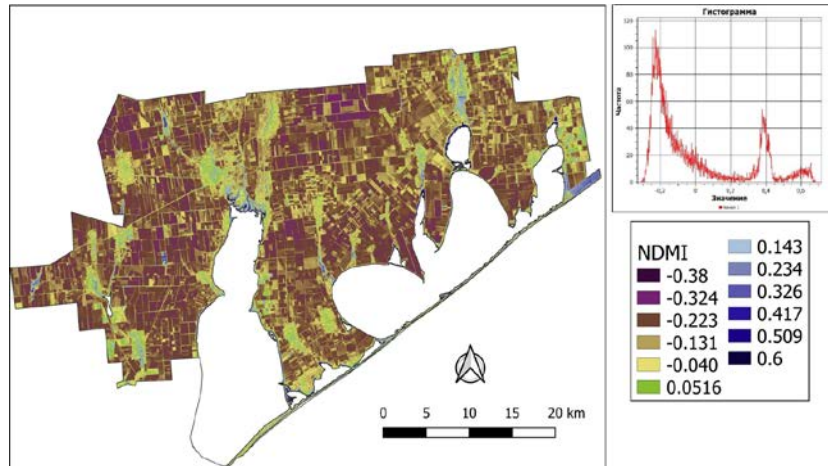


Рис. 7. Розподіл індексу NDMI для Татарбунарського району за даними супутника Landsat8 отримане 22 вересня 2021 року

Порівняльний регресійно-кореляційний аналіз функціональних показників.

Порівняльний аналіз растрових поверхонь функціональних показників Татарбунарського району – прогріву, розвитку рослинності та зволоженості територіальних комплексів, розрахованих за матеріалами спектрозональних супутникових знімків отриманих 22.09.2021 р., вже візуально дозволяє виявити взаємозв'язок між ними.

Градiєнт температур найбільшій на ділянках між рослинним покривом та «голими» ґрунтами, що також вказує на зв'язок між рослинним покривом та температурою. Для кількісної характеристики цих процесів була обрана тестова ділянка ріллі на території району з засіяними та розораними угіддями. Розрахунок кореляційного зв'язку між поверхневою температурою LST, вегетаційним індексом NDVI та індексом зволоженості угідь NDMI продемонстрував статистично-значущий кореляційний зв'язок (рис. 8).

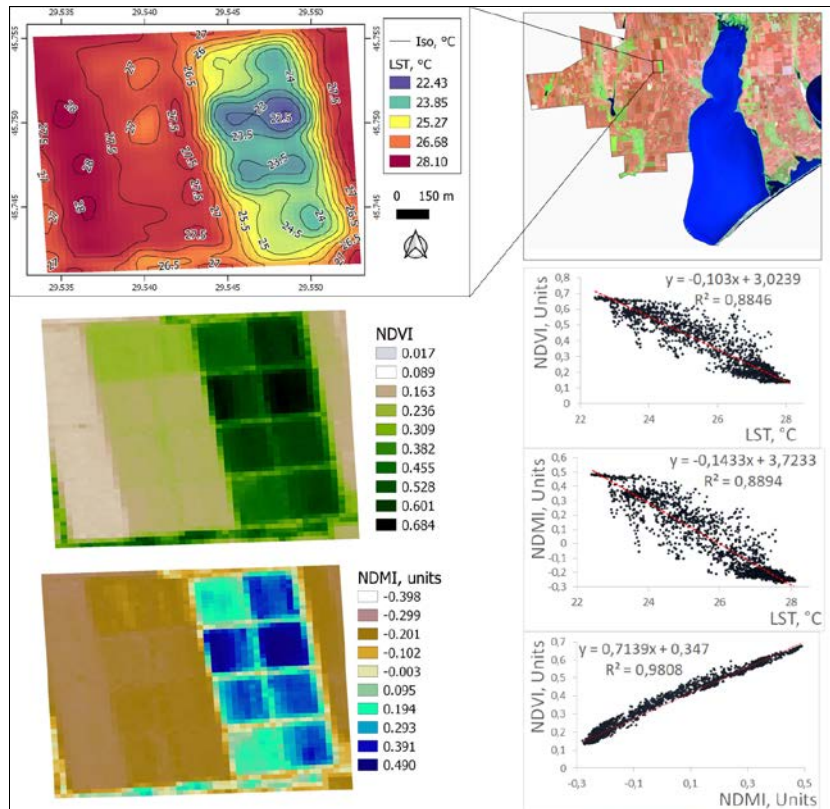


Рис. 8. Розподіл поверхневої температури LST, вегетаційного індексу NDVI та індексу зволоженості угідь NDMI на тестовій ділянці ріллі на території Татарбунарського району з засіяними та розораними угіддями за даними Landsat8 отримане 20 вересня 2021 року

За коефіцієнтом детермінації (R^2) між зазначеними характеристиками розподіл значень найбільш щільний для розорюваних ґрунтів. Розподіл ізотерм вказує на найбільший градієнт в пограничній зоні між ґрунтами та рослинним покривом.

Структура землекористування. Аналіз структури землекористування на території Татарбунарського району за даними екологічного паспорта Одеської області показав, що в цілому його територія характеризується значною площею об'єктів природно-заповідного фонду (рис. 9), за рахунок водно-болотних угідь: Тузловського комплексу лиманів: «Шагани-Алібей-Бурнас» (унікальних прибережних водойм естуарно-лагунного типу, сформованих під впливом трансгресії моря в геологічному минулому).

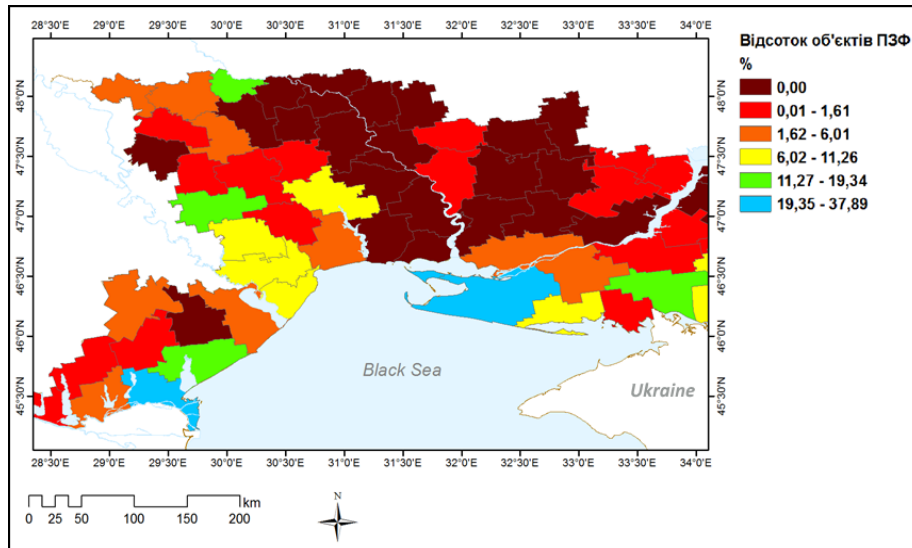


Рис. 9. Відсоток об'єктів природно-заповідного фонду в адміністративних районах областей північно-західного Причорномор'я

Відсоток ПЗФ за районом в цілому складає 16,5 % (територія суші разом з водними об'єктами), тоді як в більшості адміністративних районів Причорноморських областей об'єкти ПЗФ, або відсутні зовсім, або їх кількість менше 2 %.

Незважаючи на значний відсоток від загальної площі району об'єктів ПЗФ та Рамсарських водно-болотних угідь міжнародного значення, які формують екомережу Одеської області, структура землекористування району украї незбалансована. Значну частину територій району займає рілля – 61,44 %, або 81,61 % від площі суші (табл. 3), при цьому доля повністю деградованих з них більше 4 %. Така структура землекористування району незбалансована, оскільки при порушенні сталих екологічних зв'язків більш ніж на 40 % система знецінюється і деградує.

Таблиця 3

**Структура земель Татарбунарського району разом з водними об'єктами
(за даними екологічних паспортів та супутникових вимірів)**

Назва об'єктів	Площа, тис. га	Відсоток, %	
		Разом з водними об'єктами	Без урахування водних об'єктів
Загалом район	174,30	100,00	100,00
Об'єкти ПЗФ (землі запасу)	5,45	3,13	4,16
Ліси під ПЗФ	0,54	0,31	0,41
Водні об'єкти під ПЗФ	22,90	13,13	-
Інші водні об'єкти	20,21	11,59	-
Плавні та заболочені землі	3,18	1,82	2,42
Ліси	3,60	2,06	2,74
Пасовища, сіножатті	5,40	3,10	4,12
Рекреаційні території	0,10	0,06	0,08
Прибережні захисні смуги	0,27	0,15	0,21
Багаторічні насадження	0,62	0,36	0,47
Піщані відкриті землі	0,74	0,43	0,56
Рілля з деградованими землями	4,28	2,46	3,26
Рілля	102,80	58,98	78,35
Площі ТБО	0,059	0,03	0,04
Міські населені пункти	2,85	1,64	2,17
Сільські населені пункти	1,37	0,79	1,04

Розрахунок комплексних геоекологічних показників. Відповідно до класифікації земель за ступенем антропогенного навантаження (АН) розраховані коефіцієнти антропогенного трансформування території (табл. 4), що характеризують еколого-господарський баланс (ЕГБ) території Татарбунарського району.

Розрахунок коефіцієнтів еколого-господарського балансу
для Татарбунарського району

Геоекологічні коефіцієнти ЕГБ	Територія району	
	з водними об'єктами включно	суша (без водних об'єктів)
Коефіцієнт абсолютної напруженості (Ка)	0,30	1,35
Коефіцієнт відносної напруженості (Кв)	1,77	5,59
Площа угідь з ресурсно-стабілізуючими функціями (Рсф, тис. га)	68,66	29,66
Коефіцієнт природної захищеності (Кез)	0,39	0,23

Розрахунок коефіцієнтів еколого-господарського балансу території Татарбунарського району також продемонстрував відсутність збалансованості ландшафтно-господарських комплексів та низької середовище-захисної функції екологічної структури територіальних комплексів.

Високі значення коефіцієнта відносної напруженості Кв (більше одиниці), свідчать про еколого-господарську незбалансованість території. За коефіцієнтом абсолютної напруженості Ка можна зробити висновок, що кількість антропогенно-трансформованих земель у відношенні до природоохоронних і невживаних земель значно менша. Коефіцієнт природної захищеності водозбору має низьке значення – менше 0,5, що свідчить про критичний рівень захищеності території.

Заходи з підвищення екологічної стабільності агроландшафтів. На оброблюваних землях рекомендується збільшити захисну лісистість території шляхом доповнення існуючої мережі природоохоронних лісосмуг. Оптимальна довжина між лісозахисними смугами на південних чорноземах повинна бути не більше 400 м, з площею до 60-70 га на плакорі і до 30-40 га на схилі. Доцільно відійти від практики створення полів площею 150-200 га, та більше, на яких

слабо проявляється роль біологічних регулюючих механізмів полезахисних лісосмуг.

Аналіз геоморфологічних особливостей району. Виходячи з аналізу геоморфологічних особливостей Татарбунарського району, які обумовлюють геохімічні потоки, переносу теригенної речовини, ерозію ґрунтів та інші процеси, з використанням цифрових моделей рельєфу SRTM30 були виділені ділянки з ухилом більше 3° , які мають найбільший екологічний ризик екзогенних процесів та впливу антропогенних факторів (рис. 10).

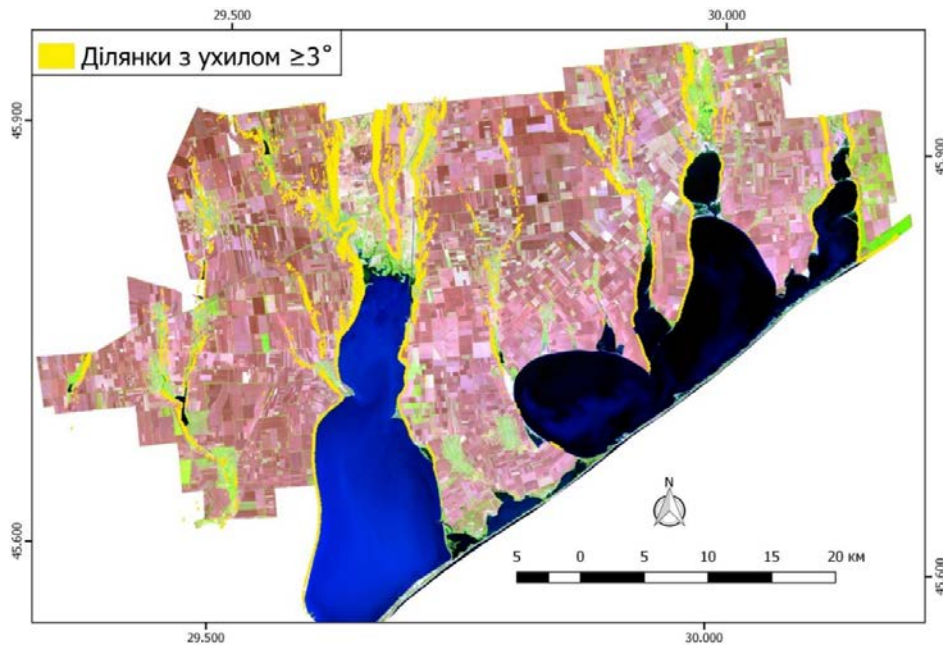


Рис. 10. Розподіл ділянок з ухилом $\geq 3^\circ$ на території Татарбунарського району за даними цифрових моделей рельєфу SRTM30 накладені поверх супутникового знімку Landsat8 отримані 22 вересня 2021 року

Розташування цих ділянок притаманно яружно-балочним структурам, річковим долинам та схилам берегів лиманів. Ці ділянки повинні використовуватися в «натуральному» стані (сіножатні, пасовища, багаторічні насадження, зони рекреації і туризму) з вилученням з них орних земель під рілля. За їх місцезнаходженням майже всі вони входять в склад прибережно-захисних смуг та земель водного фонду згідно з водним кодексом України, на яких досі не розроблена відповідна проектна документація у повному розмірі. Найбільш доцільно з точки зору еколого-господарського балансу території

провести інвентаризацію ландшафтно-господарської структури перш за все на цих ділянках з винесенням їх до кадастрових схем та планів землеустрою, з формуванням тут природоохоронного режиму.

Розподіл населених пунктів та населення. Розподіл населених пунктів та щільності населення на території Татарбунарського району свідчить, що досить велика кількість з них розміщена саме на ділянках річкових долин та в місцях з ухилом більше 3° (рис. 11), що також призводить до інтенсифікації екзогенних процесів та забруднення водних об'єктів. Обтяжливою обставиною є те, що в багатьох з них нема централізованої каналізаційної системи. В цілому територія характеризується відсутністю великих міст та невеликою щільністю населення.

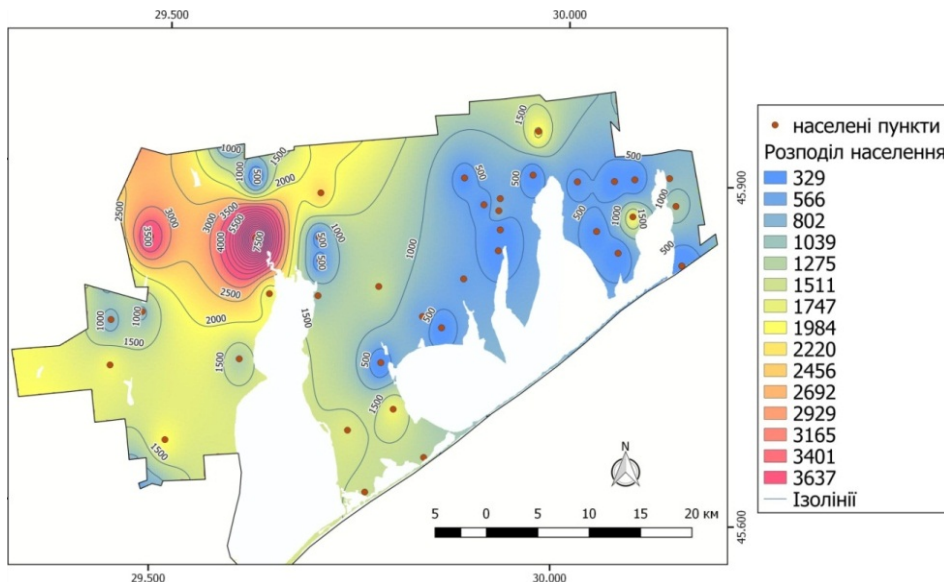


Рис. 11. Розподіл щільності населення на території Татарбунарського району, побудований за даними OpenStreetMaps в програмному пакеті Qgis

Гідрографічне районування. Інший підхід до формування збалансованої структури землекористування, екологічної мережі та сталого розвитку району – це гідрографічне районування. Згідно з вимогами Водної Рамкової Директиви ЄС, які наразі імплементуються у національне законодавство – управління екологічним статус-класом водних об'єктів ґрунтується на басейновому підході з розробкою відповідних менеджмент-планів та формуванням басейнових органів управління. На території району протікають малі річки, розташовані

частини водозбірних басейнів Тузловського комплексу лиманів, л. Сасик тощо (рис. 12).

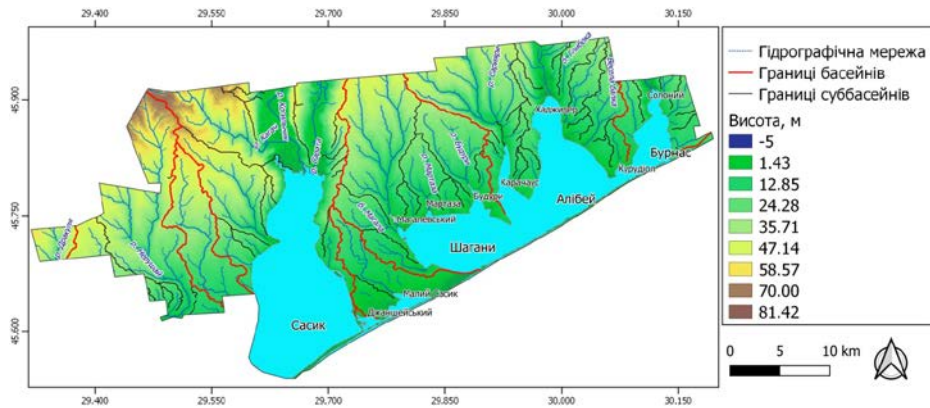


Рис. 12. Гідрографічна мережа Татарбунарського району та її водороздільні межі

Гідрологоморфологічний аналіз водозбірного басейну л. Карачаус. Для подальшого гідролого-морфометричного аналізу та розробки природоохоронних заходів була обрана водозбірна ділянка л. Карачаус (дочірній лиман з розвинутою яружно-балковою системою) Тузловського комплексу, в границях району. Сучасні можливості ГІС аналізу дозволили розрахувати ряд гідролого-морфологічних показників водозбірної площі (рис. 13), які дають змогу визначити місця найбільшого прояву екзогенних та антропогенних процесів (схилів ділянки, напрямок та інтенсивність поверхневого стоку, прояви лінійної та площинної ерозії).

Як свідчить ретельний гідролого-морфологічний аналіз дана ділянка не передбачає повсюдне інтенсивне природокористування, оскільки має розвинуту яружно-балкову систему та розчленованість рельєфу. Зрозуміло, що природокористування в таких умовах повинно бути диференційоване просторово, розплановано за інтенсивністю, природньо та оселищно збалансовано з урахуванням функцій екологічної мережі.

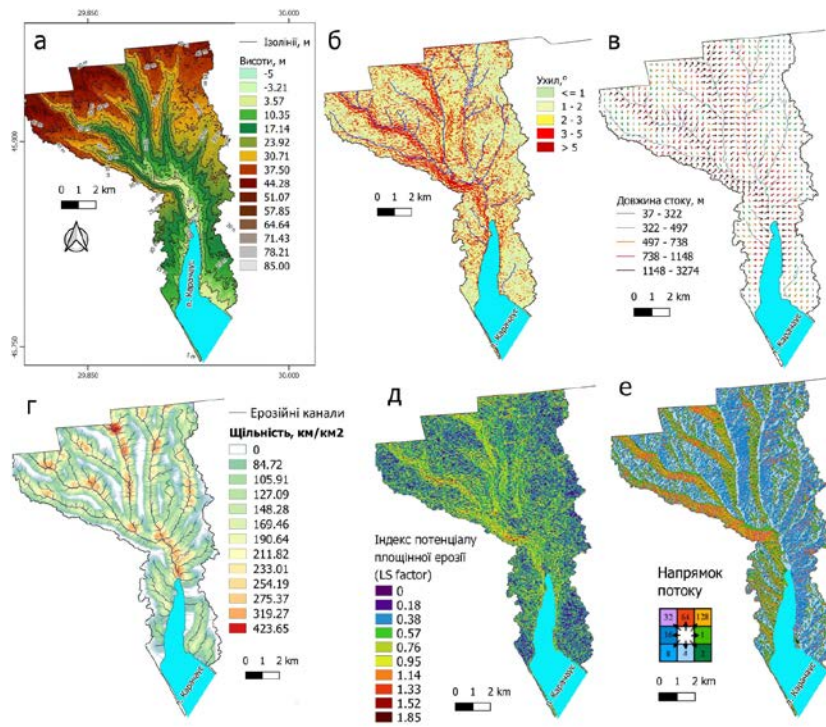


Рис. 13. Гідролого-морфологічні особливості частини водозбірної площі Тузовського лиманного комплексу в границях Татарбунарського району: а - висот місцевості; б - ухилів; в - векторів стоку; г - структури лінійної ерозії, та щільності; д - ризику розвитку площинної ерозії; е - напрямок стоку кожної комірки растру

Рекультиваційні та природоохоронні заходи. Переходячи до запропонованих заходів сталого природокористування з подальшої розробки екологічного менеджмент-плану, слід згадати також про законодавчо обумовлені природоохоронні заходи стосовно земель водного фонду та винесення їх в натуру, перш за все це природозахисні смуги (ПЗС) вздовж водотоків. Принципи їх встановлення, структура та природоохоронний режим визначається згідно з законом прямої дії в цій сфері – Водним Кодексом України (Ст. 88-90), що включає ПЗС вздовж водотоків, ПЗС вздовж морів та лиманів (з виділенням пляжної зони).

Наразі природокористування у вигляді повсюдного розорювання земель, несанкціонованої селищної розбудови на території водозбірного басейну ведеться без урахування рельєфу та яружно-балкової системи, без дотримання агротехнічних норм та відповідного захисту земель, в результаті чого

поширюється як глибинна так і площинна ерозія (рис. 14а), крім того лісозахисні смуги розміщені недостатньо раціонально для виконання захисту від вітрової (дефляції) та водної ерозії ґрунтів, а також пов'язаного з ними зниження екологічного статус-класу водних об'єктів. З урахуванням гідролого-морфологічних умов, стану земель, зарегулювання водотоків та природоохоронних законодавчих норм, пропонується переорієнтувати структуру землекористування, збільшити кількість середовищно-захисних угідь, виділити ділянки з екстенсивною формою землекористування, що безумовно буде корисним для формування екологічної мережі (рис. 14б).

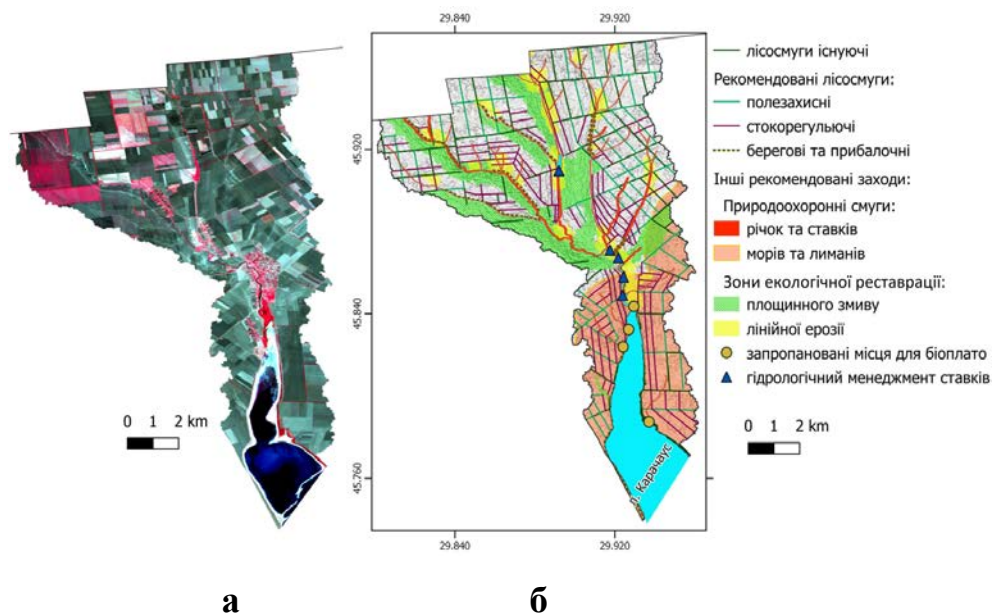


Рис. 14. Існуюча (а) та рекомендована (б) структура землекористування водозбірного басейну л. Карачаус в границях Татарбунарського району: а – повнокольоровий супутниковий знімок Sentinel2 отриманий 20 вересня 2021 року з комбінації каналів NIR-Green-Blue (рослинність має червоний колір); б – схема рекультиваційних та природоохоронних заходів (менеджмент план у першому наближенні)

Перш за все необхідно винесення земель водного фонду в «натуру» нанесення їх на плани землеустрою населених пунктів і в земельні кадастри. Крім того на території ділянки та всього району недотримані належні агротехнічні заходи, зокрема сільськогосподарські угіддя недостатньо оконтурені лісозахисними полосами. Існуюча структура лісосмуг складає

80,9 км, біля третини полів взагалі не мають лісосмуг, відстань між лісосмугами в середньому складає 1 км, відповідна площа окантування – 200 га. Така структура лісосмуг не виконує природоохоронну функцію, тому рекомендується збільшити її у 3 рази. При цьому вона повинна щонайменше включати вітрозахисні (92,1 км), стокорегулюючі (124,7 км), берегові та прибалкові (30,8 км). Додаткові лісосмуги були нанесенні наступним чином: вітрозахисні з урахуванням переважаючих напрямків вітрів з розміром комірки 500 на 1000 м; стокорегулюючі лісосмуги розташовувались на схилових ділянках вздовж горизонталей на відстані 400-300 м, залежно від ухилу; берегові та прибалкові лісосмуги уздовж еродованих балок за 3-5 м від брівок берегів. В якості попередження поширення еродованості земель також рекомендується на частині з них (на схилах яружно-балкових систем) провести залуження, консервування та експлуатаційне переорієнтування (використання в квазіприродному стані – багаторічні насадження, пасовища, сіножаті тощо). Для можливості контролю якості та кольматації організованого стоку ярів та балок, в їх гирлових ділянках повздовж лиману пропонується створити біологічні фільтри – біоплато (штучні екосистеми, основою яких є фільтраційні синузії). Фактично на території басейну знищені малі місцеві річки в результаті розорювання гідрографічної мережі та зарегулювання ставками. Рекомендується або повна ліквідація несанкціонованих ставків, або їх функціонування у випадку належної природоохоронної документації та режимів експлуатації залежно від водності року.

Розміщувати та використовувати орні землі бажано було б на ділянках з плакорним типом місцевості та на підставі принципів адаптивного землеробства, з впровадженням ґрунтозахисних сівозмін і використанням нетрадиційних агротехнічних заходів (мінімізації обробки ґрунту, оптимізації ротації, вдосконаленням систем поливу та ін.).

Висновки

В результаті ГІС аналізу термальних каналів супутникових знімків Landsat8 було виявлено значну амплітуду коливань температури територіальних комплексів Татарбунарського району. Прогрів розораного ґрунту в літній період більше на 10 °С, ніж під рослинним покривом, що безумовно впливає на гідрологічні, геохімічні та біологічні процеси району при сучасному рівні сільськогосподарського освоєння угідь у вигляді ріллі.

Розподіл динаміки рослинного покриття за рахунок NDVI на території району виявив значну зміну показника за сезонами та, навіть, на протязі одного місяця. Території з максимальними значеннями індексу, які відповідають густому рослинному покриттю, на момент 24.05.2021 р. займали площу 341,66 км², у кінці літа – 26.08.2021 р., відповідно - 55,45 км², а ще через місяць площа рослинного покриття в цьому діапазоні індексу зменшилась до значення 13,64 км², тобто більш ніж у 25 раз в порівнянні з травнем, в першу чергу це пов'язано зі збором врожаю та формою обробітку ґрунту у вигляді ріллі.

Характерною особливістю ріллі в порівнянні з іншими природно-територіальними комплексами (ландшафтами) є наявність суттєвої сезонної динаміки кількості і щільності рослинної біомаси, відповідно за значеннями індексу, особливо в період з травня до жовтня. При цьому, відповідні значення рослинної біомаси інших типів угідь за той же період змінюються не так суттєво.

Аналіз структури землекористування на території Татарбунарського району показав, що в цілому на його території міститься велика площа об'єктів природно-заповідного фонду, головним чином за рахунок аквальних ділянок Тузловського комплексу лиманів. Відсоток ПЗФ у районі в цілому складає 16,5 % (разом з водними акваторіями), але значну частину територій району займає рілля – 61,44 %, або 81,61 % від площі суші. Нераціональна сільськогосподарська діяльність призвела до деградації гідрографічної мережі малих річок району, формування ерозії ґрунтів, яроутворення, зниження

екологічного статус-класу водних об'єктів, у тому числі природоохоронних акваторій з міжнародним статусом Рамсарських угідь.

Результати розрахунку комплексних геоекологічних показників також продемонстрували екологічну незбалансованість структури угідь. Високі значення коефіцієнта відносної напруженості K_v (більше одиниці), свідчать про еколого-господарську незбалансованість території. За коефіцієнтом абсолютної напруженості K_a можна зробити висновок, що кількість антропогенно-трансформованих земель у відношенні до природоохоронних і невживаних земель значно менша. Коефіцієнт природної захищеності водозбору має низьке значення – менше 0,5, що свідчить про критичний рівень захищеності території.

Розподіл населених пунктів та населення на території Татарбунарського району свідчить, що досить велика кількість з них розміщена на ділянках річкових долин, та в місцях з ухилом більше 3° , що також призводить до інтенсифікації екзогенних процесів та забруднення водних об'єктів. Обтяжливою обставиною є відсутність в багатьох з них централізованої каналізаційної системи.

Менеджмент-план л. Карачаус (у першому наближенні), який розроблений на основі гідролого-морфологічного аналізу водозбірної площі та структури землекористування, включає в себе нанесення природно-захисних смуг на плани землеустрою населених пунктів та в земельні кадастри, проведення належних агротехнічних заходів, зокрема збільшення протяжності системи лісосмуг більш ніж у 3 рази з відповідним їх функціональним призначенням. В якості попередження поширення еродованості земель також рекомендується на частині з них (на схилах яружно-балкових систем) провести залуження, консервування та експлуатаційне переорієнтування (використання в квазіприродньому стані – багаторічні насадження, пасовища, сіножаті, тощо). Для можливості контролю якості та кольматації організованого стоку, в гирлових ділянках повздовж лиману пропонується створити біологічні фільтри – біоплато. Рекомендується або повна ліквідація несанкціонованих ставків, або

їх функціонування у випадку належної природоохоронної документації та режимів експлуатації залежно від водності року. Розміщення та використання орних земель пропонується на підставі принципів адаптивного землеробства.

Результатом ГІС оцінки є геоінформаційні бази даних у вигляді растрових та векторних шарів, які можуть бути використані органами виконавчої влади та іншими стейкхолдерами для подальшої розробки стратегії сталого розвитку Татарбунарського району.

Список літератури

- Dalezios, N. F. (2002). *Environmental Remote Sensing*. University of Thessaly: Volos [in Greek].
- Moore, L. D., & Burch, G. J. (1995). Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50, 1294-1298.
- Open Street Map Wiki contributors. (2021). *Електронний ресурс: Map Features*. Retrieved from http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_Features.
- Stoiko, N., & Parsova, V. (2017). Environmental dimensions of rural development in land use planning circumstances in Ukraine. *Engineering for rural development*, 16. 964-969. doi.org/10.22616/erdev2017.16.n197.
- USGS Global Visualization Viewer. (11.06.2021). *Електронний ресурс: USGS Global Visualization Viewer*. Retrieved from <http://glovis.usgs.gov/>.
- Using the USGS Landsat 8 Product. (27.08.2021). *Електронний ресурс: Landsat Missions*. Retrieved from http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php.
- Wilson, E. H., & Sader, S. A. (2002). Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80 (3), 385-396. doi: 10.1016/S0034-4257(01)00318-2
- Гладун, Г. Б. (2014). Адаптивно-ландшафтні принципи застосування полезахисного лісорозведення в Одеській області. *Агрохімія і ґрунтознавство*, 81, 59-65.

- Зайцев, Ю. П., & Александров, Б. Г. (Ред.) (2006). *Северо-западная часть Чёрного моря: биология и экология*. Київ: Наукова Думка.
- Попова, О. Л. (2012). Екодiагностика природо-господарської організації території України: агроландшафтний аспект. *Економіка і прогнозування*, 3, 92-101.
- Рубель, О. Е. (2009). *Еконология ветландов*. Кишинев : Есо-TIRAS.
- Соколов, Е. В. (2015). Типизация лиманов северо-западного Причерноморья на основе гидролого-морфометрических характеристик. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: біологія*, 1(62), 49-56.
- Царик, Л. П. (2009). Геоекологічні підходи до оцінки ступеня збалансованості природокористування. *Вісник Львівського університету. Серія: географія*, 3, 43-48.

**МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЕКОНОМІКО-ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПІДПРИЄМСТВ
ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ**

Крутоголова І.О., Державна установа «Інститут ринку і економіко-екологічних досліджень Національної академії наук України», аспірант, Україна

Андрєєва Н.М., Державна установа «Інститут ринку і економіко-екологічних досліджень Національної академії наук України», д-р. екон. наук, проф., Україна

Abstract

The relevance of the work is determined by Ukraine's international obligations regarding issues of economic and ecological security and environmental protection, in particular regarding the reduction of carbon dioxide emissions into the atmosphere. In Ukraine the losses from air pollution in 2020 amounted to 10.42 billion \$ (US dollars) or 6.7 % of GDP (Gross domestic product). The importance of this direction has grown even more due to the need to replace fossil energy resources (coal, gas, oil), which previously came to the country from Russia. Up to 83 % of all emissions of pollutants into the atmosphere of Ukraine fall on the electricity sector from the combustion of all fuels. This work shows that agricultural waste may be an inexhaustible cheap source for green renewable energy sources such as: biooil, bioethanol, biogas and organic fertilizer – biochar. A methodical approach of integral numerical assessment of the impact of emissions from coal burning in solid fuel local boiler houses has been developed, which allows taking into account both the economic component and the ecological and social one.

Вступ

Посилення інтеграції економічних, екологічних та соціальних процесів у світі призвело до більш широкого розуміння (переосмислення) міжнародної парадигми сталого розвитку, яку задекларовано в офіційних документах ООН. Зазначимо, що Україна приєднана до Глобального договору Організації Об'єднаних Націй (United Nations Global Compact, 2000). Важливим аспектом вирішення існуючих кризових економіко-екологічних проблем в регіонах та забезпечення їх сталого розвитку, позитивних та прогресивних для впровадження положень територіальної реформи, має стати забезпечення економіко-екологічної безпеки підприємств енергетичного сектору на засадах екологізації економіки (у відповідності до: Указу Президента України Про цілі сталого розвитку України на період до 2030 року (Указ Президента України №722/2019 від 30 вересня 2019 року); Концепції реалізації державної політики у сфері сприяння розвитку соціально відповідального бізнесу в Україні на період до 2030 року (Розпорядження Кабінету Міністрів України №66-р від 24 січня 2020 року); Закону України «Про добровільне об'єднання територіальних громад» (Закон України №157-VIII від 05.02.2015); Закону України «Про співробітництво територіальних громад» (Закон України №1508-VII від 17.06.2014).

Стосовно екологічної безпеки Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» анонсує, що це «такий стан навколишнього природного середовища, при якому забезпечується попередження погіршення екологічної обстановки та виникнення небезпеки для здоров'я людей» (Закон України №1264-XII від 26.06.1991).

Окрім вищезгаданих нормативно-правових актів України, питання забезпечення екологічної безпеки регулюють закони України: «Про оцінку впливу на довкілля» (Закон України №2059-VIII від 23.05.2017), «Про охорону атмосферного повітря» (Закон України №2707-XII від 16.10.1992), «Про відходи» (Закон України №187/98-ВР від 05.03.1998); Водний кодекс України

(Закон України №213/95-ВР від 06.06.1995), Кримінальний кодекс України (Закон України №2341-III від 05.04.2001), Кодекс України про надра (Закон України №132/94-ВР від 27.07.1994) та ін. Основним завданням, що переслідується законодавством при формуванні системи економіко-екологічної безпеки, є усунення прогалин та недоліків правового регулювання у сфері екологічних та економічних відносин. Однак варто зазначити, що безпекові інструменти, здебільшого, не мають законодавчого оформлення. Тому в першу чергу при формуванні методичних підходів щодо забезпечення економіко-екологічної безпеки особливого значення набуватиме формування інтегрального підходу до оцінки обліку витрат, пов'язаних із забрудненням довкілля.

Метою дослідження є формування методичного підходу щодо інтегральної оцінки обґрунтованості заміщення довгополуменевого газового вугілля на біовугілля в контексті забезпечення економіко-екологічної безпеки підприємств енергетичного сектору України.

Основний текст

Останніми роками простежується загострення уваги з боку держави щодо питань збереження та відтворення довкілля. Забруднення повітря є однією з найсерйозніших екологічних загроз здоров'ю людини. За рахунок заходів щодо зниження рівня забруднення повітря зменшуються тягар хвороби, пов'язаних з інсультом, хворобами серця, раком легень, хронічними та гострими респіраторними захворюваннями.

За оцінками ВООЗ, забруднення атмосферного повітря як у містах, так і в сільській місцевості спричинило 4,2 мільйона випадків передчасної смерті в усьому світі (ВООЗ, 2021). Ця смертність була обумовлена впливом дрібних зважених частинок діаметром до 2,5 мкм (PM_{2,5}), які викликають серцево-судинні та респіраторні, а також онкологічні захворювання. Концентрація зважених частинок часто використовується непрямым показником рівня

забруднення повітря. Основними компонентами зважених частинок є сульфати, нітрати, аміак, хлорид натрію, сажа, мінеральний пил та вода. Частинки діаметром менше 10 мікрон ($\leq \text{PM}_{10}$) здатні проникати глибоко у легені та осаджуватись у них, ще більш згубний вплив на здоров'я надають частинки діаметром менше 2,5 мікрона ($\leq \text{PM}_{2,5}$).

В Україні збитки від забруднення повітря в (ООН, 2022, стор. 9) складають 6,7 % від ВВП. У 2020 році ВВП України становив 155,6 мільярда доларів США, відповідно збитки у 2020 році дорівнювали 10,42 мільярда доларів США. Для довідки загальний обсяг видатків на освіту в Україні у 2020 році був у 2 рази меншим і становив 4,9 мільярда доларів США.

До 83 % усіх викидів забруднюючих речовин в атмосферу України припадає на галузь електроенергетики від спалювання всіх видів палива. Ніяке інше паливо не забруднює так атмосферу, як енергетичне вугілля. Через це вирішувати екологічну проблему в Україні без урахування викидів від локальних твердопаливних котелень малої потужності неможливо.

Через бойові дії на сході України і блокаду вантажного обігу з непідконтрольних територій в країні відчувається значний дефіцит вугілля і в першу чергу антрациту. В силу цього для опалювання локальними твердопаливними котлами в приватний сектор та бюджетну сферу стало поступати енергетичне (довгополумєневе та газове) вугілля.

Елементний склад Донецького довгополумєневого вугілля містить (Дослідження вмісту канцерогенних речовин у викидах енергоблоків вугільної ТЕС, <http://dspace.nbuv.gov.ua/>): вуглецю 75,5 %, водню 5,5 %, сірки 4,3 %, кисню 13,1 %, азоту 1,6 %. Усього газових складових 43 %.

При спалюванні цього енергетичного вугілля утворюються наступні отруйні гази та важкі метали (табл. 1).

Отруйні гази та важкі метали, що утворюються при
спалюванні енергетичного вугілля

Забруднення роблять також вугільний пил і сажа. Викиди твердих частинок залежать від зольності вугілля. Зола включає в себе 42-49 % оксиду кремнію, 23-37 % алюмосилікат, 10-16 % сполуки заліза, кальцію, магнію. Крім того, в димі завжди присутні тверді частинки незгорілого вуглецю, що залежать від неповного згорання вугілля, а за рахунок термохімічних реакцій у викидах зростає вміст радію 226 в 3-6 разів і свинцю 210 в 5-10 разів. Особливо небезпечний вплив роблять викиди від спалювання вугілля на дітей у віці до 12 років, у яких ще не сформувалася імунна система, здатна адекватно реагувати на ці забруднення. Патології, обумовлені забрудненням навколишнього середовища, становлять до 50 % захворювань дитячого населення.

Екологічний аналіз даних приведених в таблиці 2 нами проведено з використанням показника – рівня шкідливості димових газів (Екологічні аспекти використання деревних паливних ресурсів, <https://bio.ukr.bio/ua/>). Рівень шкідливості (Γ_i) – це відношення середньої концентрації i -ї речовини (C_i) у димових газів до середньодобової гранично допустимої концентрації цієї речовини $[ПДК_i]_{cc}$ в атмосферному повітрі:

$$\Gamma_i = C_i / [ПДК_i]_{cc}. \quad (1)$$

При $\Gamma_i > 1$ небезпека впливу існує, при $\Gamma_i < 1$ технологічний процес не впливає на природне середовище. Спільна присутність низки шкідливих речовин у атмосферному повітрі може посилювати їх токсичність. Такі

речовини називають речовинами односпрямованої дії і за їх одночасному змісті у атмосфері має виконуватися умова:

$$\frac{c_1}{ПДК_1} + \frac{c_2}{ПДК_2} + \dots + \frac{c_n}{ПДК_n} \leq 1 \quad (2)$$

Де: c_1 , c_2 та c_n – концентрація шкідливих речовин односпрямованої дії, мг/м^3 ; $ПДК_1$, $ПДК_2$ та $ПДК_n$ – відповідні значення ПДК цих речовин в атмосфері, мг/м^3 .

Для використання формули (1) необхідно перевести рівень середньої концентрації з кг/м^3 у мг/м^3 ($1\text{кг} = 1 \times 10^6 \text{ мг}$) та скористатися співвідношенням (3).

$$P_i = M_i / V_i \quad (3)$$

Де: P кг/м^3 – щільність, M кг – маса; V м^3 – обсяг.

У таблиці 2 приведено співставлення рівня шкідливості з гранично допустимою концентрацією викидів у повітря.

Таблиця 2

Співставлення рівня шкідливості з
гранично допустимою концентрацією викидів у повітря

	NO_x	SO₂	CO	CO₂	N₂O	CH₄
Гранично допустима концентрація, мг/м^3	0,06	0,05	1,0	1,0	0,04	4
Рівень шкідливості	6,1	168,8	0,11	5300	0,187	0,0035

Як видно з таблиці 2 найбільше перевищення рівня шкідливості гранично допустимої концентрації у 5300 разів у діоксиду вуглецю (CO_2) та діоксиду сірки (SO_2) у 168,8 рази, а також оксиду азоту NO_2 у 6,1 рази.

NO_2 – головне джерело утворення нітратних аерозолів, які є значною фракцією завислих частинок $\text{PM}_{2,5}$. Забруднення повітря SO_2 шкодить дихальній системі, порушує функцію легень та викликає подразнення очей.

Головним магістральним шляхом зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу та зменшення їхнього впливу на здоров'я людей і як наслідок зменшення економічних втрат є відхід в електроенергетиці від використання

викопних палив. Актуальність декарбонізації енергетичних систем зросла після набуття чинності Паризької угоди щодо клімату в 2016 році. Декарбонізація економіки енергетичної галузі – це зниження викидів CO₂ на одиницю енергії, що виробляється.

При виборі найкращої прогресивної технології заміщення природного вугілля в твердопаливних котельних необхідно виходити з інтегральної оцінки даних технологій. Для інтегральної оцінки ефективності технологій необхідно враховувати економічний, екологічний і соціальні аспекти. (рис. 1).



Рис. 1. Економічний, екологічний і соціальні аспекти інтегральної оцінки ефективності технологій

Економічний ефект – складається з доходів від реалізації вторинних продуктів найкращою технологією переробки і утилізації.

Екологічний ефект – від застосування даних технологій – це вартісна оцінка відверненого екологічного збитку від забруднення природного довкілля (атмосферного повітря, водних, ґрунтових і земельних ресурсів). Для чисельної оцінки екологічного ефекту від забруднення нами пропонується використовувати платежі до бюджету за перевищення гранично допустимих норм викидів.

Соціальний ефект – це, передусім, зниження захворюваності населення внаслідок екологічної нормалізації умов життєдіяльності людини, приріст грошових доходів населення і позабюджетних громадських фондів в результаті реалізації проекту і приведення господарської діяльності у відповідність з основними соціальними потребами населення.

Вплив забруднення повітря на здоров'я населення оцінюється з допомогою функції «концентрація-ефект», в основі якої зазвичай лежить оцінка відносного ризику, яка отримується шляхом епідеміологічних досліджень. Тільки облік усіх трьох складових під час виборів технології заміщення може забезпечити сталий розвиток теплоенергетичної галузі у майбутньому та враховує домінанти 17 Цілей сталого розвитку, а також пріоритети розвитку соціально відповідального бізнесу.

Нами пропонується заміщати вугілля у твердопаливних котлах спеціально підготовленим паливом – торифікованими пиллетами чи брикетами (Браверман, 2019). Це паливо має вироблятися централізовано на підприємстві обладнаному необхідною технологією та системою очищення. Безперервна піч карбонізації екологічного типу використовує очищені димові гази, що виникають у процесі карбонізації, як паливний газ для згоряння та повторного використання. Реалізується термічний метод знешкодження газів шляхом окислення шкідливих речовин при температурі 1000-1200 °С, що дозволяє досягти 99 % очищення газів. Враховуючи, що 1 т біовугілля з теплотворною здатністю 21 МДж/кг замінює 1,4 т довгополуменового газового вугілля з теплотворною здатністю 15 МДж/к за вартістю – 95 дол. США, то вартість тарифікованого біовугілля становить 133 дол. США. Виходячи тільки з цієї оцінки виробництво біовугілля для заміщення енергетичного вугілля у твердопаливних котельних недоцільно.

При розрахунку інтегральної оцінки обґрунтованості заміщення довгополуменового газового вугілля на біовугілля треба також оцінити економічні збитки, яке несе підприємство на балансі якого обліковується котельна від плати податку на забруднення. Економічна оцінка збитків може бути виконана за чинними в Україні ставками податку на викиди в атмосферне повітря від окремих забруднюючих речовин стаціонарними джерелами забруднення, наведені у статті 243 Податкового кодексу України, Розділ 8, Екологічний податок (табл. 3) (Закон України №2755-VI від 02.12.2010).

$$B_{\text{ДНМУ}} = \sum_{i=1}^n (H_i * M_{\text{інму}} * K_{\text{ін}} * K_{\text{нму}} * K_{\text{охр}}) \quad (4)$$

Де: $B_{\text{ДНМУ}}$ – розмір шкоди, заподіяний атмосферному повітрю внаслідок перевищення встановленого обладнання екологічних нормативів допустимих викидів високотоксичних речовин, що володіють канцерогенними, мутагенними властивостями (речовин I, II класу небезпеки), та нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря, грн.;

$M_{\text{інму}}$ – маса викиду i -ї забруднюючої речовини, тон.

$K_{\text{ін}}$ – коефіцієнт, що приймається рівними для джерел з ефективною висотою викидів висотою димової труби.

У роботі (Димар для твердопаливного котла, <https://vtopku.net/>) наведено діаграму ефективної висоти димових труб для різної потужності котлів. В таблиці 3 приведені дані для розрахунку маси викидів по найбільш шкідливим показникам.

Таблиця 3

Дані для розрахунку маси викидів по найбільш шкідливим показникам

Показник	Ставка податку грн. за 1 тону	Викиди в повітря при спалюванні 150 тон вугілля	Нарахований податок, грн.
діоксиду вуглецю	74,17	300,0	22251,00
діоксиду сірки	4111,45	69,0	283690,05
оксиду азоту	1968,65	1,4	2756,11
бенз(а) пірен	2506116,51	972/1000	24359,45
Разом	-	-	333 056 (11 500 дол. США)

$$B = 182781 \text{ дол. США, } (333056 \text{ дол. США} \times 2.8 \times 140 \times 0.0014)$$

Навіть без урахування економічних соціальних втрат від забруднення, а тільки екологічних, заміщення природного вугілля, на біовугілля стає надзвичайно вигідним ($14500 + 11500 = 26000$ проти 16100). Щорічна економія коштів становить 10 000 дол. США, або 38 %.

Для обліку економічних втрат від впливу забруднювачів на здоров'я людей ми пропонуємо використовувати кількісні оцінки економічної цінності

впливу на здоров'я, пов'язаного із забруднювачами $PM_{2,5}$ і NO_x і SO_2 у розрахунку на кіловат-годину виробництва теплової та/або електричної енергії.

У Махол Бен, Ризк Сара показано, що економічна цінність поліпшення здоров'я людини, пов'язаного із запобіганням викидам від виробництва електроенергії на викопному паливі у США коливається від 0,005-0,013 дол. США/кВтч. Для вугілля ця оцінка становить 0,19–0,45 дол. США/кВтч. Теплова потужність твердопаливного котла, що спалює в опалювальний сезон 150 тон енергетичного вугілля, становить 100 кВт. Це означає, що за 10 годинної роботи на день їм буде вироблено у опалювальний сезон 120 МВт/год теплової енергії (приблизно 100 Гкал). Відповідно до оцінок економічний збиток від забруднення навколишнього середовища одним твердопаливним котлом на здоров'я людини становитиме 22 800 дол. США або 640 000 грн. В цілому економічний збиток від забруднення навколишнього середовища 15233 твердопаливних котельних працюючих в Україні становить близько 350 млн. дол. США., або 10 000 млн. грн.

Сировиною для заводів по виробництву біовугілля може бути солома зернових та зернобобових культур. Компонентний склад деяких видів відходів сільськогосподарської діяльності дозволяє виробляти з них не тільки біовугілля, але й інші продукти, які можуть замінити використання продуктів, що виробляються з викопної сировини.

У таблиці 4 наведений компонентний склад у відсотках деяких видів біомаси.

Компонентний склад у відсотках деяких видів біомаси

Вид сировини	Зміст компонентів, %			
	Геміцелюлоза	Целюлоза	Лігнін	Інші
Солома пшениці	18,1	29,0	27,4	25,5
Солома рису	26,0	40,8	17,9	15,3
Стебла кукурудзи	32,6	33,5	11,0	22,9
Кукурудзяний качан	37,7	33,5	15,1	13,7
Сосна	17,8	47,8	19,7	14,7
Модрина	24,8	37,6	24,6	13,0
Береза	26,5	39,4	19,7	14,4
Осика	20,3	44,0	21,8	13,9

Хімічний склад відходів схожий із складом деревини, відрізняючись лише невеликою різницею у співвідношенні основних компонентів, а відсутність витрат на вирощування та виділення додаткових територій робить відходи практично безцінними в економічному плані. Органічна маса відходів складається на 48 % з вуглецю, 6 % водню, близько 43 % кисню та 1-2 % азоту та сірки. Тому горючі відходи сільськогосподарської діяльності слід розглядати як джерело вуглецю, водню та кисню. Це дає можливість використати відходи для заміщення викопних видів палива.

Ефективне використання біомаси в існуючому паливному обладнанні обмежується рядом властивих їй специфічних властивостей, таких як висока вологість, низька насипна щільність, висока шлакуюча здатність золи, відкладення смол в газоходах котла, хімічний недопал та ін. Одним з перспективних напрямків переробки біомаси для подальшого її ефективного використання як паливо на існуючому паливному обладнанні є піроліз, що дозволяє отримати енергетично цінні тверді, рідкі та газоподібні енергетичні продукти. У типовому процесі торрефікації біомаса нагрівається до бажаної температури торрефікації, що витримується протягом заданого часу реакції. Температура торрефікації та час реакції є двома найбільш важливими параметрами в цьому процесі.

На рис. 2 наведена технологічна схема карбонізації соломи в автотермальному режимі з отриманням трьох видів продуктів піролізу:

- Біовугілля – як альтернативного палива;
- Биочара – як органічного добрива;
- Синтез-газа – як альтернативного палива.

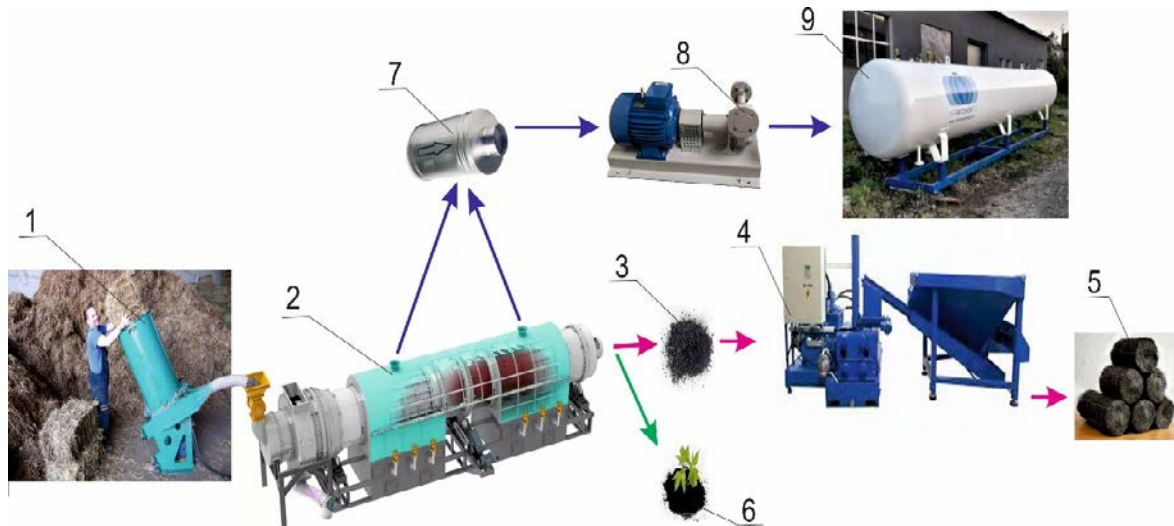


Рис. 2. Технологічна схема карбонізації

Де:

№з/р	Найменування обладнання	Продуктивність	Споживана Потужність, кВт	Вартість, дол.
1	Соломорізка	1т/ч	11.0	1.400
2	Піролізна піч безперервної дії	1т/ч	25.0	20.000
3	Біовугілля			
4	Брикетувальний прес	3т/ч	4.5	4.4
5	Вугільні брикети	1т		230
6	Биочар (органічне добриво)	1т		390
7	Фільтр вугільний			180
8	Турбінний насос з двигуном	5000л/ч	7.5	1400
9	Накопичувальна ємність		2.5	3100
10	Синтез-газ	1т		108

Подрібнена солома подається в піролізну піч, де вона проходить три стадії термічного перетворення. Спочатку сушиться, потім відбувається її розкладання з поглинанням енергії і лише третьому етапі настає екзотермічна реакція. При карбонізації соломи автотермальному режимі вихід твердих частинок становить 35 %, а вихід газової складової 40% від маси сухої

сировини. Співвідношення біовугілля та біодобрива визначається насамперед ринковою потребою та порою року. Таким чином з 1 тони соломи запропонованою технологією піролізу буде отримано 350 кг твердого вуглецю і до 400 кг летких газів.

Висновки

В межах проведеного дослідження визначено, що головною домінантою України є формування системи економіко-екологічної безпеки, що спрямована на усунення прогалин та недоліків правового регулювання у сфері екологічних та економічних відносин на макро-, мезо- та мікрорівнях. Авторами доведено, що найбільш важливого значення набуватиме подальший розвиток інституційного та методичного базису досягнення економіко-екологічної безпеки підприємств енергетичного сектору України. Запропонований методичний підхід до інтегральної чисельної оцінки впливу викидів від спалювання вугілля у твердопаливних локальних котельнях дозволяє враховувати, як економічну складову так і екологічну та соціальну. При впровадженні інтегральної оцінки обліку витрат, пов'язаних із забрудненням повітря заміщення викопного вугілля на біовугілля стає економічно вигідним. Авторами аргументовано доцільність переходу на біовугілля.

Україна має унікальний ресурс різних відходів сільськогосподарської діяльності, що дозволяє виробляти екологічно нейтральне тверде паливо-біовугілля для заміщення викопного вугілля. Біовугілля є екологічно нейтральним і при спалюванні не забруднює довкілля. Крім того, при необхідності з соломи зернових культур запропонованою нами технологією для заміщення природного газу можна виробляти також синтез-газ.

Рекомендації

Дуже важливим є подальший розвиток інституціональних засад та методичного базису енергетичного сектору економіки, що спрямовані на

забезпечення економіко-екологічної безпеки окремих територій. Нами пропонується у місцях наявності великої кількості сільськогосподарських відходів організувати виробництво біовугілля. Виробництво має бути обладнане сучасними засобами очищення вихлопних газів. Непресоване біовугілля є також органічним добривом (біочар), що помітно підвищує родючість земель. Це може бути реалізовано в межах регіональних програм розвитку соціально відповідального бізнесу в Україні.

Список літератури

- E-Learning & Aufzeichnungen. (26.07.2000). *United Nations Global Compact*. Retrieved from: <https://www.globalcompact.de/>.
- Браверман В. Я. (2019). Заміщення викопного вугілля у локальних твердопаливних котельнях. *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 1.
- Всесвітня організація охорони здоров'я (2021). *Забруднення атмосферного повітря*. Retrieved from: <https://www.who.int/ru/>.
- Димар для твердопаливного котла*. Retrieved from: <https://vtopku.net/>.
- Дослідження вмісту канцерогенних речовин у викидах енергоблоків вугільної ТЕС*. Retrieved from: <http://dspace.nbu.gov.ua/>.
- Екологічні аспекти використання деревних паливних ресурсів*. Retrieved from: <https://bio.ukr.bio/ua/>.
- Закон України №1264-XII від 26.06.1991. (01.08.2022). *Про охорону навколишнього природного середовища*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/>.
- Закон України №132/94-ВР від 27.07.1994. (22.08.2022). *Кодекс України про надра*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/>.
- Закон України №1508-VII від 17.06.2014. (2014). *Про співробітництво територіальних громад*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/>.
- Закон України №157-VIII від 05.02.2015. (2015). *Про добровільне об'єднання територіальних громад*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/>.

- Закон України №187/98-ВР від 05.03.1998. (20.08.2022). *Про відходи*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/>.
- Закон України №2341-III від 05.04.2001. (2001). *Кримінальний кодекс України*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/>.
- Закон України №2707-XII від 16.10.1992. (20.08.2022). *Про охорону атмосферного повітря*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/>.
- Закон України №2755-VI від 02.12.2010. (2010). *Податковий кодекс України, Розділ 8, Екологічний податок*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/>.
- Закон України від №2059-VIII від 23.05.2017. (28.08.2022). *Про оцінку впливу на довкілля*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/>.
- Закон України від №213/95-ВР від 06.06.1995. (20.08.2022). *Водний кодекс України*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/>.
- Махол Бен, Ризк Сара. *Экономическая ценность воздействия электроэнергии на ископаемом топливе в США на здоровье*. Retrieved from: <https://doi.org/>.
- ООН. (2022). *Економічна і Соціальна Рада, Витрати бездіяльності. Всесвітня організація охорони здоров'я, Європейський процес. Довкілля і здоров'я*. Retrieved from: <https://theper.unecsc.org/>.
- Розпорядження Кабінету Міністрів України №66-р від 24 січня 2020 року. (2020). *Концепція реалізації державної політики у сфері сприяння розвитку соціально відповідального бізнесу в Україні на період до 2030 року*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/>.
- Указ Президента України №722/2019 від 30 вересня 2019 року. (2019). *Про цілі сталого розвитку України на період до 2030 року*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/>.

**ГЕОПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ
ДІЮЧОЇ МЕРЕЖІ ДЕРЖАВНОЇ СИСТЕМИ
ГІДРОГЕОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ УКРАЇНИ**

Давибіда Л.І., Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, к.г.н., доцент кафедри геотехногенної безпеки та геоінформатики, Україна

Єршов М.О., Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, здобувач, Україна

Abstract

The State Hydrogeological Monitoring Network has to provide the necessary information to manage groundwater resources and prevent negative changes in the geological environment.

Currently, there is a negative tendency to decrease the number of observation wells, loss of information about the space-time variability of the hydrogeological regime elements in Ukraine. In conditions of limited funding, an important task is to develop an effective strategy for reforming the hydrogeological monitoring system, taking into account international experience and based on modern geoinformation technologies.

Particular attention has to be given to transboundary territories, for example the Carpathian region, the Danube river basin or the Prypyat river basin, which are characterized by the low level of the State Hydrogeological Monitoring Network representativeness.

The purpose of the article is to evaluate the actual state of the hydrogeological observation wells network and optimize it within the study area using geoinformation and geostatistical approaches. For the actual monitoring network, the expected error of the spatial modelling of the groundwater-surface was evaluated. The obtained

results of the geostatistical analysis made it possible to substantiate the project wells locations to improve the quality of hydrogeological monitoring problem solutions.

Вступ

Підземні води – це найбільш динамічна складова геологічного середовища. Тому новітні ефективні методи організації гідрогеологічного моніторингу є необхідними для вивчення гідрогеологічних явищ і процесів, складання надійних прогнозів. На даний час в Україні склалася вкрай несприятлива і загрозлива ситуація щодо функціонування системи спостережень за кількісними і якісними характеристиками підземних вод через недостатнє фінансування, застаріле вимірювальне обладнання, різке скорочення кількості спостережних свердловин, відсутність єдиної бази даних і координованої взаємодії між організаціями-суб'єктами моніторингу, призупинення ведення спостережень за мінливістю рівнів, температурою і хімічним складом підземних вод. Така ситуація є катастрофічною, особливо, враховуючи той факт, що на початку 90-х років державна мережа гідрогеологічного моніторингу налічувала більше 7000 свердловин, абсолютна більшість яких зараз є законсервованими або взагалі ліквідованими (Стан підземних вод України, 2018). Зокрема, станом на 01.01.2018 р. мережа державного моніторингу підземних вод складалась із 892 спостережних пунктів, зокрема на ґрунтові води – 288, на міжпластові води – 214, на опорних полігонах по вивченню умов формування експлуатаційних запасів підземних вод – 390. Проте спостереження за рівнем підземних вод у 2017 році проводились лише по 224 спостережних пунктах, а за хімічним складом – по 125. Нещодавно прийнята Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України Програма державного моніторингу вод (у частині діагностичного моніторингу підземних вод) на 2022 передбачає проведення спостережень за елементами режиму підземних вод (рівні, температура, хімічний склад) у 782 пунктах (свердловинах, джерелах, колодязях). Очевидно,

що необхідно розробити заходи для відновлення державної спостережної мережі і її поступової адаптації до європейських норм і вимог (Шестопалов та Люта, 2016), зокрема, формування єдиної бази даних із залученням ГІС-технологій. Особливу увагу, згідно вимог Рамкової Водної директиви ЄС, слід приділяти транскордонним територіям (Кошляков, Диняк та Кошлякова, 2014). Організація і ведення гідрогеологічного моніторингу потребує значних фінансових вкладень, тому проектування ефективної спостережної мережі, яка була б достатньою для відображення закономірностей мінливості елементів режиму підземних вод і побудови їх цифрових моделей засобами геоінформаційних технологій, є актуальним завданням.

Метою роботи є вирішення актуальної проблеми оцінки фактичного стану й оптимізації мережі свердловин гідрогеологічного моніторингу, аналізу щільності і рівномірності розподілу пунктів спостереження, оцінки очікуваної похибки просторового моделювання вимірюваних параметрів. На даному етапі досліджень не враховуються гідрогеологічні умови, які, безперечно, необхідно приймати до уваги при вдосконаленні мережі моніторингу підземних вод. Проектування здійснено на основі математико-статистичного підходу, який базується на формальній статистичній оцінці щільності пунктів спостережень з урахуванням заданої похибки екстраполяції досліджуваних параметрів.

Методи аналізу просторових характеристик мереж моніторингу

Однією з основних вимог для ефективного функціонування системи моніторингу є рівномірне просторове розміщення постів спостереження по всій території об'єкта дослідження. Математично підтвердити рівномірність розподілу пунктів моніторингу дозволяє геопросторовий аналіз. Будь-який набір геопросторових об'єктів, до яких належать і пости спостережень (подаються точковими об'єктами), має визначене просторове розміщення.

Найпростішим загальноприйнятим видом візуалізації даних є нанесення точок на площину просторових координат. Для візуалізації мережі моніторингу

та її кластерної структури часто використовується триангуляція Делоне – система трикутників з вершинами в точках вимірювань, неперетинаючими ребрами і мінімальною кількістю тупокутних трикутників. Така візуалізація дозволяє якісно відокремити області з підвищеною щільністю точок вимірювань – з кластерами. Крім того, триангуляція Делоне будує систему сусідства: точки, які з'єднані одна з одною ребрами трикутників, є найближчими сусідами по відношенню один до одного. Триангуляція також є основою для побудови найпростішого методу лінійної інтерполяції: три точки в просторі (вершини трикутників) однозначно визначають площину, в межах якої значення функції обчислюються згідно геометричних принципів. Іншим видом візуалізації даних є полігони Вороного, або, як їх ще називають, розбиття Тіссена, осередки Діріхле і області впливу.

Полігон Вороного P_i , побудований для точки вимірювань x_i , характеризується тим, що містить ті і тільки ті точки, відстань від яких до точки x_i менше або дорівнює відстані до будь-якої іншої точки вимірювань x_j . При побудові полігонів Вороного використовується система сусідства, отримана в процесі триангуляції Делоне. Межі полігону Вороного P_i складаються з відрізків серединних перпендикулярів, проведених до сторін трикутників Делоне. Ці полігони також використовуються в задачах просторової класифікації – класифікація по найближчому сусіду (Yang, Cao, Liu & Yang, 2008; Демьянов та Савельєва, 2010).

Для виявлення особливостей, а саме наявності кластерних структур, так і розріджень у мережі моніторингу (наборі точок вимірювань), проводять аналіз мережі моніторингу. Найпростішими методами такого аналізу можна вважати опис топології мережі за допомогою гістограми відстаней між точками і гістограми площ полігонів Вороного. Гістограма в даному випадку – це графік числа будь-яких подій (числа пар або числа полігонів), що потрапили в будь-якої інтервал значень.

При рівномірному розподілі точок в просторі число пар повинно бути однаково для всіх відстаней (або зменшуватися при збільшенні відстані за рахунок граничного ефекту) (рис. 1).

Зростання числа пар з ростом відстані між точками свідчить про наявність кластерів. Гістограма площ полігонів для регулярної сітки повинна являти собою дельта-функцію (один пік), так як всі полігони одного розміру. Будь-які спотворення (широкий пік, довгий хвіст, кілька піків) означають присутність будь-яких особливостей в мережі.

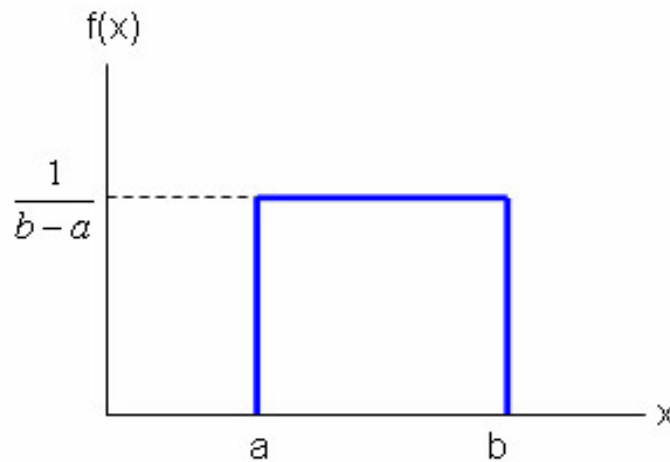


Рис. 1. Графік теоретичної функції рівномірного розподілу

Для аналізу мережі моніторингу часто застосовують статистичний підхід (Theodossiou & Latinopoulos, 2006; Дем'янов та Савельєва, 2010; Triki, Zairi & Ben Dhia, 2013), який розглядає точки вимірювань як випадковий точковий процес. Характеризувати розподіл точок можна з використанням статистичних індексів. Одним із методів, який базується на статистичному підході і часто використовується для перевірки рівномірності розподілу точок, є метод найближчого сусідства.

Для застосування методу найближчого сусідства слід визначити так звану R – статистику методу найближчого сусідства:

$$R = \frac{D}{\Delta}, \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{P}}, (2)$$

$$P = \frac{N}{S}, (3)$$

Де, N – кількість точок спостережень,

S – площа території, що досліджується,

D – середнє арифметичне відстаней між кожною точкою спостережень та найближчою до неї сусідньою точкою.

R -статистика приймає значення в інтервалі від 0 до 2,15.

У випадку, коли всі точки спостережень зведені в одну точку (ідеальна гіпотетична групова схема), R -статистика дорівнює 0. Якщо схема розподілу точок спостережень є випадковою, R -статистика дорівнює 1. При регулярному розподілу точок спостережень R -статистика дорівнює 2,15.

На практиці для визначення (класифікації) схеми розподілу точок спостережень за допомогою методу найближчого сусідства можна застосувати таку шкалу:

$0.00 < R < 0.50$ – групова схема;

$0.50 < R < 1.50$ – випадкова схема;

$1.50 < R < 2.15$ – регулярна схема (Тимків, Давибіда та Кузьменко, 2016; Chandan & Yashwant, 2017).

Виявлення кластерів у мережі гідрогеологічного моніторингу досліджуваного регіону

Усі розглянуті методи передбачають розрахунок певних критеріїв, що базуються на просторових характеристиках (відстань, площа) розташування постів спостережної мережі. Тому для їх реалізації доцільним є застосування геоінформаційного підходу і ГІС-технологій, зокрема геоінформаційних систем MapInfo Professional, ArcGIS, QGIS тощо.

Першочерговим завданням є створення бази просторових даних, яка б містила інформацію про їх просторові координати, результати спостережень та доповнення її базовими картографічними шарами для території України.

Надалі, використовуючи штатні інструменти програмного середовища ГІС, виконуємо побудову полігонів Вороного і визначаємо значення відстаней між всіма без винятку спостережними пунктами, що складають державну мережу діагностичного гідрогеологічного моніторингу України (рис. 2).

Наступним кроком було обчислення R-статистики за формулами 1-3. Отриманий результат $R = 0.49$, що свідчить, що існуюча мережа гідрогеологічного моніторингу може бути ідентифікована, як групова. Для даної схеми розподілу імовірність появи точки спостережень у будь-якій підобласті карти не є незалежною величиною, а отже, вона не забезпечує рівномірність та незалежність випробувань, що б дозволило обґрунтовано застосувати статистичні моделі випадкової величини для дослідження і побудови карт елементів гідрогеологічного режиму.

Для візуалізації просторових закономірностей розподілу місць розташування діючих пунктів моніторингу здійснено побудову тематичної карти, яка відображає розподіл площ полігонів Вороного, створених для шару свердловин (рис. 2). У якості змінної для побудови тематичної картограми, використано значення площ просторових об'єктів полігонів Вороного. Карта створена з використанням методу природного розбиття, коли діапазони створюються на основі розривів між групами близьких числових значень.

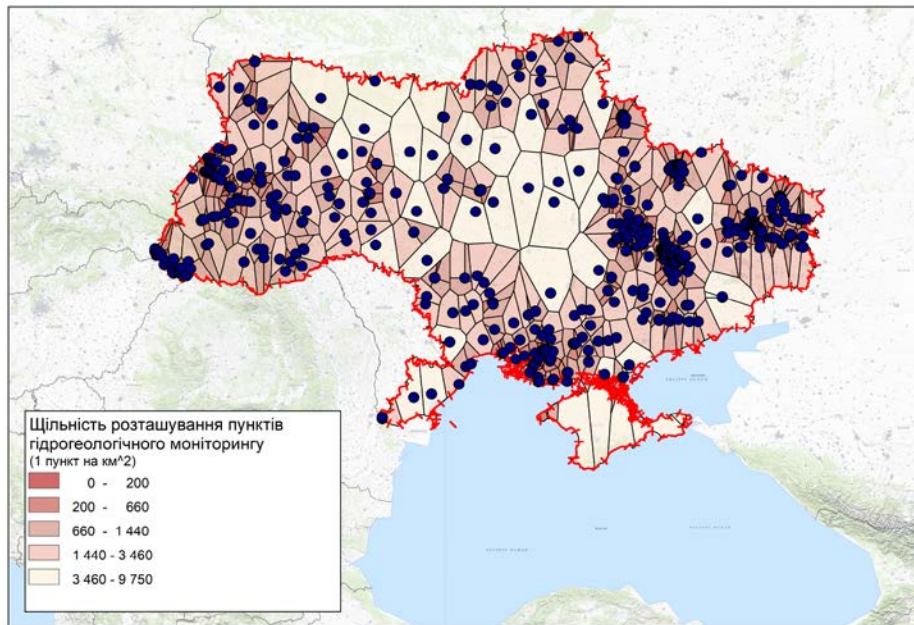


Рис. 2. Розбиття досліджуваної території полігонами Вороного з урахуванням розміщення спостережних гідрогеологічних постів і виявлення кластерних структур у мережі гідрогеологічного моніторингу

Дана карта дозволяє відобразити просторові кластери – території із різними значеннями щільності розташування моніторингу. Очевидно, що території із найменшою щільністю пунктів моніторингу повинні розглядатися як першочергові території для розміщення додаткових спостережних свердловин.

Аналіз отриманої картограми свідчить, що спостерігається низька щільність мережі у північній та центральній частині України (що відповідає транскордонному басейну Прип'яті і басейнам приток середньої течії Дніпра), а також в українській частині басейну Дунаю. Дещо вища репрезентативність спостережної мережі в Карпатському регіоні (басейни Тиси, Дністра, Прута), хоча, враховуючи, що даний регіон також відноситься до транскордонних територій, й тут щільність спостережних пунктів не можна вважати достатньою. Відсутні дані щодо наявності і стану спостережних пунктів на тимчасово окупованих територіях Криму, Донецької і Луганської областей.

Кластери із вищою щільністю розташування спостережних точок (1 пункт моніторингу менш, ніж на 200-660 км²) простежуються в Львівській області, східній частині Дніпропетровської, західній частині Закарпатської області а також в містах Харків, Херсон і їх околицях.

Статистичний аналіз просторових характеристик мережі моніторингу

Аналіз числових характеристик (відстаней до найближчого сусіднього пункту і площ полігонів Вороного) виділених кластерів здійснено у програмному середовищі Statistica. Здійснено розрахунок базових статистичних характеристик (табл. 1, 2) і побудовано гістограми розподілів фактичних значень досліджуваних показників (рис. 3, 4).

Таблиця 1

Статистичні характеристики вибірки відстаней
між пунктами гідрогеологічного моніторингу

Кількість	Математичне сподівання, км	Мінімум, км	Максимум, км	Середньоквадратичне відхилення, км
782	6,852	0,007	94,317	12,166

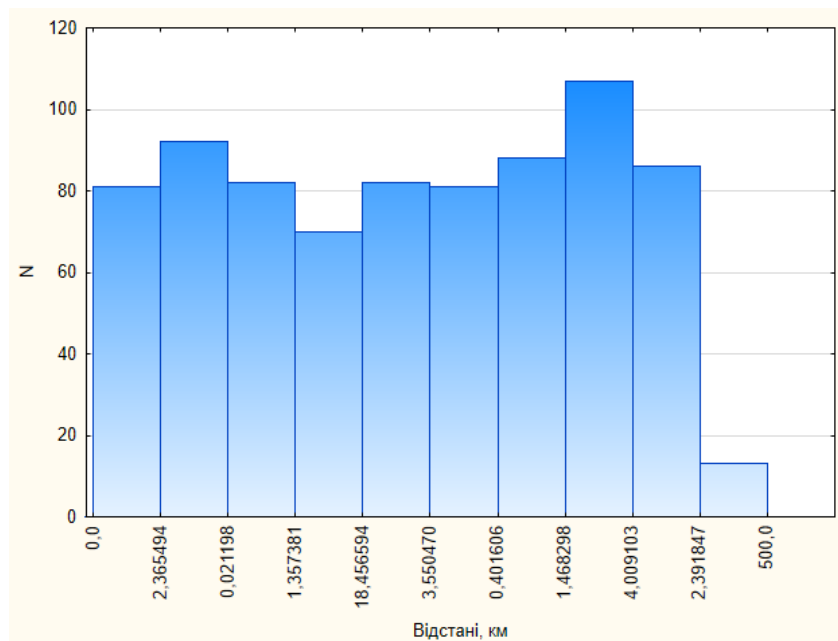


Рис. 3. Гістограма фактичного розподілу відстаней
між пунктами гідрогеологічного моніторингу

Статистичні характеристики вибірки площ полігонів Вороного, побудованих навколо пунктів гідрогеологічного моніторингу

Кількість	Математичне сподівання, км ²	Мінімум, км ²	Максимум, км ²	Середньоквадратичне відхилення, км ²
782	873,774	0,081	9746,8	1361,01

Співставлення отриманих гістограм із рівномірним законом розподілу також свідчить про неоднорідність даних, їх асиметрію, а отже – наявність суттєвих розуцільнень у мережі моніторингу (максимальні значення значно перевищують теоретичні відхилення (3- σ інтервали) від математичного сподівання, як для значень відстаней між спостережними пунктами, так і для значень площ полігонів Вороного.

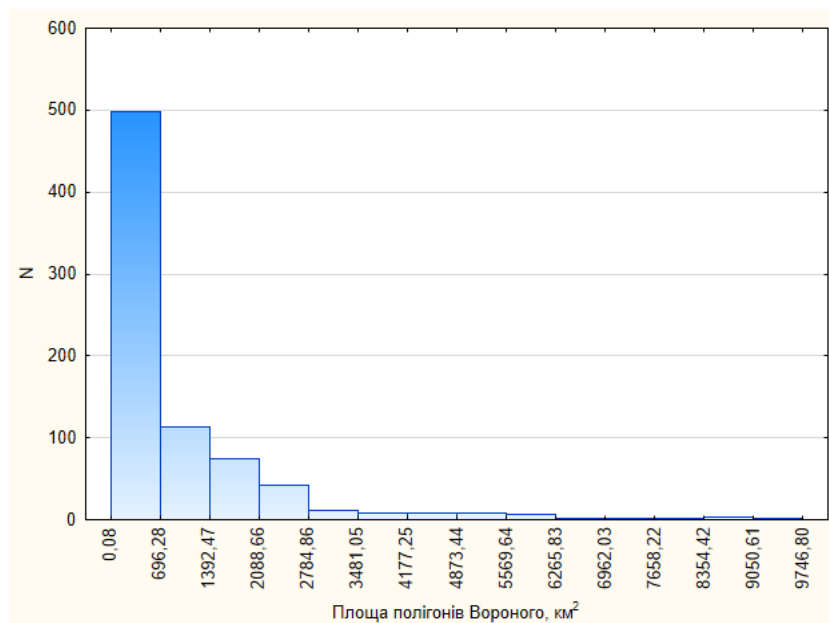


Рис. 4. Гістограма фактичного розподілу площ полігонів Вороного, побудованих для державної мережі гідрогеологічного моніторингу

Проект оптимізації мережі гідрогеологічного моніторингу

Геостатистичний аналіз результатів спостережень (середньобагаторічних рівнів підземних вод) дав змогу оцінити ефективність функціонування діючої мережі гідрогеологічного моніторингу України, а також визначити просторову похибку інтерполяції параметрів режиму підземних вод у межах України.

основі отриманих результатів для районів, що характеризуються різким зростанням значення похибки, запроєктовано додаткове спорудження 93 свердловин, які відображені на рисунку 5.

Проектні координати є приблизними, при практичному спорудженні слід керуватися даними щодо гідрогеологічних умов територій, меж виділених масивів підземних вод реальною ситуацією на місцевості, цільовими призначеннями земель, існуючими майновими обтяженнями, наявними комунікаціями і забудовою тощо (Baalousha, 2010; Zhou, Dong, Liu & Li, 2013; Bhat, Motz, Pathak & Kuebler, 2015; Давибіда та Тимків, 2018).

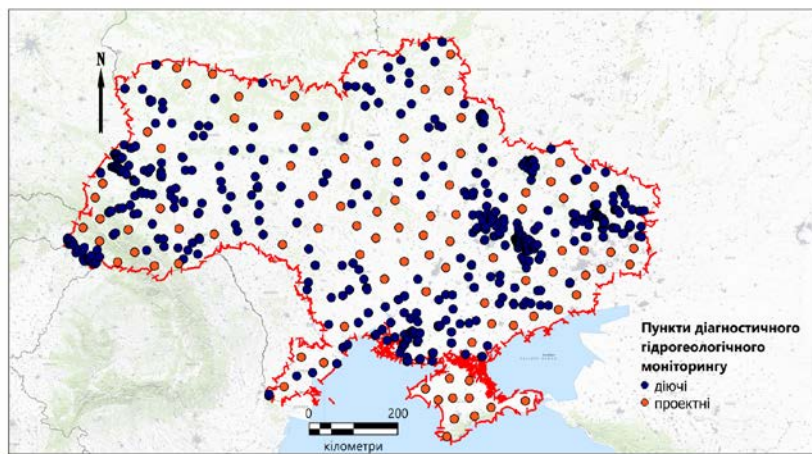


Рис. 5. Схема розташування існуючих і проектних пунктів гідрогеологічного моніторингу в межах України

Повторний розрахунок R-статистики для методу найближчого сусідства з урахуванням проектних метеостанцій дає результат $R = 0.75$, що дає підставу класифікувати оптимізовану мережу як випадкову, що в свою чергу дасть змогу підвищити якість цифрових моделей розподілу фактичних і прогнозованих елементів режиму підземних вод для території України. Середня щільність оптимізованої мережі для території України становитиме «1 точка спостережень на 690 км²».

Аналіз просторових параметрів оптимізованої мережі (табл. 3, 4, рис. 6, 7) також підтверджує зменшення кластерності і зростання рівномірності розподілу пунктів моніторингу в межах території України.

Таблиця 3

Статистичні характеристики вибірки відстаней між сусідніми пунктами
гідрогеологічного моніторингу з урахуванням проектних свердловин

Кількість	Математичне сподівання, км	Мінімум, км	Максимум, км	Середньоквадратичне відхилення, км
875	9,849	0,007	83,078	14,267

Таблиця 4

Статистичні характеристики вибірки площ полігонів Вороного, побудованих
навколо пунктів гідрогеологічного моніторингу з урахуванням проектних
свердловин

Кількість	Математичне сподівання, км ²	Мінімум, км ²	Максимум, км ²	Середньоквадратичне відхилення, км ²
875	798,339	0,081	4133,75	910,817

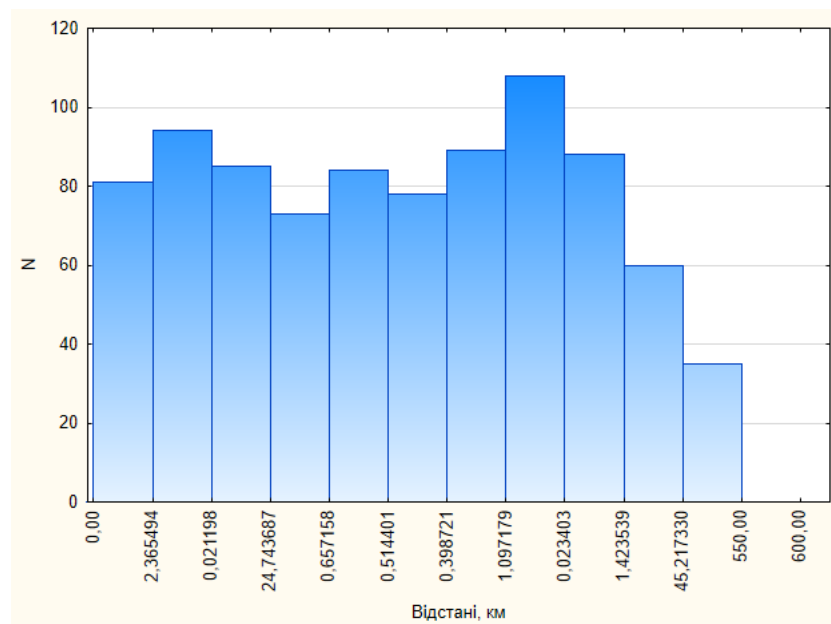


Рис. 6. Гістограма фактичного розподілу відстаней між сусідніми пунктами для
оптимізованої мережі

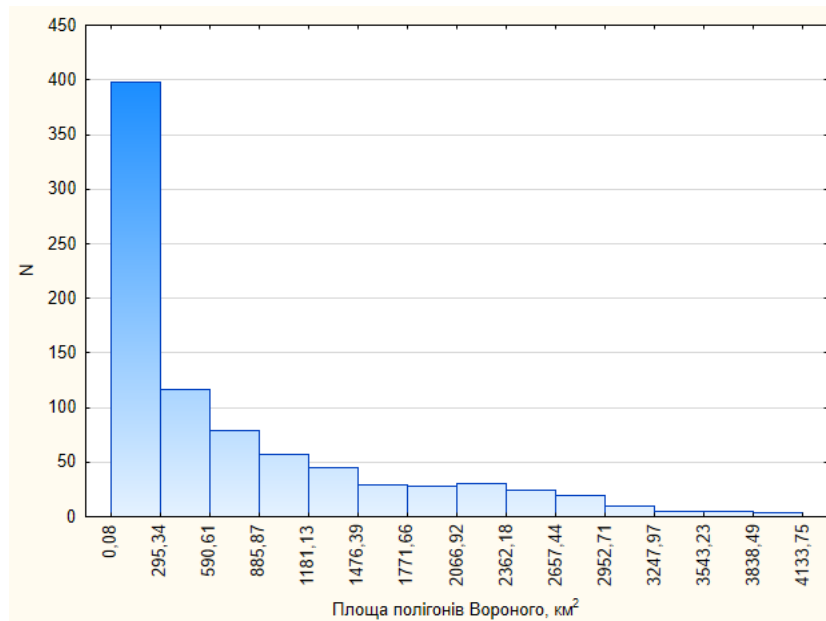


Рис. 7. Гістограма фактичного розподілу площ полігонів Вороного для оптимізованої мережі

Висновки

Отже, базова державна мережа гідрогеологічних спостережень в Україні не відповідає сучасним вимогам за рівнем автоматизації та якості отримуваних даних. Однією з основних вимог для ефективного функціонування системи моніторингу є рівномірне просторове розміщення постів спостереження по всій території об'єкта дослідження. Розглянуті методи оцінки рівномірності мереж моніторингу передбачають розрахунок певних критеріїв, що базуються на просторових характеристиках (відстань, площа) розташування постів, тому для їх реалізації доцільним є застосування геоінформаційного підходу. На основі отриманих результатів аналізу запроєктовано додаткове спорудження 93 свердловин та здійснено повторну оцінку рівномірності оптимізованої мережі, яка підтвердила доцільність розташування спостережних пунктів із запроєктованими координатами.

Список літератури

Baalousha, H. (2010). Assessment of a groundwater quality monitoring network using vulnerability mapping and geostatistics: a case study from Heretaunga Plains, New Zealand. *Agric Water Manag*, 97, 240-246.

- Bhat, S., Motz, L. H., Pathak, C., & Kuebler, L. (2015). Geostatistics-based groundwater-level monitoring network design and its application to the Upper Floridan aquifer, USA. *Environ Monit Assess*, 187, 1-15.
- Chandan, K. S., & Yashwant, B. K. (2017). Optimization of groundwater level monitoring network using GIS-based geostatistical method and multi-parameter analysis: a case study in Wainganga Sub-basin, India. *Geogra. Sci*, 27(2), 201-215.
- Theodossiou, N., & Latinopoulos, P. (2006). Evaluation and Optimization of Groundwater Observation Networks Using the Kriging Methodology. *Environmental Modelling & Software*, 991-1000.
- Triki, I., Zairi, M., & Ben Dhia, H. (2013). A geostatistical approach for groundwater head monitoring network optimisation: case of the Sfax superficial aquifer (Tunisia). *Water and Environment Journal*, 27, 362-372.
- Yang, F., Cao, S., Liu, X., & Yang, K. (2008). Design of groundwater level monitoring network with ordinary kriging. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B.*, 20(3), 339-346.
- Zhou, Y., Dong, D., Liu, J., & Li, W. (2013). Upgrading a regional groundwater level monitoring network for Beijing Plain, China. *Geoscience Frontiers*, 4(1), 127-138.
- Давибіда, Л. І., & Тимків, М. М. (2018). Геостатистичний аналіз і оптимізація мережі гідрогеологічного моніторингу в межах української частини басейну річки Прип'яті. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «GeoTerrace-2018»*, Львів: Видавництво Львівської політехніки, (pp. 57-62).
- Дем'янов, В. В., & Савельєва, Е. А. (2010). *Геостатистика: теория и практика*. М. : Наука, Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН.
- Кошляков, О. Є., Диняк, О. В., & Кошлякова, І. Є. (2014). Проблеми виділення підземних водних масивів у межах транскордонних територій України з

урахуванням вимог водного законодавства ЄС. *Вісн. Київ. ун-ту. Геологія*, 4 (79), 67-70.

Стан підземних вод України, щорічник (2018). Київ: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України».

Тимків, М. М., Давибіда, Л. І., & Кузьменко, Е. Д. (2016). Аналіз стану державної мережі гідрогеологічного моніторингу території України і можливостей його оптимізації на основі геоінформаційного підходу. *Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «GeoTerrace-2016» 15–17 грудня 2016 р., Львів: Видавництво Львівської політехніки*, (pp. 57-60).

Шестопалов, В. М., & Люта, Н. Г. (2016). Стан і шляхи реформування державної системи моніторингу підземних вод з урахуванням міжнародного досвіду та вимог водної рамкової директиви Європейського Союзу. *Мінеральні ресурси України*, 2, (pp. 3-4).

ЕКОСИСТЕМНІ ФУНКЦІЇ ЛІСІВ У МЕЖАХ НАЦІОНАЛЬНИХ ПРИРОДНИХ ПАРКІВ УКРАЇНСЬКОГО ПОЛІССЯ

Лакида П.І., Національний університет біоресурсів і природокористування України, д.с.-г.н., директор ННІ лісового і садово-паркового господарства, Україна

Василишин Р.Д., Національний університет біоресурсів і природокористування України, д.с.-г.н., професор кафедри таксації лісу та лісового менеджменту, Україна

Мельник О.М., Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Боярська лісова дослідна станція», к.с.-г.н., перший заступник директора, Україна

Abstract

The systemic environmentalization of society in recent decades, conditioned by the understanding of the general responsibility to future generations for the consequences of the destructive impact on the environment, led to the search for a new paradigm of balanced nature use. It requires the development of a scientific basis for the assessment and sustainable use of the ecosystem functions of forests, in particular within the territories of the nature reserve fund.

In order to forming a system of quantitative assessments of the features of the bioproduction process, within the scope of the scientific work, a quantitative assessment of net primary production, carbon storage and oxygen production capacity of forest phytocenoses in the territories of eight national natural parks (NNP) of Ukrainian Polissia was carried out. It was established that the total volume of net primary production of forests within the limits of experimental objects is more than 860 thousand tons, or an average of $863 \text{ g} \cdot (\text{m}^2)^{-1}$. At the same time, the forest phytocenoses of the NNP of Ukrainian Polissia deposit almost 420.0 thousand tons of

carbon and produce more than 1.2 million tons of oxygen every year. In the regional aspect, higher indicators of the carbon storage capacity of forests are characteristic of the national natural parks of Sumy and Chernihiv regions, where the average indicator reaches a level of more than $440 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2)^{-1}$, while for the NPP Volyn this indicator is $400 \text{ g C} \cdot (\text{m}^2)^{-1}$. As for the oxygen production capacity, the mentioned differentiation is characterized by values from $1.39 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2)^{-1}$ for forest phytocenoses of the NNP “Zalissya” to $1.03 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2)^{-1}$ for the NNP “Pripyat-Stokhid”.

An objective assessment of the state of forest ecosystems, taking into account the conditions of growth of anthropogenic influence on the environment, is a prerequisite for making balanced decisions in the management of nature reserve fund objects.

Вступ

Негативним наслідком інтенсивного розвитку науково-технічного прогресу є надмірне антропічне навантаження на навколишнє середовище та істотне зменшення природних ресурсів, і як результат зростання частоти прояву локальних та глобальних екологічних кризових ситуацій. У цьому контексті, лісові екосистеми, зокрема у межах об'єктів природно-заповідного фонду, постають основним з основних чинником екологічної безпеки, оскільки є формують потужний механізм саморегуляції біосфери.

Впровадження системи заходів щодо посилення екосистемних функцій лісових насаджень, у тому числі направлених на збільшення обсягів поглинання атмосферних парникових газів, є екологічно безпечним та економічно виправданим напрямом зниження ризиків, пов'язаних зі змінами клімату і реалізується шляхом розширеного відтворення та підвищення продуктивності лісів (Лакида & Гільперт, 2021). Створення та розвиток об'єктів природно-заповідного фонду нині також розглядається як напрям інтенсифікації формування екосистемних функцій лісових фітоценозів та основна форма збереження біотичного та ландшафтного різноманіття і

невід’ємна умова сталого розвитку суспільства (Лакида, Мельник & Васишин, 2019).

В сучасних умовах перехід від заготівлі деревини як єдиної мети ведення господарства до багатоцільового, сталого управління лісами з врахуванням екосистемних послуг є незворотнім напрямом розвитку світового співтовариства (Васишин, Лакида, Лакида, Мельник та Шевчук, 2021).

Екосистемні функції слугують основою для формування послуг екосистем, так у межах програми «Оцінка екосистем на порозі тисячоліття» (Millennium Ecosystem Assessment, MEA), розпочатої Організацією Об’єднаних Націй (ООН), послуги екосистем визначаються як вигоди, які людина отримує від екосистеми (Pushpam et al., 2010). Розвиток ринку екосистемних послуг зумовлює втрату пріоритетності сировинної функції лісових фітоценозів та сприяє екологізації лісогосподарського виробництва, а також системи управління об’єктами природно-заповідного фонду. Багатоцільове використання дозволяє отримувати численні продукти лісових фітоценозів та їхні корисності на одній території.

У вітчизняному науковому доробку наразі відсутні дані щодо комплексної кількісної оцінки екосистемних функцій лісових фітоценозів у межах об’єктів природно-заповідного фонду Українського Полісся. Саме тому метою цього дослідження стала кількісна оцінка чистої первинної продукції та окремих екосистемних функцій лісів у межах національних природних парків (НПП) Українського Полісся, а саме: національного природного парку «Прип’ять-Стохід» (Волинська область); Шацького національного природного парку (Волинська область); Ківерцівського національного природного парку «Цуманська Пуща» (Волинська область); національного природного парку «Голосіївський» (Київська область); національний природного парку «Залісся» (Київська область); національного природного парку «Нобельський» (Рівненська область); національного природного парку «Деснянсько-

Старогутський» (Сумська область); національного природного парку «Мезинський» (Чернігівська область).

Для оцінювання чистої первинної продукції лісів у межах НПП Українського Полісся використано запропонований А. З. Швиденком «напівемпіричний» метод, який базується на твердженні, що чиста первинна продукція екосистеми у віці A ($ЧПП_A$) є аналогією річному зростанню загальної продукції фітомаси (або загальному приросту фітомаси) $ЗПрФ_A$, тобто це маса органічної речовини, виробленої екосистемою за одиницю часу (Shvidenko, Schepaschenko & Nilsson, 2007). Таке твердження можна відобразити наступним виразом (Василишин, 2018):

$$ЗПрФ_A = ЧПП_A = ЗПФ_A - ЗПФ_{A-1}, \quad (1)$$

де $ЗПФ_A$ – загальна (накопичена) кількість фітомаси, продукованої лісовою екосистемою протягом її життєвого циклу до віку A . Визначається в одиницях маси на одиницю площі (в абсолютно сухій речовині).

Загальна продукція фітомаси ($ЗПФ_t$) лісової екосистеми за час t представлена такою залежністю:

$$ЗПФ_t = ЗПФ_t^{ст} + ЗПФ_t^{гил} + ЗПФ_t^{фсф} + ЗПФ_t^{кор} + ЗПФ_t^{нпр} + ЗПФ_t^{жнп}, \quad (2)$$

де верхні індекси позначають відповідні фракції фітомаси: $ст$ – стовбур у корі, $гил$ – деревина гілок у корі, $фсф$ – фотосинтезувальна фракція (листя або хвоя), $кор$ – коріння, $нпр$ – піднаметова рослинність насадження (підлісок, підріст) та $жнп$ – живий надґрунтовий покрив.

Використавши кількісні параметри чистої первинної продукції та поєднавши їх із запропонованими Г. Матзевсом (Matthews, 1993) перевідними коефіцієнтами вуглецемісткості (0,5 для деревних фракцій і 0,45 – для фотосинтезувальної фракції та нижніх ярусів), здійснено оцінювання вуглецедепонувальної функції лісів у межах НПП Українського Полісся. Водночас, оцінювання киснепродукувальної функції у науковій роботі базується на методичному підході (Чесноков & Долгошеев, 1978), який

передбачає використання кількісних значень маси кисню, що виділяється в атмосферу при продукуванні насадженням однієї тонни абсолютно сухої органічної речовини.

1. Чиста первинна продукція лісових фітоценозів НПП

У 2014 році групою науковців під керівництвом А. З. Швиденка (Швиденко, Лакида, Щепашенко, Василишин & Марчук, 2014) здійснено першу масштабну оцінку показників чистої первинної продукції та вуглецедепонувальної здатності лісів України. Дослідниками встановлено, що ЧПП українських лісів є досить високою і становить майже 100 млн тон органічної речовини на рік, або в середньому 512 г вуглецю на 1 м². Оновлена оцінка ЧПП та вуглецевого бюджету лісів України, яка здійснена дослідниками з Міжнародного інституту прикладного системного аналізу (Lesiv, Shvidenko, Schepschenko, See & Fritz, 2018) на основі лісової карти України з роздільною здатністю 60 м, вказує на значення на рівні 90 млн тон органічної речовини на рік, або 504 г вуглецю на 1 м².

У ході дослідження чистої первинної продукції лісів у межах НПП Волинської області встановлено, що її щорічний обсяг становить у лісових фітоценозах національного природного парку «Прип'ять-Стохід» – близько 97 тис. т сухої речовини; Шацького національного природного парку – понад 105 тис. т сухої речовини; Ківерцівського національного природного парку «Цуманська Пуща» – понад 240 тис. т (табл. 1).

Таблиця 1

Первинна продукція лісів у межах НПП Волинської області

Група порід	Первинна продукція, тис. т сухої речовини		Середнє, г·(м ²) ⁻¹
	усього	%	
1	2	3	4
<i>Національний природний парк «Прип'ять-Стохід»</i>			
Хвойні	38,29	39,3	845
Твердолистяні	10,93	11,2	1080
М'яколистяні	48,15	49,5	630

1	2	3	4
Разом	97,37	100,0	740
<i>Шацький національний природний парк</i>			
Хвойні	67,45	62,4	850
Твердолистяні	3,47	3,2	1285
М'яколистяні	37,09	34,3	795
Разом	108,01	100,0	840
<i>Ківерцівський національний природний парк «Цуманська Пуща»</i>			
Хвойні	105,39	42,7	915
Твердолистяні	65,30	26,5	1070
М'яколистяні	76,04	30,8	760
Разом	246,74	100,0	890

Аналізуючи щільність продукування живої органічної речовини на одиниці площі, варто зазначити переважання за цим показником твердолистяних насаджень. Так, згаданий показник змінюється від $1070 \text{ г} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$ у твердолистяних деревостанах Ківерцівського національного природного парку «Цуманська Пуща», до $1285 \text{ г} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$ – у твердолистяних деревостанах Шацького національного природного парку.

Порівняльний аналіз одержаних результатів з аналогічними показниками лісів Волинської області загалом (Швиденко та ін., 2014), вказує на дещо нижчу інтенсивність біопродукційного процесу (10–20 %) в лісах у межах об'єктів природно-заповідного фонду.

У НПП Київської області щорічний обсяг чистої первинної продукції становить понад 150 тис. т сухої речовини, зокрема у лісах національного природного парку «Голосіївський» – близько 33 тис. т і понад 120 тис. т у лісах національного природного парку «Залісся» (табл. 2).

Таблиця 2

Первинна продукція лісів у межах НПП Київської області

Група порід	Первинна продукція, тис. т сухої речовини		Середнє, г·(м ²) ⁻¹
	усього	%	
Національний природний парк «Голосіївський»			
Хвойні	20,98	63,8	820
Твердолистяні	8,75	26,6	840
М'яколистяні	3,13	9,5	730
Разом	32,86	100,0	815
Національний природний парк «Резиденція «Залісся»			
Хвойні	102,19	82,7	975
Твердолистяні	12,11	9,8	1330
М'яколистяні	9,29	7,5	935
Разом	123,60	100,0	1000

За показником щільності продукування живої органічної речовини на одиниці площі у регіоні домінують твердолистяні насадження НПП. Так, щільність їхньої первинної продукції змінюється від 840 г·(м²)⁻¹ у деревостанах НПП «Голосіївський» до 1330 г·(м²)⁻¹ у деревостанах НПП «Залісся».

Об'єктом дослідження у Рівненській області стали лісові фітоценози національного природного парку «Нобельський». Обсяг первинної продукції лісів тут становить близько 100 тис. т сухої речовини (табл. 3).

Порівняльний аналіз показників щільності первинної продукції лісів НПП «Нобельський» з аналогічними показниками лісів Рівненської області загалом (Швиденко та ін., 2014), вказує на дещо нижчу інтенсивність біопродукційного процесу в лісах НПП «Нобельський» у межах 5-7 %. Для твердолистяних насаджень згадана різниця сягає 20-25 %.

Таблиця 3

Первинна продукція лісів НПП «Нобельський»

Група порід	Первинна продукція, тис. т сухої речовини		Середнє, г·(м ²) ⁻¹
	усього	%	
Хвойні	60,39	60,3	800
Твердолистяні	1,52	1,5	930
М'яколистяні	38,18	38,1	885
Разом	100,10	100,0	830

За результатами дослідження інтенсивності біопродукційного процесу у межах об'єктів природно-заповідного фонду Сумської області встановлено, що обсяг чистої первинної продукції, який щороку продукується у лісових фітоценозах національного природного парку «Деснянсько-Старогутський» становить близько 78 тис. т сухої органічної речовини (табл. 4), або в середньому це становить близько $890 \text{ г} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$.

Таблиця 4

Первинна продукція лісів НПП «Деснянсько-Старогутський»

Група порід	Первинна продукція, тис. т сухої речовини		Середнє, $\text{г} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$
	усього	%	
Хвойні	60,6	78,0	880
Твердолистяні	2,6	3,3	1200
М'яколистяні	14,5	18,7	770
Разом	77,7	100,0	890

Близько 78 % обсягів первинної продукції парку продукується у групі хвойних насаджень. Частка м'яколистяних насаджень у загальному розподілі продукції становить 18,7 %, у тому числі 14,9 %, або 11,6 тис. т припадає на деревостани берези повислої.

Загалом у видовій структурі формування продукції лісів національного природного парку «Деснянсько-Старогутський» домінують соснові насадження з часткою 76,6 %, або 59,5 тис. т., далі березові та дубові деревостани – 14,6 та 3,4 % відповідно.

Об'єктом дослідження особливостей біопродукційного процесу у межах ПЗФ Чернігівської області слугували лісові фітоценози національного природного парку «Мезинський». Як результат, встановлено обсяг чистої первинної продукції лісів НПП на рівні 74 тис. т сухої органічної речовини (табл. 5), або в середньому близько $900 \text{ г} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$. Це оцінка містить інформацію щодо лісових ділянок, які надані НПП у постійне користування, й не враховує лісові ділянки інших користувачів.

Первинна продукція лісів НПП «Мезинський»

Група порід	Первинна продукція, тис. т сухої речовини		Середнє, г·(м ²) ⁻¹
	усього	%	
Хвойні	12,2	16,6	990
Твердолистяні	26,0	35,3	970
М'яколистяні	35,5	48,2	800
Разом	73,7	100,0	900

Близько 50 % обсягів первинної продукції парку продукується у групі м'яколистяних насаджень. Частка твердолистяних насаджень у загальному розподілі продукції становить 35,3 %, у тому числі 33,5 %, або 24,7 тис. т припадає на деревостани дуба звичайного. У видовій структурі формування продукції лісів національного природного парку «Мезинський» домінують дубові насадження, далі березові та соснові деревостани. Водночас соснові деревостани парку характеризуються найвищими значенням щільності продукування живої органічної речовини на одиниці площі – 1020 г·(м²)⁻¹.

Порівняльний аналіз одержаних результатів з аналогічними показниками лісів Чернігівської області загалом (Швиденко та ін., 2014), вказує на дещо нижчу інтенсивність біопродукційного процесу в лісах національного природного парку «Мезинський». Загалом для хвойних насаджень середні значення первинної продукції перевищують показники хвойних деревостанів у межах області на 15-20 %. Для твердолистяних та м'яколистяних насаджень спостерігається обернена залежність на рівні 15-25 %.

2. Вуглецедепонувальна здатність лісових фітоценозів НПП

Вуглецедепонувальна функція лісових фітоценозів у межах наукової роботи характеризується значеннями таких показників як обсяг депонованого вуглецю у лісових насадженнях та щорічний приріст вуглецю (вуглецедепонувальна здатність).

У результаті дослідження встановлено, що загальний обсяг депонованого

вуглецю у фітомасі лісів національних природних парків Волинської області, становить понад 3,7 млн т (табл. 6).

Таблиця 6

Депонований вуглець у лісах НПП Волинської області

Група порід	Депонований вуглець, тис. т	Щільність депонованого вуглецю, $\text{кг} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$	Щорічна вуглецедепонувальна здатність, тис. т
<i>Національний природний парк «Прип'ять-Стохід»</i>			
Хвойні	314,1	6,9	18,68
Твердолистяні	70,8	7,0	5,26
М'яколистяні	343,4	4,5	23,29
Разом	728,3	5,5	47,23
<i>Шацький національний природний парк</i>			
Хвойні	618	7,8	32,89
Твердолистяні	24,6	9,1	1,67
М'яколистяні	302,4	6,5	17,8
Разом	945,0	7,3	52,36
<i>Ківерцівський національний природний парк «Цуманська Пуща»</i>			
Хвойні	948,5	8,2	51,26
Твердолистяні	468	7,7	31,5
М'яколистяні	629,7	6,3	36,73
Разом	2046,2	7,4	119,49

Загалом, лісами НПП Волинської області щорічно депонується близько 220 тис. т вуглецю, зокрема середня вуглецедепонувальна здатність лісів НПП регіону становить: НПП «Прип'ять-Стохід» – близько $360 \text{ г С} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$; Шацького НПП – $410 \text{ г С} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$; Ківерцівського НПП «Цуманська Пуща» – $430 \text{ г С} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$.

У лісових фітоценозах НПП Київської області загальний обсяг депонованого у фітомасі вуглецю, становить понад 1,7 млн т (табл. 7).

Таблиця 7

Депонований вуглець у лісах НПП Київської області

Група порід	Депонований вуглець, тис. т	Щільність депонованого вуглецю, $\text{кг} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$	Щорічна вуглецедепонувальна здатність, тис. т
<i>Національний природний парк «Голосіївський»</i>			
Хвойні	171,8	6,7	10,23
Твердолистяні	56,6	5,4	4,21
М'яколистяні	22,4	5,2	1,52
Разом	250,8	6,2	15,96
<i>Національний природний парк «Залісся»</i>			
Хвойні	1309,3	12,5	49,63
Твердолистяні	111,3	12,2	5,89
М'яколистяні	82,6	8,3	4,53
Разом	1503,2	12,1	60,05

Щорічно лісовими фітоценозами НПП Київської області депонується близько 75 тис. т вуглецю. Водночас середня вуглецедепонувальна здатність лісів НПП регіону становить: НПП «Голосіївський» – близько $395 \text{ г С} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$; НПП «Залісся» – $485 \text{ г С} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$.

Щодо лісових фітоценозів НПП «Нобельський», то загальний обсяг депонованого вуглецю у їхній фітомасі становить понад 720 тис. т (табл. 8).

Таблиця 8

Депонований вуглець у лісах НПП «Нобельський»

Група порід	Депонований вуглець, тис. т	Щільність депонованого вуглецю, $\text{кг} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$	Щорічна вуглецедепонувальна здатність, тис. т
Хвойні	471,8	6,3	29,89
Твердолистяні	9,7	6,0	0,75
М'яколистяні	246,4	5,8	18,9
Разом	728,0	6,2	49,55

Понад 60 % обсягів щорічно депонованого вуглецю забезпечують хвойні насадження досліджуваного об'єкту природно-заповідного фонду Рівненської області. Водночас середня вуглецедепонувальна здатність лісів НПП становить

близько $415 \text{ г С} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$. Для порівняння, значення цього показника для лісів області загалом знаходиться на рівні $432 \text{ г С} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$ (Швиденко та ін., 2014).

За результатами дослідження вуглецедепонуальної функції лісів у межах об'єктів природно-заповідного фонду Сумської області встановлено, що у фітомасі лісів національного природного парку «Деснянсько-Старогутський» акумульовано понад 740 тис. т вуглецю (табл. 9). Загалом 84,1 % вуглецю зосереджено у насадженнях, що описуються I^a та I класами бонітету. Водночас на високобонітетні насадження I класу бонітету і вище припадає 88,4 %, або 0,7 млн т депонованого вуглецю.

Таблиця 9

Депонований вуглець у лісах НПП «Деснянсько-Старогутський»

Група порід	Депонований вуглець, тис. т	Щільність депонованого вуглецю, $\text{кг} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$	Щорічна вуглецедепонуальна здатність, тис. т
Хвойні	630,7	9,6	30,12
Твердолистяні	17,0	7,9	1,30
М'яколистяні	100,5	5,4	7,21
Разом	748,2	8,4	38,63

Лісовими насадженнями НПП «Деснянсько-Старогутський» щорічно депонується близько 40 тис. т вуглецю. Майже 80 % обсягів щорічно депонованого вуглецю забезпечують хвойні насадження парку. Близько 19 % також забезпечують м'яколистяні насадження.

У процесі дослідження також встановлено, що у фітомасі лісів національного природного парку «Мезинський» акумульовано понад 490 тис. т вуглецю (табл. 10). Загалом 76,7 % вуглецю зосереджено у насадженнях, що описуються I та II класами бонітету.

Депонований вуглець у лісах НПП «Мезинський»

Група порід	Депонований вуглець, тис. т	Щільність депонованого вуглецю, $\text{кг} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$	Щорічна вуглецедепонувальна здатність, тис. т
Хвойні	95,7	7,8	6,06
Твердолистяні	166,1	6,3	12,90
М'яколистяні	229,7	5,3	17,63
Разом	491,5	6,0	36,60

Вуглецедепонувальна здатність лісів Чернігівської області ($455 \text{ г С} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$) дещо вища за відповідні показники лісів національного природного парку «Мезинський» ($445 \text{ г С} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$), водночас поступається за цим показником хвойним ($495 \text{ г С} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$) та твердолистяним ($490 \text{ г С} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$) насадженням парку.

Загалом, лісові фітоценози досліджуваних НПП Українського Полісся щороку депонують майже 420 тис. т вуглецю.

3. Киснепродуктивність лісових фітоценозів НПП

Киснепродукувальна функція лісових фітоценозів досліджуваних НПП Українського Полісся характеризується загальними обсягами щорічно продукovanого кисню та показниками щільності продукovanого кисню на одиниці площі лісових ділянок. Загальна киснепродуктивність відображає середньорічні показники, які базуються на середньорічні значеннях чистої первинної продукції лісових екосистем НПП.

У результаті дослідження встановлено, що загальний обсяг продукovanого кисню лісами національних природних парків Українського Полісся становить понад 1,2 млн т (табл. 11).

Киснепродуктивність лісів НПП Українського Полісся

Група порід	Киснепродуктивність, тис. т		Середнє, кг·(м²) ⁻¹
	усього	%	
Національний природний парк «Прип'ять-Стохід»			
Хвойні	53,33	39,3	1,18
Твердолистяні	15,22	11,2	1,5
М'яколистяні	67,08	49,5	0,87
Разом	135,63	100	1,03
Шацький національний природний парк			
Хвойні	93,96	62,4	1,19
Твердолистяні	4,83	3,2	1,79
М'яколистяні	51,67	34,3	1,11
Разом	150,46	100	1,17
Ківерцівський національний природний парк «Цуманська Пуца»			
Хвойні	146,81	42,7	1,28
Твердолистяні	90,97	26,5	1,49
М'яколистяні	105,93	30,8	1,06
Разом	343,71	100	1,25
Національний природний парк «Голосіївський»			
Хвойні	29,22	63,8	1,14
Твердолистяні	12,19	26,6	1,17
М'яколистяні	4,36	9,5	1,02
Разом	45,77	100	1,13
Національний природний парк «Залісся»			
Хвойні	142,36	82,7	1,36
Твердолистяні	16,87	9,8	1,86
М'яколистяні	12,94	7,5	1,30
Разом	172,17	100	1,39
Національний природний парк «Нобельський»			
Хвойні	86,84	60,2	1,16
Твердолистяні	2,18	1,5	1,35
М'яколистяні	55,28	38,3	1,30
Разом	144,3	100	1,21

Продовження таблиці 11

Група порід	Киснепродуктивність, тис. т		Середнє, кг·(м²) ⁻¹
	усього	%	
Національний природний парк «Деснянсько-Старогутський»			
Хвойні	87,09	77,8	1,33
Твердолистяні	3,79	3,4	1,76
М'яколистяні	21,07	18,8	1,14
Разом	111,95	100	1,29
Національний природний парк «Мезинський»			
Хвойні	17,61	16,5	1,43
Твердолистяні	37,39	35,1	1,41
М'яколистяні	51,54	48,4	1,18
Разом	106,54	100	1,30

За інформацією наведеною у табл. 11, середня киснепродуктивність лісів у межах НПП Волинської області змінюється від 1,03 кг·(м²)⁻¹ для НПП «Прип'ять-Стохід», до 1,25 кг·(м²)⁻¹ для Ківерцівського НПП «Цуманська Пуща». Загалом лісами досліджуваних об'єктів щорічно продукується майже 530 тис. т кисню. Близько половини згаданого обсягу продукується хвойними насадженнями. Частка м'яколистяних насаджень становить 35,1 %, а твердолистяних 17,2 %. Понад 60 % вказаного обсягу кисню щорічно продукується лісовими фітоценозами Ківерцівського НПП «Цуманська Пуща».

Киснепродуктивність лісів у межах НПП Київської області змінюється від 1,13 кг·(м²)⁻¹ для НПП «Голосіївський», до 1,39 кг·(м²)⁻¹ для НПП «Залісся». Загалом лісами досліджуваних об'єктів щорічно продукується майже 220 тис. т кисню.

Для лісових фітоценозів НПП «Нобельський» Рівненської області характерна середня киснепродуктивність на рівні 1,21 кг·(м²)⁻¹. Загалом лісами досліджуваного НПП щорічно продукується майже 145 тис. т кисню. Понад 60 % згаданого обсягу продукується хвойними насадженнями. Частка м'яколистяних насаджень становить 38,3 %, а твердолистяних 1,5 %.

На Сумщині лісами національного природного парку «Деснянсько-Старогутський» щороку продукується понад 110 тис. т, або у середньому $1,29 \text{ кг} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$. Понад 75 % згаданого обсягу продукується хвойними насадженнями. Частка м'яколистяних насаджень становить 18,8 %, а твердолистяних 3,4 %. Майже 70 % обсягів щорічного продукування кисню забезпечують середньовікові насадження парку, для яких характерна інтенсивність киснепродукування на рівні $1,46 \text{ кг} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$.

Водночас, для лісових фітоценозів НПП «Мезинський» Чернігівської області характерна середня киснепродуктивність на рівні $1,30 \text{ кг} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$ та змінюється від $1,18 \text{ кг} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$ для м'яколистяних насаджень до $1,43 \text{ кг} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$ для хвойних. Загалом лісами парку щорічно продукується понад 105 тис. т кисню. Понад 45 % згаданого обсягу продукується м'яколистяними насадженнями. Частка хвойних насаджень становить 16,5 %, а твердолистяних 35,1 %. Майже третину обсягів щорічного продукування кисню забезпечують насадження VI класу віку, водночас найвища інтенсивність киснепродукування спостерігається у деревостанах IV класу віку – $1,63 \text{ кг} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$.

Нині здійснення моніторингу стану лісових екосистем для попередження виникнення в них деструктивних процесів, які негативно впливають на інтенсивність виконання ними екосистемних функцій є важливою складовою системи управлінських заходів у межах об'єктів ПЗФ. Тому об'єктивна оцінка стану лісових екосистем та прогнозування динамічних змін слугуватиме інформаційною основою для формування стратегії розвитку природно-заповідного фонду України.

Висновки

Сьогодні пошук шляхів пом'якшення антропогенного впливу на зміну клімату одночасно є як завданням охорони довкілля, так і комплексною еколого-економічною проблемою. Загрози, спричинені сучасними

кліматичними тенденціями, визначаються науковцями світу як найактуальніші, що постають перед суспільством.

Загалом за результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Наразі об'єкти природно-заповідного фонду не часто є об'єктами досліджень продуктивності лісових насаджень, хоча з екологічної точки зору вони є найбільш цінними та збереженими екосистемами. На їх території можливе проведення моніторингових лісівничих заходів, які забезпечать проведення контролю за вуглецедепонуальною, киснепродукувальною та іншими екосистемними функціями лісів.

2. Загальний обсяг чистої первинної продукції у лісах НПП Українського Полісся становить понад 860 тис. т. Майже 30 % згаданого обсягу продукується лісами Ківерцівський НПП «Цуманська Пуща». Середня щільність первинної продукції у межах регіону дослідження складає $863 \text{ г} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$.

3. Лісові фітоценози НПП Українського Полісся щороку депонують майже 420 тис. т вуглецю. Водночас, загальний обсяг депонованого у фітомасі лісів вуглецю у межах дослідних об'єктів становить понад 7400 тис. т, або у середньому $7,4 \text{ кг} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$. Середня інтенсивність вуглецедепонуальної здатності складає $423 \text{ г С} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$.

4. Киснепродуктивність лісів НПП Українського Полісся характеризується значеннями на рівні 1,2 млн т кисню щороку. Середня киснепродукувальна здатність, яка становить $1,22 \text{ кг} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$, диференційована від $1,39 \text{ кг} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$ для лісових фітоценозів НПП «Залісся» Київської області до $1,03 \text{ кг} \cdot (\text{м}^2)^{-1}$ для НПП «Прип'ять-Стохід» Волинської області.

5. Використання одержаних результатів у системі управління природоохоронною діяльністю у межах Поліського регіону України, дозволять здійснювати стале використання лісових ресурсів у межах об'єктів природно-заповідного фонду та максимізувати їх соціальну роль через збалансоване використання їхніх екосистемних функцій

Список літератури

- Lesiv, M., Shvidenko, A., Schepschenko, D., See, L., & Fritz, S. (2018). A spatial assessment of the forest carbon budget for Ukraine. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 3, 1-22. doi.org/10.1007/s11027-018-9795-y
- Matthews, G. (1993). The Carbon Contents of Trees. *Forestry Commission. Tech. Paper*, 4, 21.
- Pushpam, K. (Ed.). (2010). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity Ecological and Economic Foundations*. Earthscan : London and Washington.
- Shvidenko, A., Schepaschenko, D., & Nilsson, S. (2007). Modeling Net Primary Production of Northern Eurasia forests: A new method & new estimate. *ECEM*, 7, 485-486.
- Василишин, Р. Д. (2018). *Еколого-енергетичний потенціал лісів Українських Карпат та його стале використання*. Київ : ТОВ «ЦП «Компринт».
- Василишин, Р. Д., Лакида, М. О., Лакида, І. П., Мельник, О. М., & Шевчук, О. В. (2021). *Рослинна біомаса та екосистемні функції лісів Київщини*. Київ : ТОВ «ЦП «Компринт».
- Лакида, П. І., & Гільперт, Н. М. (2021). *Організаційно-економічні основи реалізації механізмів поглинання вуглецю лісовими екосистемами Центрального Полісся України*. Корсунь-Шевченківський : ФОП Майдаченко І.С.
- Лакида, П. І., Мельник, О. М., & Василишин, Р. Д. (2019). *Біопродуктивність лісових фітоценозів Національного природного парку «Прип'ять-Стохід»*. Корсунь-Шевченківський : ФОП Майдаченко І.В.
- Чесноков, Н. И., & Долгошеев, В. М. (1978). Оценка кислородопродуцирующей функции леса. *Лесное хозяйство*, 7, 32-34.
- Швиденко, А. З., Лакида, П. І., Щепашенко, Д. Г., Василишин, Р. Д., & Марчук, Ю. М. (2014). *Вуглець, клімат та землеуправління в Україні: лісовий сектор*. Корсунь-Шевченківський : ФОП Гавришенко В. М.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДЕРЖАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТВЕРДОГО ПАЛИВА ІЗ ВІДХОДІВ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Івашук О.С., Національний університет «Львівська політехніка», к.т.н., с.н.с.,
доц., заступник директора Інституту хімії та хімічних
технологій, Львів, Україна

Атаманюк В.М., Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н.,
проф., завідувач кафедри хімічної інженерії, Львів, Україна

Чижович Р.А., Національний університет «Львівська політехніка», аспірант,
Львів, Україна

Манастирська В.А., Національний університет «Львівська політехніка»,
студент, Львів, Україна

Собечко І.Б., Національний університет «Львівська політехніка», д.х.н., доцент
кафедри фізичної, аналітичної та загальної хімії, Львів, Україна

Abstract

The paper describes the results of obtaining an alternative solid fuel from food industry waste – barley brewer's spent grain and corn alcohol distillery stillage. The method of making briquettes by pressing under the set pressure and temperature is described. The calorific characteristics of the raw material and the obtained samples were studied. According to the research results, the average value of the higher calorific value of the dried brewer's spent grain is ~20005 kJ/kg, and the produced samples of solid fuel are in the range from ~20173 to ~20298 kJ/kg. The average value of the higher calorific value of corn alcohol distillery stillage is ~19545 kJ/kg, and of the briquettes – in the range from ~22445 to ~26594 kJ/kg. Utilization of industrial waste from beer and alcohol production increases environmental friendliness through the possibility of replacing traditional fuel resources and the absence of a large number of harmful emissions, therefore the use of secondary raw materials is rational.

Вступ

Екологічні умови в усьому світі постійно погіршуються. Збільшення потреб населення створює низку проблем, які потребують перманентного вирішення: виснаження природних ресурсів, збільшення кількості вторинної сировини та промислових відходів, збільшення кількості викидів, які забруднюють навколишнє середовище, ріст кількості вторинної сировини та промислових відходів тощо.

Одними з побічних продуктів виробництва, що потребують утилізації є пивна дробина та післяспиртова барда. Альтернативним та перспективним напрямком їх застосування є виробництво твердопаливних брикетів (Gangil & Bhargav, 2019; Wang, Wu & Sun, 2018; Gangil, 2014; Setter, Ataíde, Mendes & de Oliveira, 2020). Вони є екологічно чистим енергоносієм, який використовується для опалення житлових будинків і технічних приміщень комунального господарства. Енергія, необхідна для виробництва гранул, становить приблизно 20% від усіх енергозатрат на виробництво (Кіндзера, Атаманюк, Госовський & Мотіль, 2013).

Для збільшення часу зберігання пивна дробина та післяспиртова барда потребують сушіння (Ivashchuk, Atamanyuk, Chyzhovych, Kuzminchuk, Zherebetskyi & Kiiaieva, 2021; Mikulski & Kłosowski, 2020; Mussatto, Dragone & Roberto, 2006), наприклад фільтраційним методом, що попередньо показав свою ефективність для зменшення вологості дисперсної сировини (Ivashchuk, Atamanyuk, Gnativ, Chyzhovych & Zherebetskyi, 2021; Атаманюк, Мосюк, Іващук & Захарків, 2016; Gnativ, Ivashchuk, Hrynychuk, Reutskyi, Koval & Vashkurak, 2020).

Процес перетворення рослинної сировини на твердопаливні брикети характеризується початковим ущільненням матеріалу за рахунок зменшення вільного об'єму в сировині. Під час пресування під дією тиску виникають не тільки пружні, а й пластичні деформації. Це призводить до збільшення сил міжмолекулярної взаємодії між частинками, що веде до покращення адгезії та

міцності матеріалу. Для успішного створення твердопаливних брикетів процес пресування проводиться під тиском 100-200 МН/м² (Мальований та Бать, 2011; Ujjinappa & Sreepathi, 2018).

Брикетування рослинної сировини може здійснюватися як з в'яжучим матеріалом, так і без нього (Zhang, Sun & Xu, 2018). Під час використання в'яжучого матеріалу отримані зразки мають більшу щільність, що вимагає більше енергії для формування брикетів. Без використання додаткових в'яжучих матеріалів під час брикетування рослинний матеріал зв'язується із наявним лігніном. За температури близько 170-200 °С і високого тиску (Gangil & Bhargav, 2019) лігнін переходить у рідкий стан і розподіляється по усьому об'ємі сировини. Далі брикета виходить з пресувальної машини і внаслідок різкого перепаду температури при контакті з повітрям лігнін твердне, формуючи механічні властивості продукту.

На якість утворених брикетів також впливає вологість вихідної сировини. У загальному випадку це значення повинне бути в межах 7-14 % (Кіндзера та ін., 2013; Chaloupkova, Ivanova, Ekrt, Kabutey & Herak, 2018; Манзій, Копанський & Ференц, 2010). При більшій вологості, внутрішній тиск води, що виникає під час пресування сировини, не дозволить сформувати якісні брикети і призведе до їх розшарування.

Метою роботи було дослідження теплотворних характеристик відходів харчової промисловості – осушеної пивної дробини та післяспиртової барди зернового походження, для використання їх як сировини для виробництва альтернативного твердого палива.

Запровадження нової сфери застосування пивної дробини та післяспиртової барди як сировини для твердого палива може стати додатковим вирішенням проблеми накопичення відходів, що утворюються на промислових харчових виробництвах. Також це дозволить зменшити негативний вплив на екологію шляхом заміни традиційного повільновідновлюваного ресурсу – деревини та уникнути скорочення лісових масивів.

Експериментальна частина

Об'єктом досліджень була ячмінна пивна дробина, одержана на виробничій лінії пивоварні «Кумпель» (м. Львів, Україна) та кукурудзяна післяспиртова барда після процесу центрифугування, одержана на виробничій лінії ДП «Вузлівський спиртовий завод» (с. Вузлове, Львівська область, Україна). Осушення дослідного матеріалу здійснювалося методом фільтраційного сушіння на лабораторній експериментальній установці до сталої маси відповідно до методики, описаної в (Ivashchuk et al., 2021), зважаючи на переваги даного методу.

Для визначення вмісту залишкової вологи у висушеному матеріалі, проводили дослідження згідно з методикою, наведеною у ДСТУ EN 14774-2:2013. Біопаливо тверде. Визначення вмісту вологи.

Визначення зольності досліджуваної сировини за вимогами ДСТУ ISO 18122:2017 Біопаливо тверде. Метод визначення вмісту золи.

Визначення теплотворної здатності проводили, керуючись методикою ДСТУ EN 14918:2016 (EN 14918:2009, IDT). Біопаливо тверде. Метод визначення теплотворної здатності.

Для формування дослідних зразків твердопаливних брикетів попередньо осушену ячмінну пивну дробину та кукурудзяну післяспиртову барду піддавали пресуванню у гідравлічному пресі марки П474А за тиску 100 кгс/см² протягом 60 с, 120 с та 180 с. Температура у прес-формі становила 150 °С.

Результати та обговорення

Перед виготовленням твердопаливних брикетів було встановлено значення вологості та зольності вихідних матеріалів (Ivashchuk, Atamanyuk, Chyzhovych, Kiiaieva, Zhrebetskyi & Sobechko, 2022; Ivashchuk, Atamanyuk, Chyzhovych, Kiiaieva, Duleba & Sobechko, 2022), результати подано у табл. 1.

Таблиця 1

Значення зольності та вологості для вихідної осушеної сировини

	Зольність, % мас.	Вологість, % мас.
Ячмінна пивна дробина	1,6÷2,3	6,5
Кукурудзяна післяспиртова барда	1,4÷2,8	3

Для визначення значення теплотворної здатності осушеної дробини та барди, згідно методики (Ivashchuk et al., 2022), було проведено кілька паралельних дослідів для кожного матеріалу. В результаті досліджень отримали усереднені значення вищої теплотворної здатності, що становить ~20005 кДж/кг або ~4781 ккал/кг для дробини (табл. 2) і ~19545 кДж/кг або ~4672 ккал/кг для барди (табл. 3).

Таблиця 2

Результати визначення вищої теплотворної здатності
осушеної ячмінної пивної дробини

№ дослідів	Q	
	кДж/кг	ккал/кг
1	19953	4769
2	19751	4720
3	20313	4855
Середнє значення:	20005	4781

Таблиця 3

Результати визначення теплотворної здатності осушеної
кукурудзяної післяспиртової барди

№ дослідів	Q	
	кДж/кг	ккал/кг
1	19573	4678
2	19517	4665
Середнє значення:	19545	4672

Варто зазначити, що значення теплотворної здатності осушеної пивної дробини близьке до значень кукурудзяної післяспиртової барди. Окрім того, отримані дані перевищують показники для енергетичної верби та міскантуса, що набули широкого використання у промисловому виробництві твердопаливних брикет (табл. 4).

Результати досліджень теплотворної здатності дещо перевищують значення для аналогів, що свідчить про теоретично високу ефективність твердопаливних брикетів із пивної дробини і післяспиртової барди. Результати вказують на перспективність і доцільність подальших досліджень використання рослинного матеріалу для виготовлення твердопаливних брикет.

Таблиця 4

Значення вищої теплотворної здатності осушеної дробини та широко поширених рослин для виготовлення твердопаливних брикет

	Ячмінна пивна дробина	Кукурудзяна післяспиртова барда	Енергетична верба	Міскантус
Теплотворна здатність, КДж/кг	~20005	~19545	~17600	~17500

Для пресування було використано гідравлічний прес марки П474А. У процесі пресування було отримано по 3 взірця твердопаливних брикет із пивної дробини та післяспиртової барди. Відмінність між ними була у часі формування ствердлої форми, який становив 60 с (взірець 1), 120 с (взірець 2) та 180 с (взірець 3). При цьому температура у прес-формі (150 °С) та тиск пресування (100 кгс/см²) залишалися незмінними. Приклади одержаних сформованих зразків твердого палива показано на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Дослідні зразки твердого палива після пресування протягом 60 с:

а) з ячмінної пивної дробини (взірець 1);

б) з кукурудзяної післяспиртової барди (взірець 1)

Важливою особливістю отриманих дослідних взірців було те, що формування брикет відбувалося без додавання додаткових зв'язуючих речовин. Також відмітимо, що тиск пресування був нижчий за рекомендовані значення (Мальований та Бать, 2011) для формування брикетів.

Було проведено дослідження теплотворної здатності одержаних брикетів згідно методики, наведеної в експериментальній частині (табл. 5, 6).

Таблиця 5

Результати визначення вищої теплотворної здатності твердопаливних брикет з осушеної пивної дробини

№ досліду	Q,	
	кДж/кг	ккал/кг
1	2	3
Взірець № 1 (150 °С, 60 с, 100 кгс/см ²)		
1	20221	4833
2	20195	4826
3	20103	4804
Середнє значення:	20173	4821

Продовження таблиці 5

1	2	3
Взірець № 2 (150 °С, 120 с, 100 кгс/см ²)		
1	20291	4850
2	20210	4830
3	20180	4823
Середнє значення:	20227	4834
Взірець № 3 (150 °С, 180 с, 100 кгс/см ²)		
1	20186	4825
2	20272	4845
3	20437	4885
Середнє значення:	20298	4851

Таблиця 6

Результати визначення вищої теплотворної здатності твердопаливих брикет з осушеної післяспиртової барди

№ досліду	Q,	
	кДж/кг	ккал/кг
Взірець № 1 (150 °С, 60 с, 100 кгс/см ²)		
1	22405	5354
2	22540	5387
3	22390	5351
Середнє значення:	22445	5364
Взірець № 2 (150 °С, 120 с, 100 кгс/см ²)		
1	23945	5723
2	24155	5773
3	24002	5736
Середнє значення:	24034	5744
Взірець № 3 (150 °С, 180 с, 100 кгс/см ²)		
1	26679	6376
2	26509	6336
Середнє значення:	26594	6356

Отримані дослідні взірці було досліджено на вміст залишкової вологи та золи (табл. 7).

Значення зольності та вологості для сформованих візрців твердого палива

	Зольність, % мас.	Вологість, % мас.
Брикети з ячмінної пивної дробини	1,5÷1,6	2,5÷3,2
Брикети з кукурудзяної післяспиртової барди	0,6÷1,6	~1

Якщо порівнювати значення теплотворної здатності вихідної сировини (табл. 2, 3) та брикетованих візрців (табл. 5, 6), видно що ці значення дещо вищі для сформованого твердого палива. Це можливо пояснити збільшенням густини матеріалу за рахунок пресування, а також зменшенням кількості води у матеріалі, що додатково випаровується під час високотемпературного пресування. Вплив води на теплотворну здатність можна підтвердити отриманими значеннями у табл. 5, 6 – із зменшенням часу пресування зростає також вища теплотворна здатність зразка, оскільки при спалюванні частина енергії йде на виділення залишкової вологості.

Також варто звернути увагу на те що, із збільшенням часу пресування відбувається обпалення брикетів, в результаті чого помітні візуальні відмінності між візрцями. Тому надалі необхідним є встановлення критичного часу пресування або ж температури для запобігання обуглення твердопаливних брикет. З огляду на одержані зразки та дані їх вищої теплотворної здатності вважаємо 60 с оптимальною із досліджених тривалостей формування зразків.

Одержані твердопаливні брикети за своїми параметрами практично відповідають німецькому стандарту DIN 51731: вміст води (<12 %), вміст золи (<1.5 %), теплотворна здатність (3705 – 4661 ккал/кг) (García-Maraver, Rorov & Zamorano, 2011). Вміст води та зольність знаходяться у встановлених межах (табл. 7). Значення теплотворної здатності одержаних візрців твердого палива дещо перевищують верхню межу вказаного стандарту. Використання вихідної сировини з незначно вищою вологістю може дозволити

дещо знизити теплотворну здатність готового продукту, паралельно зменшивши витрати на осушення.

Висновки

У результаті досліджень було отримано готові до використання зразки твердого палива із відходів харчової промисловості рослинного походження – ячмінної пивної дробини та кукурудзяної післяспиртової барди, що є побічними продуктами у виробництві пива і етанолу відповідно.

Середня вища теплотворна здатність осушеної пивної дробини становить ~20005 кДж/кг, а виготовлених брикетів – коливається в межах від ~20173 до ~20298 кДж/кг. Середнє значення вищої теплотворної здатності осушеної післяспиртової барди становить ~19545 кДж/кг, а виготовлених із неї твердопаливних брикетів – в межах від ~22445 до ~26594 кДж/кг.

Відмітимо також потенційну економічність – використання побічного продукту як вихідної сировини дає позитивний економічний ефект за рахунок низької собівартості. Також пивна дробина і післяспиртова барда не вимагають додаткових зв'язуючих компонентів та жодних технологічних процедур очищення перед використанням як сировини для твердого палива. Альтернативне тверде паливо із відходів харчової промисловості додатково дає змогу покращити екологічну ситуацію шляхом заміни традиційних паливних ресурсів, зокрема деревини, та відсутності великої кількості шкідливих викидів.

Одержані результати вказують на перспективність подальших досліджень, спрямованих на пошук оптимальних умов формування ствердлої форми, механічної міцності тощо.

Список літератури

- Chaloupkova, V., Ivanova, T., Ekrt, O., Kabutey, A., & Herak, D. (2018). Determination of particle size and distribution through image-based macroscopic analysis of the structure of biomass briquettes. *Energies*, 11(2), 331. <https://doi.org/10.3390/en11020331>
- Gangil, S. (2014). Beneficial transitions in thermogravimetric signals and activation energy levels due to briquetting of Raw Pigeon Pea Stalk. *Fuel*, 128, 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.02.065>
- Gangil, S., & Bhargav, V. K. (2019). Influences of binderless briquetting stresses on intrinsic bioconstituents of rice straw based solid biofuel. *Renewable Energy*, 133, 462-469. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.033>
- García-Maraver, A., Popov, V., & Zamorano, M. (2011). A review of European standards for pellet quality. *Renewable Energy*, 36(12), 3537-3540. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.013>
- Gnativ, Z. Y., Ivashchuk, O. S., Hrynychuk, Y. M., Reutskyi, V. V., Koval, I. Z., & Vashkurak, Y. Z. (2020). Modeling of internal diffusion mass transfer during filtration drying of capillary-porous material. *Mathematical Modeling and Computing*, 7(1), 22-28. <https://doi.org/10.23939/mmc2020.01.022>
- Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiaieva, S. S., Zhrebetskyi, R. R., & Sobechko, I. B. (2022) Preparation of an alternate solid fuel from alcohol distillery stillage. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 1, 54-59. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2022-140-1-54-59>
- Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiaieva, S. S., Duleba, V. P., & Sobechko, I. B. (2022) Research of solid fuel briquettes obtaining from brewer's spent grain. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(2), 216-221. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i2.256749>
- Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kuzminchuk, T. A., Zhrebetskyi, R. R., & Kiiaieva, S. S. (2021). Research of the calorific value of dried alcohol distillery stillage. *Chemical Technology and Engineering, Proceedings*, 200-201. <https://doi.org/10.23939/cte2021.01.200>

- Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Gnativ, Z. Ya., Chyzhovych, R. A., & Zhrebetskyi, R. R. (2021). Research into kinetics of filtration drying of alcohol distillery stillage. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 4, 58-65. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2021-137-4-58-65>
- Mikulski, D., & Kłosowski, G. (2020). Hydrotropic pretreatment on Distillery Stillage for efficient cellulosic ethanol production. *Bioresource Technology*, 300, 122661. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122661>
- Mussatto, S. I., Dragone, G., & Roberto, I. C. (2006). Brewers' spent grain: Generation, characteristics and potential applications. *Journal of Cereal Science*, 43(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>
- Setter, C., Ataíde, C. H., Mendes, R. F., & de Oliveira, T. J. (2020). Influence of particle size on the physico-mechanical and energy properties of briquettes produced with Coffee Husks. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 8215-8223. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11124-0>
- Ujjinappa, S., & Sreepathi, L. K. (2018). Production and quality testing of fuel briquettes made from Pongamia and Tamarind Shell. *Sādhanā*, 43, 58. <https://doi.org/10.1007/s12046-018-0836-8>
- Wang, Y., Wu, K., & Sun, Y. (2018). Effects of raw material particle size on the briquetting process of Rice Straw. *Journal of the Energy Institute*, 91(1), 153-162. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.09.002>
- Zhang, G., Sun, Y., & Xu, Y. (2018). Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 477-487. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.072>
- Атаманюк, В. М., Мосюк, М. І., Іващук, О. С., & Захарків, О. В. (2016). Кінетика фільтраційного сушіння подрібненого міскантуса. *Науковий вісник національного лісотехнічного університету України: збірник науково-технічних праць*, 26(8), 257-264. <https://doi.org/10.15421/40260840>

- Кіндзера, Д. П., Атаманюк, В. М., Госовський, Р. Р., & Мотіль, І. М. (2013). Дослідження процесу формування паливних брикетів із рослинної сировини та визначення їх характеристик. *Науковий вісник національного лісотехнічного університету України: збірник науково-технічних праць*, 23(17), 138-146.
- Мальований М.С., & Бать Р.Я. (2011). Гранулювання паливних матеріалів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 3/8(51), 8-12.
- Манзій, С. О., Копанський, М. М., & Ференц, О. Б. (2010). Порівняльні характеристики гранульованого та брикетованого біопалива. *Науковий вісник НЛТУ України*, 20(3), 88-90.

ДОСЛІДЖЕННЯ З ПЕРЕРОБКИ ТОРФУ НА КОМПОЗИЦІЙНЕ ПАЛИВО

Петрова Ж.О., Інститут технічної теплофізики НАН України, д.т.н., с.н.с.,
головна наукова співробітниця відділу ТМПТ, Україна

Пазюк В.М., Інститут технічної теплофізики НАН України, д.т.н., доцент,
провідний науковий співробітник відділу ТМПТ, Україна

Новікова Ю.П., Інститут технічної теплофізики НАН України, аспірантка,
молодша наукова співробітниця відділу ТМПТ, Україна

Петров А.І., Інститут технічної теплофізики НАН України, аспірант, молодший
науковий співробітник відділу ТМПТ, Україна

Abstract

The actual task of every country is to become energy independent by means of the transition from traditional energy sources to alternative ones. One of the sources of alternative types of fuel is peat, which is the cheapest type of fuel for the population, raw material for nutritious soils and organic-mineral fertilizers.

Peat deposits are natural biological systems that are in a stage of continuous growth. Almost 3 billion tons of peat are produced every year in the world, which is about 120 times more than production.

Peat in its native state is a rather complex object of energy use and requires the development of additional processing technology. Due to the fact that peat has a high ash content and lower caloric content, depending on the deposit, this reduces its energy value. Creating compositions with different types of biomasses will reduce ash content and increase caloric content.

This work deals with the processing of peat with the creation of composite mixtures with nutritious corn residues and old silt deposits. Studies of drying kinetics of composite mixtures are presented on two bases: 1) solid residue after extraction of

humic substances with nutritious corn residues; 2) peat with old silt deposits made it possible to determine optimal drying regimes.

Вступ

Завданням розвитку людства є збереження навколишнього середовища та раціональне використання сировинних ресурсів. Вуглеводневе паливо та газ постають сировинними ресурсами, які обмежені і значною мірою же вичерпані, а їх використання призводить до забруднення біосфери. Перехід від традиційних джерел енергії до альтернативних є однією з можливостей до поновлення сировинної бази та збереження екологічної ситуації в світі.

До джерел альтернативного палива можна віднести торф, біомасу, шлаки та відходи промисловості, сільського господарства, комунально-побутових та інших підприємств.

Серед природних ресурсів, які відносять до альтернативного палива, торф займає особливе місце. В Україні більшість боліт є торфовищами. Останній термін часто використовують для осушених боліт, іноді під торфовищем розуміють торфовий поклад болота, особливо при його розробці (Сивий, 2012).

В Україні запаси торфу мають промислове значення. Геологічні запаси складають 2,04 млрд т, що еквівалентно 660 млрд м³ природного газу (Атлас, 2012).

У торфі міститься велика кількість гумінових речовин. Через це торф має значний енергетичний та агрохімічний потенціал і використовується як місцевий вид палива, а також як сировина для виробництва парникових та споживчих ґрунтів і органічних добрив. Торф'яне паливо є найдешевшим і ефективним при транспортуванні на невеликі відстані. Вартість одиниці енергії отриманої з торфу в 3 рази дешевше ніж вартість тієї ж енергії отриманої з природного газу (Снежкін, Петрова & Корінчук, 2019).

При виробництві гумінових рідких або твердих добрив з торфу екстрагують гумінову складову (Снежкін, Петрова & Корінчук, 2018). Після

екстракції залишається твердий залишок, який можна в подальшому використовувати більш раціонально.

В Україні актуальною є проблема переробки та утилізації мулових відкладень, які утворюються підчас процесу очищення на очисних спорудах стічних вод. Не перероблені мулові відкладення кожного року зливаються на переповнені мулові майданчики, що призводить до погіршення екології та умов життя в Україні.

Проблемою переробки застарілих мулових відкладень, є малий вміст в них органічних речовин, перевищена зольність та висока вологість, тому вони не придатні для спалювання в чистому вигляді та для землеробства. Для зменшення зольності до мулових відкладень доцільно додавати біомасу та торф та підсушити для зменшення вологості (Снежкін, Петрова, Новікова & Петров, 2021).

Мета дослідження полягає у дослідженнях з переробки торфу та створенням на його основі композиційного палива, з додаванням застарілих мулових відкладень та поживних решток кукурудзи.

Матеріали та методи досліджень

Для проведення досліджень було використано фрезерний торф з Чернігівської області, поживні рештки кукурудзи з Вінницької області та застрілі мулові відкладення з Київської області (рис. 1).



а



б



в

Рис. 1. Вихідна сировина:

а) фрезерний торф; б) поживні рештки кукурудзи; в) застарілі мулові відкладення

Торф використовували у двох станах. Перший це свіжий фрезерний торф вологістю 75,1 % та другий пиловидний торф вологістю 13,18 %. Зольність торфу становила 27,23 %. Поживні рештки кукурудзи мають вологість 8,45 % та зольність 9,8 %. Застарілі мулові відкладення вологості 63,1 % та зольності 47,3 %.

За розробленою технологією екстрагування гумінових та гумусових речовин (рис. 2), яка полягає у підготовці зразка торфу, з наважки екстрагували відповідною концентрацією лугу гумінові кислоти, з подальшою нейтралізацією кислотою розчину. Після нейтралізації гумінові кислоти випадали в осад, розчин фільтрували, сушили і визначали загальну кількість гумінових речовин (Петрова, 2015).

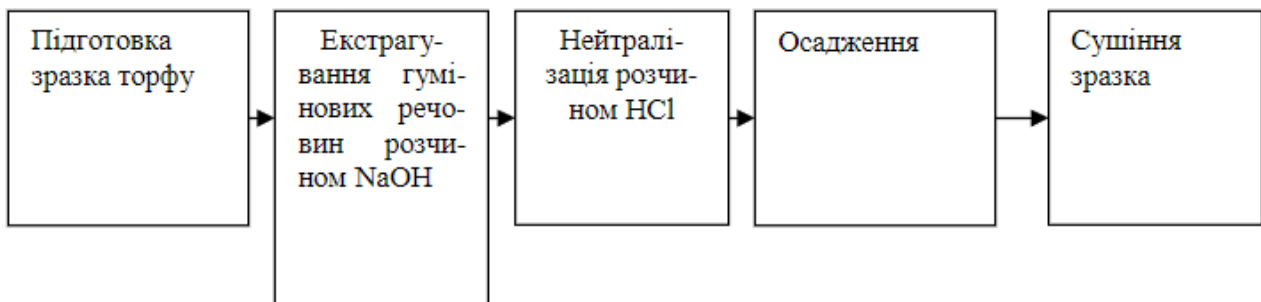


Рис. 2. Технологічна схема отримання гумінових речовин з торфу

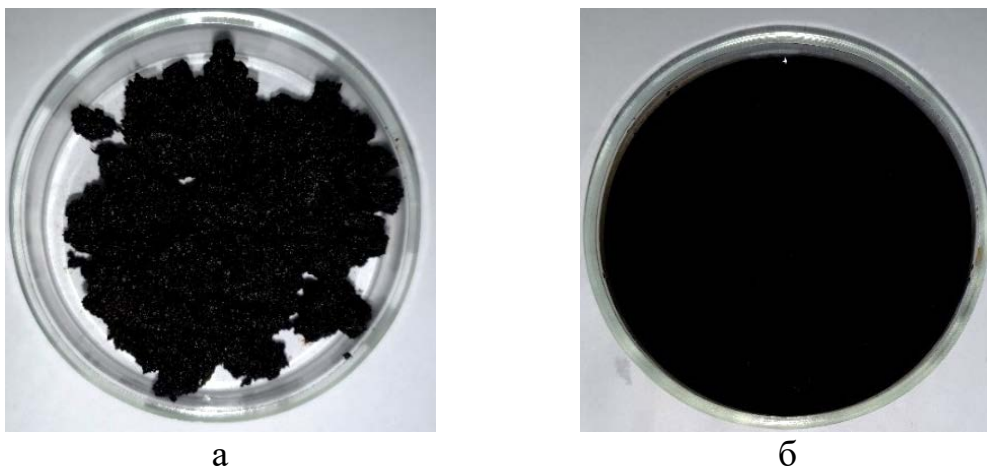


Рис. 3. Отримані компоненти після екстрагування з торфу гуматів:
а) твердий залишок після екстракції з торфу гумінової складової
б) рідкі гумінові добрива

Після проведення екстрагування з фрезерного торфу було отримано твердий залишок (рис. 3а) з вологістю 81,5 % та зольністю 40 % та рідкі гумінові добрива (рис. 3б).

На основі торфу та твердого залишку після екстрагування створено дві композиції: 1) твердий залишок після екстрагування гумінових речовин з поживними рештками кукурудзи (рис. 4а); 2) торф з застарілими муловими відкладеннями (рис. 4б). Перша суміш розсипчаста та має зольність 10 % та вологість 44,3 %. Друга комкується – зольність 33,1 % та вологість 68,6 %.



Рис. 4. Створені композиції:

- а) на основі твердого залишку після екстрагування гуматів та поживних решток кукурудзи; б) на основі фрезерного торфу та застарілого мулових відкладень

Для дослідження кінетики процесу сушіння композиційних сумішей застосовували експериментальний конвективний стенд із встановленою автоматичною системою збору та обробки інформації, який дозволяє проводити термічну обробку сушильним агентом при температурі 60-120 °С та швидкості руху 0,5-5 м/с (Petrova, Sniezhkin, Paziuk, Novikova & Petrov, 2021).

Результати та обговорення

На рисунку 5 наведені криві температурні та кінетики сушіння торфу. Температурні криві вперше були введені А. В. Ликовим та мають важливе значення для аналізу процесу сушіння. В початковій стадії прогрів поверхні матеріалу відбувається інтенсивно, швидко досягаючи температури мокрого

термометра (Новікова та Петров, 2021). На протязі 30 хвилин торф прогрівається до температури сушіння 120 °С.

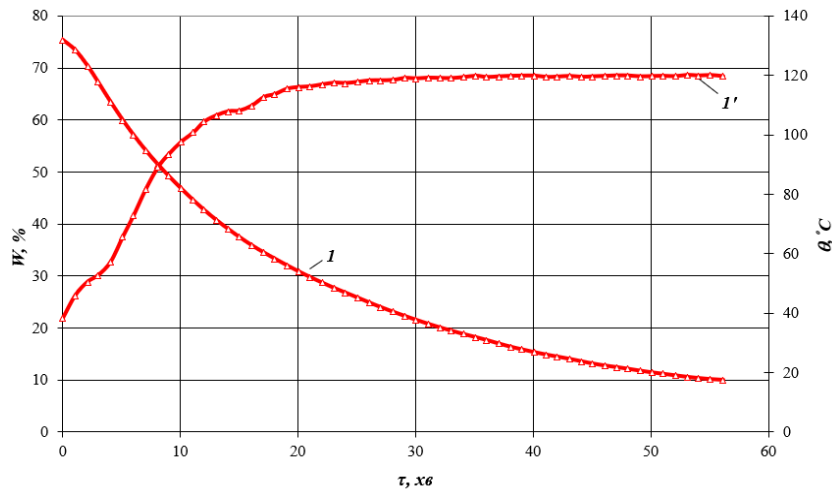


Рис. 5. Зміна вологості (1) і температури всередині шару (1') свіжого фрезерного торфу.

Режимні параметри $t = 120$ °С, $V = 3$ м/с

Криві сушіння характеризують зміну середньої вологості матеріалу W^c з часом. Аналіз цих кривих сушки показує, що на початку процесу коли вологість матеріалу інтенсивно зменшується по кривій має місце короткочасна стадія прогріву матеріалу, потім вологість змінюється по прямій лінії, цей перший період називається першим періодом сушіння. Як видно з рисунку, цей період короткий. В основному у нас спостерігається другий період сушіння, який характеризується зменшенням інтенсивності віддачі води (Новікова та Петров, 2021). Торф при температурі теплоносія 120 °С до кінцевої вологості 10 % сушиться 55 хв при цьому температура прогрівання матеріалу становить 119,6 °С.

На рисунку 6 представлено зміну вологості та температури твердого залишку після екстрагування з торфу гумінових речовин за температурними режимами 70 та 100 °С.

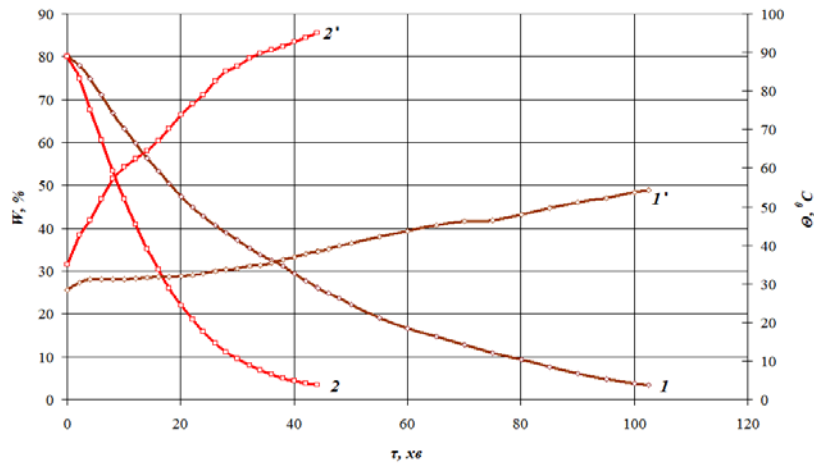


Рис. 6. Зміна вологості (1, 2) та температури в середині шару (1', 2') твердого залишку торфу після екстракції від часу, $V = 3$ м/с: 1, 1' - 70°C; 2, 2' - 100°C

Як видно з температурних кривих прогрівання твердого залишку при температурі теплоносія 70 °C відбувається до температури 54,4 °C і вологість при цьому становить 3 %, що свідчить про недоцільність подальшого сушіння. Інтенсивність збільшується в 2 рази при збільшенні температури теплоносія до 100 °C, температура нагрівання при цьому режимі складає 95 °C.

Тривалість сушіння торфу при температурному режимі 120 °C до вологості 10 % становить 55 хв, що менше на 1,49 раз за температурним режимом 70 °C та більше на 1,83 рази за температурним режимом 100 °C при сушінні твердого залишку після екстрагування гуматів до заданої вологості 10 %. З цього видно, що сушіння твердого залишку після екстрагування за температурним режимом 100 °C проходить інтенсивніше ніж сушіння торфу за режимом 120 °C.

На рисунку 7 зображено зміна вологості та температури сушіння суміші на основі твердого залишку торфу після екстрагування гумінової складової з подрібненими поживними рештками кукурудзи за температурними режимами 70 °C та 100 °C. Як видно з рис. 7 збільшення температури теплоносія від 70 до 100 °C зменшує тривалість сушіння на 20 %. Температура прогрівання матеріалу йде поступово вгору, кінцева температура 53,3 °C при температурі 70 °C та 96,8 °C при температурі 100 °C.

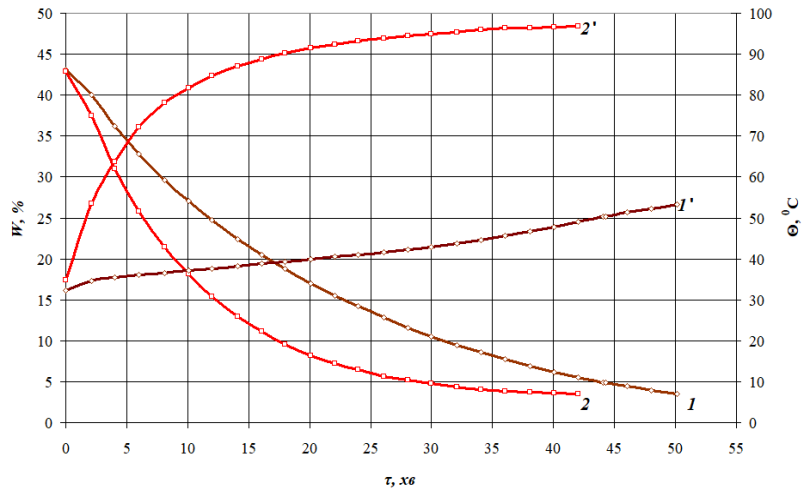


Рис. 7. Зміна вологості (1, 2) та температури в середині шару (1', 2') суміші на основі твердого залишку торфу після екстракції та подрібненими рештками кукурудзи від часу, $V = 3$ м/с: 1, 1' - 70 °C; 2, 2' - 100 °C

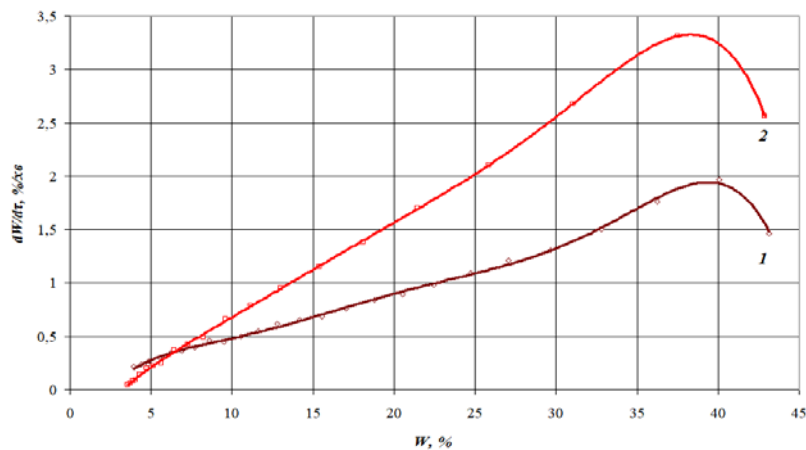


Рис. 8. Зміна швидкості суміші на основі твердого залишку торфу після екстракції та подрібненими рештками кукурудзи, $V = 3$ м/с: 1 - 70 °C; 2 - 100 °C

На рисунку 8 зображено зміна швидкості сушіння суміші на основі твердого залишку торфу після екстрагування гумінової складової з подрібненими поживними рештками кукурудзи за температурними режимами 70 °C та 100 °C. Як видно з рис. 8 швидкість сушіння при температурі 70 °C – 1,9 %/хв., а при температурі 100 °C – 3,3 %/хв.

На рис. 9 представлені температурні криві та кінетика сушіння торф'яно-мулової суміші на конвективному сушильному стенді при температурах 80 °C

та 120 °С. Тривалість сушіння торф'яно-мулової суміші з підвищенням температури теплоносія від 80 до 120 °С зменшується на 29,5 %. Нагрівання гранул при температурі теплоносія 80 °С проходить рівномірно і при вологості гранул 10 % складає 72 °С, при температурі 120 °С нагрівання суміші йде інтенсивніше і при відповідній вологості складає 115 °С.

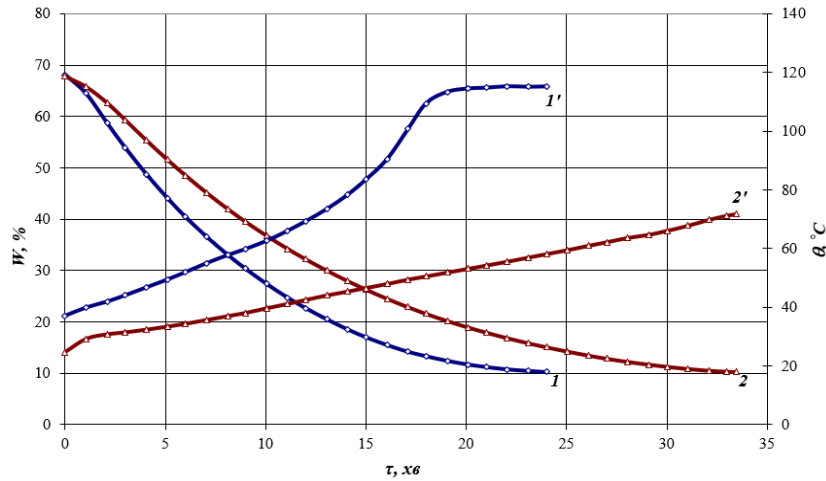


Рис. 9. Зміна вологовмісту (1,2) і температури в середині шару (1',2') торф'яно-мулової суміші у пропорції 50% мулу/50% торфу від часу.

Режимні параметри $V = 3$ м/с: 1,1' – 120°C; 2,2' – 80°C

На рисунку 10 представлена зміна швидкості сушіння торф'яно-мулової суміші температурними режимами 70 °С та 100 °С. Як видно з рис. 9 швидкість сушіння торф'яно-мулової суміші з підвищенням температури від 80 до 100 °С підвищується від 3,8 до 5,5 %/хв.

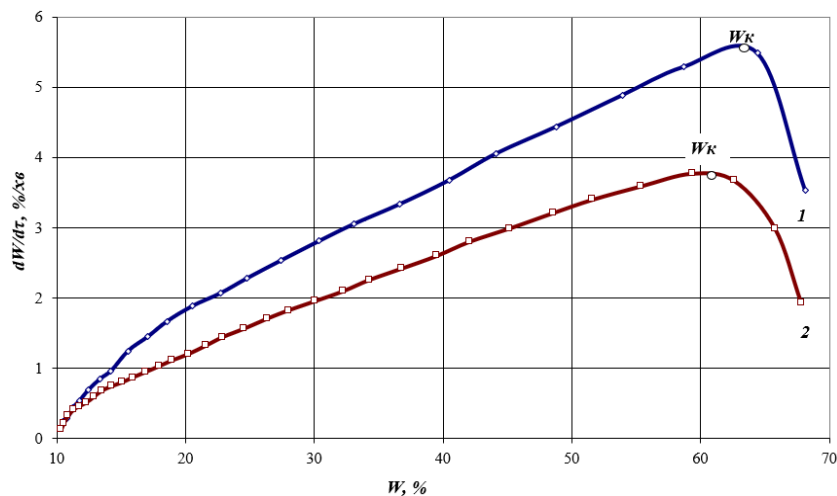


Рис. 10. Зміна швидкості сушіння торф'яно-мулової суміші у пропорції 50% мулу/50% торфу. Режимні параметри $V = 3$ м/с: 1 – 120°C; 2 – 80°C

Тривалість сушіння композиції на основі твердого залишку після екстрагування гумінових речовин з поживними рештками кукурудзи до кінцевої вологості 10 % за температурним режимом 70 °С становить 31 хв та за температурним режимом 100 °С – 17 хв.

Тривалість сушіння композиції на основі торфу з застарілими муловими відкладеннями до кінцевої вологості 10 % за температурним режимом 80 °С становить 34 хв та за температурним режимом 100 °С – 24 хв.

При порівнянні сушіння композицій з торфом та твердим залишком після екстрагування гуматів процес інтенсифікується.

Висновки

В роботі розглянуто переробку торфу з подальшим створенням композиційних сумішей. Розроблена підготовка сировини, яка включає екстракцію з торфу гумінових речовин та отриманням твердого залишку, який в подальшому використовується для створення біопалива та рідких гумінових добрив. Підібрано оптимальне співвідношення компонентів яке підвищує його якість та зменшує зольність твердого залишку.

Праведні дослідження кінетики сушіння композиційних сумішей на двох основах: 1) твердий залишок після екстрагування гумінових речовин з поживними рештками кукурудзи; 2) торф з застарілими муловими відкладеннями дали можливість визначити оптимальні режими сушіння.

Ліквідація накопичених відкладень потрібна для ефективної та безперебійної експлуатації очисних споруд. Тому є доцільним розробка технології з отриманням композиційного палива на основі торфу та застарілих мулових відкладень з одночасним одержанням теплової та електричної енергії.

При комплексній переробці торфу на паливо з екстрагуванням гумінових речовин можливо отримати органічні добрива високої якості та з відходів паливо, що дозволить більш раціонально використовувати торф.

Список літератури

- Petrova, Z., Sniezhkin, Y., Paziuk, V., Novikova, Y., & Petrov, A. (2021). Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 159-166.
- Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України. НАН України. Інститут відновлюваної енергетики. Київ, 2012 р. – 69 с.
- Новікова, Ю. П., & Петров, А. І. (2021, травень). Енергоефективне сушіння торф'яних гранул. *Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики: матеріали XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*, (pp. 86-87). К. : Видавництво «Політехніка».
- Петрова, Ж. О. (2015). Дослідження режимів екстрагування гумусових та гумінових речовин. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*, 47(2), 190-194.
- Сивий, М. Я. (2012). Торфові ресурси України: сучасний стан, перспективи використання. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Географія*, (1), 81-86.
- Снежкін, Ю. Ф., Петрова, Ж. О., & Корінчук, Д. М. (2018). *Патент України 117651*. Київ : ДП “Український інститут інтелектуальної власності”.
- Снежкін, Ю. Ф., Петрова, Ж. О., & Корінчук, Д. М. (2019, травня). Ефективна теплотехнологія переробки торфу на паливо та добриво. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції*, (pp. 616). К.: Інтерсервіс.
- Снежкін, Ю. Ф., Петрова, Ж. О., Новікова, Ю. П., & Петров, А. І. (2021). Шляхи утилізації застарілих мулових відкладень на паливо. *Екологічна безпека та природокористування*, 40(4), 21-31. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.21-31>

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУМІСНОГО СПАЛЮВАННЯ ВУГІЛЛЯ З ПАЛИВОМ З ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ НА ТЕС

Кобзар С.Г., Інститут теплоенергетичних технологій НАН України, к.т.н.,
с.н.с., Україна, Київ

Гапонич Л.С., Інститут теплоенергетичних технологій НАН України, к.т.н.,
с.н.с., Україна, Київ

Голенко І.Л., Інститут теплоенергетичних технологій НАН України, к.т.н.,
Україна, Київ

Топал О.І., Інститут теплоенергетичних технологій НАН України, к.т.н., с.н.с.,
Україна, Київ

Abstract

The potential of RDF to be produced on the basis of municipal solid waste of Ukraine in terms of cities and regions has been analyzed and defined. It was the share of useful solid waste components that can be recovered to produce RDF in Ukraine is 25-30 %. It was shown that the potential for annual production of RDF in Ukraine is 2.5-3.0 million tons. The heating value of RDF made from municipal solid waste in Ukraine can be estimated as 13-16 MJ/kg, which corresponds to 3 and 4 quality classes according to DSTU EN 15359:2018.

The possibility of co-combustion of RDF with coal in the TPP-312 boiler was studied. It was found that when using RDF, the replacing 10% of coal with RDF leads to a decrease in the heat source of the boiler and a decrease in the formation of nitrogen oxides. Feeding RDF to the burners together with coal provides the necessary time for the combustion products of solid waste components to stay in the zone with the temperature necessary for the neutralization of harmful substances.

Вступ

В Україні на рівні державних рішень і міжнародних зобов'язань задекларовано наміри щодо поступового заміщення в енергетиці органічних

видів палив, переважно вугілля та газу, альтернативними. Серед альтернативних палив, які у довгостроковій перспективі можуть використовуватись у паливно-енергетичному комплексі (ПЕК) України, є палива, вилучені з твердих побутових відходів (ТПВ). При термічній переробці таких палив утворюється енергія, яка може бути використана для виробництва електроенергії та теплоти (технологія «Waste-to-Energy» або WtoE). Обсяги утворення ТПВ в Україні за останні роки сягають 11,5-12,5 млн т (табл. 1, узагальнені дані Мінрегіон і Держстат України).

Таблиця 1

Поводження з ТПВ в Україні у 2018–2021 рр.

Рік	Обсяги збирання	Пункти вторинної сировини		Сміттєпереробні підприємства		Ділянки компостування	Сміттєспалювальні установи		Полігони (смiттєзвалища)	
	тис. т	тис. т	%	тис. т	%	тис. т	тис. т	%	тис. т	%
2018	11857,2	146,5	1,2	260,1	2,2	1,6	208,1	1,8	11240,9	94,8
2019	11459,4	128,6	1,1	303,3	2,6	1,2	199,2	1,7	10827,1	94,6
2020	12634,9	118,7	0,9	336,5	2,6	6,2	181,3	1,4	11992,2	95,0
2021	11449,0	135,6	1,2	776,1	6,8	8,8	110,9	1,0	10417,6	91,0

В останні роки 10,5-12,0 млн т зібраних і необроблених ТПВ вивозять та складають на полігонах і сміттєзвалищах, а це більше 90 % від зібраних ТПВ. Таке поводження з відходами призводить до погіршення екологічної ситуації, втрати значної кількості цінних матеріалів та енергоресурсів. Згідно із Законом України «Про Основні засади (Стратегію) екологічної політики України на період до 2030 року» від 28.03.2019 розв'язання цієї проблеми є ключовим завданням у вирішенні питань енерго- та ресурснезалежності держави, економії природних матеріальних та енергетичних ресурсів. Закон передбачає зменшення до 35 % обсягу складування відходів на полігонах (смiттєзвалищах) до 2030 року.

Сортування ТПВ не в змозі вирішити завдання повної утилізації відходів.

Головною тенденцією поводження з ТПВ має бути комплексний підхід відповідно до європейських стандартів (Гелету́ха, Жовмір, Олійник & Радченко, 2011; Budihardjo et al., 2022; Neuwahl, Cusano, Benavides, Holbrook & Roudier, 2019; Saveyn et al., 2016), а саме окреме збирання, сортування, механіко-біологічна обробка, компостування/анаеробне зброджування фракцій ТПВ, що біологічно розкладаються, та виробництво палива з фракцій ТПВ, що залишилися. Перевагою використання технології WtoE є перетворення відходів в енергію, зокрема у відновлене з відходів паливо (RDF/SRF), яке може накопичуватись, складуватись, транспортуватись і використовуватись в енергетиці за потреби. Такий підхід до поводження з відходами є одним з найбільш надійних та ефективних шляхів економії органічного палива та зменшення викидів парникових газів (Neuwahl et al., 2019). Водночас залучення в енергетику палив на основі ТПВ має відбуватись із забезпеченням їх термічної переробки в екологічно безпечний спосіб відповідно до вимог Директиви № 2010/75/ЄС про промислові викиди, виконання якої є одним із пріоритетів України в рамках підписаної Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом (ЄС), Європейським співтовариством з атомної енергії та їхніми державами-членами, з іншої сторони. Крім того, заміщення у ПЕК України органічних палив, переважно вугілля та газу, які є обмеженими під час воєнного стану і, напевне, будуть обмеженими у повоєнний час, альтернативними, в тому числі паливами на основі ТПВ, є надзвичайно актуальним.

Термін RDF (Refused Derived Fuel), зазвичай, відноситься до відокремленої висококалорійної складової ТПВ, що включає полімери, папір, картон, деревину та текстиль. Тобто RDF – це органічне паливо, яке отримується після видалення вторинної сировини та негорючих матеріалів із ТПВ. Що стосується SRF (Solid Recovered Fuels), то це паливо, отримане з безпечних відходів, в тому числі твердих побутових і промислових. Отримане паливо може піддаватися додатковій обробці для збільшення теплоти згоряння.

SRF має відповідати вимогам класифікації та специфікації, які були розроблені Технічним комітетом CEN/TC 343 та викладені у європейському стандарті EN 15359:2011 «Solid recovered fuels – Specifications and classes» (табл. 2). Стандарт EN 15359:2011 прийнятий в Україні методом підтвердження на мові оригіналу – «Тверде відновлювальне паливо. Технічні характеристики та класи (EN 15359:2011, IDT)».

Таблиця 2

Класифікація SRF згідно з ДСТУ EN 15359:2018

Класифікаційний параметр	Класи (середнє значення)				
	1	2	3	4	5
Теплота згоряння, МДж/кг	≥25,0	≥20,0	≥15,0	≥10,0	≥3,0
Хлор (Cl), % (на суху масу, d)	≤0,2	≤0,6	≤1,0	≤1,5	≤3,0
Ртуть (Hg), мг/МДж	≤0,02	≤0,03	≤0,08	≤0,15	≤0,50

Залежно від складу ТПВ і технології виробництва може бути отримано RDF/SRF з різною теплотою згорання (3-25 МДж/кг) та виду – у вигляді порошку або гранул різного розміру й густини. Кількість RDF/SRF, що виробляється з ТПВ, може змінюватись від 25 до 55 % (по масі) залежно від країни, типу збирання, методів обробки та вимог до якості (Neuwahl et al., 2019).

Світова практика показує, що RDF/SRF утилізується на заводах WtoE (при спільному спалюванні з вугіллям, при виробництві цементу) та на ТЕС і ТЕЦ (як комунальних, так і промислових) (Mutz, Hengevoss, Hugl & Gross, 2017). Виробництво і споживання RDF/SRF у світі щорічно збільшується (Kaza, Yao, Bhada-Tata & Van Woerden, 2018; Themelis, Barriga, Estevez & Velasco, 2013). Щорічний попит на RDF/SRF в Європі складає 53-63 млн т. 90 % теплоти, яке споживає населення в Копенгагені, отримується за рахунок спалювання RDF або відсортованих ТПВ, 85 % – у Вільнюсі, 80 % – у Стокгольмі, 60 % – у Парижі. В країнах ЄС на заводах WtoE споживаються

RDF/SRF з теплотою згоряння 6,4-17,0 МДж/кг, при цьому середнє значення теплоти згоряння складає 10,3 МДж/кг.

Треба підкреслити, що термічна утилізація відходів, яка відбувається без урахування особливостей їх морфологічного та елементного складу, може призводити до утворення вкрай небезпечних для людини сполук, таких як поліхлоровані вуглеводні або діоксини та фурани, гранично допустимі концентрації яких становлять пікограми (Neuwahl et al., 2019). Крім того, в останні роки збільшилася кількість досліджень, присвячених розробці технологій спільного спалювання RDF/SRF з іншими паливами, в тому числі з природним газом і вугіллям на ТЕС (Кобзар, Топал, Гапонич & Голенко, 2020; Boavida, Abelha, Gulyurtlu & Cabrita, 2003; Lin & Ma, 2012; Rada, Cioca & Lonescu, 2017). Виконання подібних досліджень щодо українського RDF також потребують інформації з його теплоти згорання та складу, тому **метою дослідження** була оцінка потенціалу виробництва RDF на основі визначених технологічних і морфологічних властивостей ТПВ України та дослідження впливу сумісного спалювання вугілля та RDF визначеної якості в топці енергетичного котла на його екологічні та технологічні характеристики.

Визначення типових особливостей морфологічного та елементного складу RDF/SFR з урахуванням особливостей його формування в Україні

На рис. 1 та 2 для різних областей та міст України показано кількісний показник придатних для виробництва RDF частки ТПВ – відокремленої висококалорійної фракції перероблених ТПВ, яка включає полімери, папір, картон, деревину та текстиль.

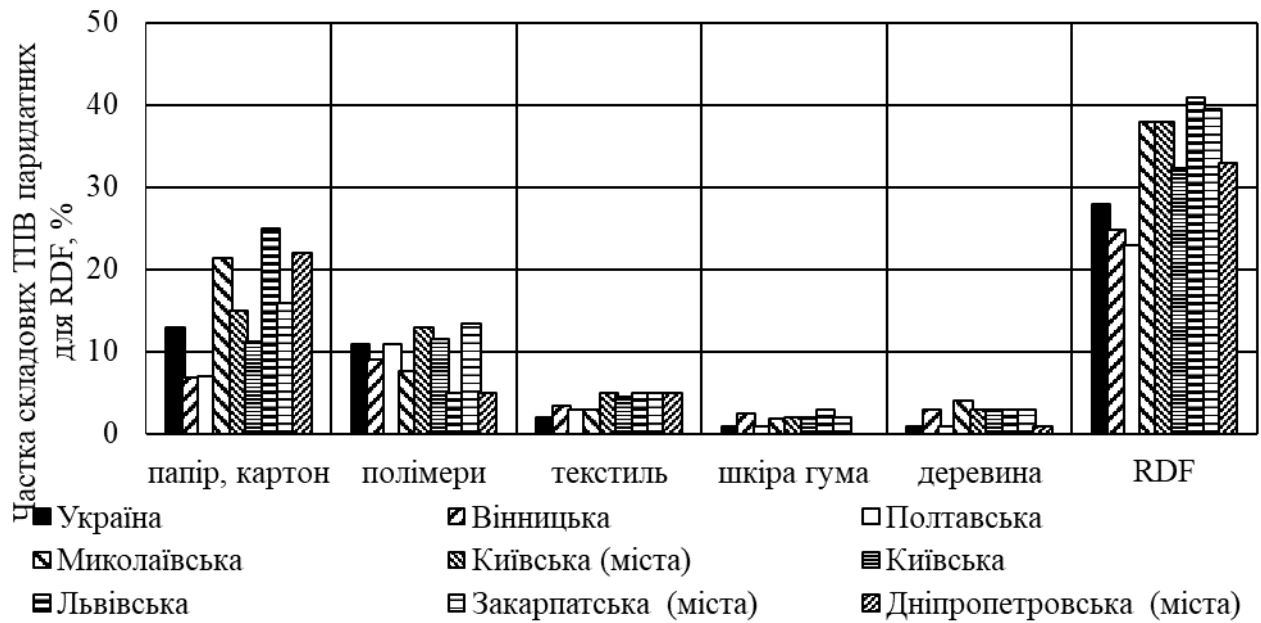


Рис. 1. Частки складових ТПВ придатних для RDF для різних областей України

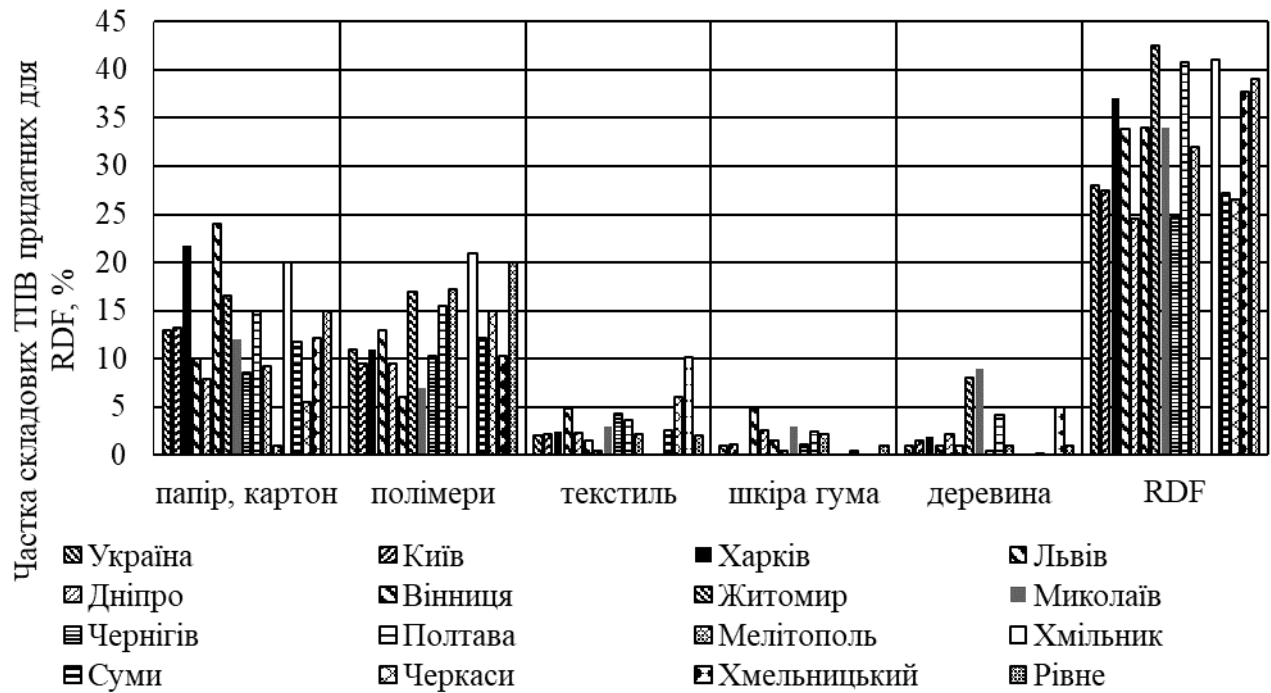


Рис. 2. Частки складових ТПВ придатних для RDF для різних міст України

Кількісний показник таких залишків для різних регіонів України складає 23,0-42,0 % від загальної кількості ТПВ. В середньому для України частка складових ТПВ придатних для RDF складає 28 %.

Треба зазначити, що 2016-2020 роках на пункти вторинної сировини та сміттєпереробні підприємства потрапляло 3,4-3,7 % від загальної кількості зібраних ТПВ (табл. 1), з них близько 80 % (у середньому 2,8 % загальної

кількості ТПВ) припадало на папір, картон, деревину, полімери. У 2021 році кількість ТПВ, що потрапила на пункти вторинної сировини та сміттєпереробні підприємства, різко збільшилася та досягла 8,0 % від загальної кількості зібраних ТПВ. З урахуванням цього осереднена частка складових ТПВ, яку можна вилучити для виробництва RDF в Україні складає 22,0-25,0 % (табл. 3). Потенціал виробництва RDF в Україні складає 2,5-3,0 млн т. В табл. 4 наведено встановлений можливий морфологічний склад RDF, виготовленого з ТПВ України.

Таблиця 3

Потенціал виробництва RDF в Україні для 2018–2021 рр.

Рік	Обсяги збирання	Пункти вторинної сировини		Сміттєпереробні підприємства		Частка складових ТПВ придатних для виробництва RDF		Потенціал виробництва RDF	
	тис. т	%	тис. т	%	тис. т	%	тис. т	%	тис. т
2018	11857,2	1,2	146,5	2,2	260,1	28,0	3320,0	25,3	3000,0
2019	11459,4	1,1	128,6	2,6	303,3	28,0	3208,6	25,0	2864,9
2020	12634,9	0,9	118,7	2,6	336,5	28,0	3537,8	25,2	3184,0
2021	11449,0	1,2	135,6	6,8	776,1	28,0	3205,7	21,6	2473,0

Таблиця 4

Можливий морфологічний склад RDF для України

Складова RDF	Діапазон, %	Середнє значення, %
Папір, картон та інша макулатура	25,0–67,0	47,0
Полімери, в тому числі пластик, поліетилен, поліпропілен, синтетичні волокна, багатошарова упаковка та т. п.	18,0–57,0	39,0
Шкіра, шкірозамінники, шкіряні та гумові вироби	1,5–14,5	3,5
Текстиль різних типів	1,5–27,0	7,0
Деревина та похідні від неї	2,0–12,0	3,5

Елементний склад палива або його компонентів (на робочий стан) – це волога W^r , зола A^r , сірка S^r , вуглець C^r , водень H^r , кисень O^r та азот N^r . Нижча теплота згоряння на робочий склад палива Q_i^r , МДж/кг, для ТПВ та їх компонентів розраховується за формулою Менделєєва:

$$Q_i^r = 4,18(81C^r + 300H^r - 26(O^r - S^r) - 6(9H^r + W^r)) \times 10^{-3}. \quad (1)$$

В табл. 5 наведено елементний склад, вихід летких і теплоту згорання RDF для різних областей та міст та України в цілому. Елементний склад і вихід летких RDF розраховано за їх морфологічним складом (табл. 4) та елементним складом компонентів ТПВ (Гапонич, Топал, Голенко & Кобзар, 2022; Komilis, Evangelou, Giannakis & Lymperis, 2012).

Таблиця 5

Елементний склад, вихід летких і теплота згоряння RDF,
виготовленого з ТПВ різних областей, міст України та України в цілому

Область України	Елементний склад на робочу масу (г), %							V^d , %	Q_i^r , МДж/кг
	C^r	H^r	O^r	N^r	S^r	A^r	W^r		
Україна	37,6	5,3	34,6	0,4	0,2	10,9	11,0	77,2	14,1
Області України									
Вінницька	40,4	5,6	30,6	0,7	0,3	10,2	12,2	74,0	15,9
Дніпропетровська (міста)	39,1	5,3	36,4	0,8	0,2	7,0	11,2	78,0	14,5
Закарпатська	38,9	5,4	33,2	0,7	0,2	9,9	11,7	76,0	14,8
Київська (міста)	39	5,4	33,1	0,7	0,3	9,8	11,7	75,9	14,9
Київська	39,2	5,5	32,4	0,7	0,3	10,0	11,9	75,5	15,1
Миколаївська	39,4	5,4	34,2	0,5	0,2	7,8	12,5	76,0	14,9
Полтавська	37,7	5,3	33,2	0,7	0,2	11,9	11,0	76,6	14,4
Міста України									
Вінниця	39,3	5,4	35,7	0,4	0,2	7,9	11,1	77,1	14,7
Дніпро	40,0	5,6	31,2	0,5	0,4	10,8	11,5	74,5	15,7
Житомир	35,5	5,0	34,6	0,2	0,2	10,4	14,1	76,5	13,1
Запоріжжя	39,0	5,3	33,5	1,2	0,1	7,9	13,0	74,9	14,8
Київ	38,1	5,3	34,4	0,5	0,2	10,1	11,4	76,8	14,3
Миколаїв	40,3	5,5	30,9	0,5	0,3	7,3	15,2	73,0	15,6

Область України	Елементний склад на робочу масу (г), %							V ^d , %	Q _r ^r , МДж/кг
	C ^r	H ^r	O ^r	N ^r	S ^r	A ^r	W ^r		
Харків	37,0	5,1	36,4	0,4	0,2	9,3	78,1	11,6	13,6
Хмельницький	39,0	5,3	33,5	1,2	0,1	7,9	13,0	76,3	14,7
Чернігів	38,8	5,4	33,2	0,8	0,2	11,0	10,5	76,7	14,8

Окрім елементів, наведених у табл. 5, RDF містить важкі метали та шкідливі речовини. Типовий вміст у RDF цих величин (на робочу масу, г) такий: хлор Cl^r ≤ 0,8 %, свинець Pb^r = 130-300 мг/кг, Cd^r = 4-9 мг/кг, Cu^r = 235-500 мг/кг, ртуть Hg^r = 0,6-1,2 мг/кг, талій Tl^r = 1-2 мг/кг, марганець Mn^r = 150-300 мг/кг, V^r = 10-25 мг/кг, Ni^r = 50-100 мг/кг, Co^r = 8-12 мг/кг, миш'як As^r = 5-13 мг/кг, Cr^r = 85-140 мг/кг, Sb^r = 50-150 мг/кг, Sn^r = 35-70 мг/кг.

Діапазон теплоти згорання RDF, виготовленого з ТПВ України, складає 13,1-15,9 МДж/кг. Це відповідає 3 та 4 класам SRF згідно з ДСТУ EN 15359:2018 (табл. 2). Для збільшення теплоти згорання RDF можна додавати горючі фракції промислових і комерційних відходів.

Наші розрахунки показують, що в Україні є потенціал для щорічного виробництва 2,5-3,0 млн т RDF з теплою згорання 13-16 МДж/кг, або 1,1-1,6 млн т у. п. При залученні цих палив в енергетику можна отримати щорічно близько 2000 млн кВт·год. теплової та електричної енергії, або 3000 млн кВт·год. теплової енергії. Потенціал заміщення природного газу при цьому 1,0-1,3 млрд м³, вугілля – 1,5-2,2 млн т.

Дослідження процесу сумісного спалювання вугілля з RDF в котлоагрегаті ТЕС

Об'єктом дослідження було обрано котел ТПП-312. В Україні такі котлоагрегати встановлено на Вуглегірській та Ладизинській ТЕС. Котлоагрегат ТПП-312 виробництва Таганрозького котельного заводу, має П-подібну компоновку, топка котла відкритого типу (Кобзар & Халатов, 2017).

Котел оснащений 16-ма пальниками, що розташовані у два яруси. Геометричні розміри пальника ТПП-312 наведено на рис. 3.

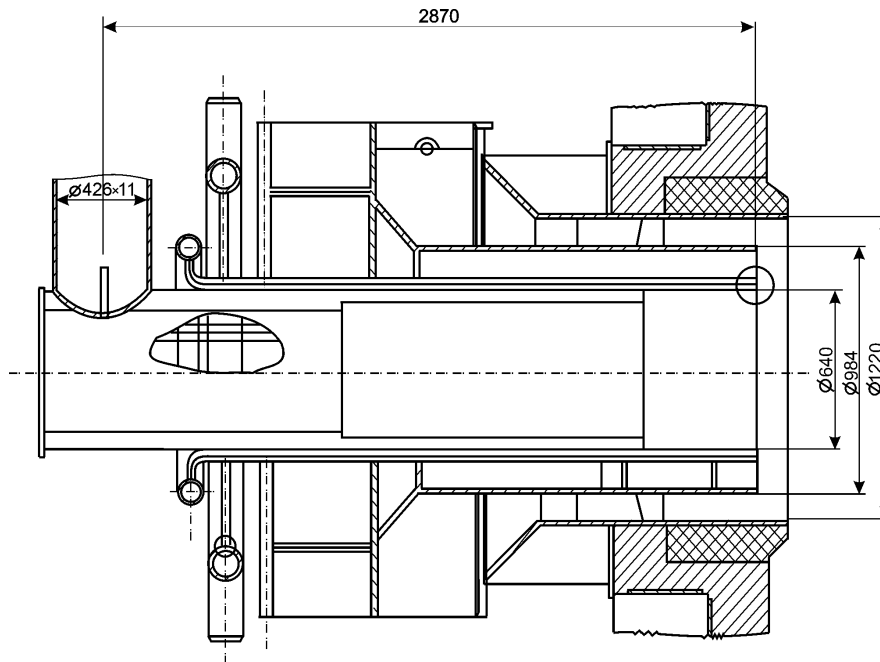


Рис. 3. Геометричні розміри пальника ТПП-312

Комп'ютерна модель котла ТПП 312. Використовуючи геометричні розміри котла ТПП 312 була розроблена його комп'ютерна модель. Радіаційні поверхні були представлені у вигляді поверхонь на границях розрахункової області. Граничні умови задавалися у вигляді постійної температури, яка була прийнята, як середня. Значення температур наведені в табл. 6. Такий принцип було застосований до фронтного, стельового та екрану поворотної камери.

Таблиця 6

Змінення температур по радіаційним поверхням

Поверхня	Температура, °C		
	вхідна	вихідна	середня
Нижня радіаційна частина	325	396	360,5
Середня радіаційна частина №1	396	410	403
Середня радіаційна частина №2	410	427	418,5
Верхня радіаційна частина	427	445	436

Ширмові пароперегрівники були представлені у вигляді піддомену з сумарним тепловим стоком еквівалентним сумі першої та другої ступені. Конвективні поверхні (КП), що знаходяться у конвективній шахті котла

вирішено було задавати у вигляді підобластей розрахункової області. Кожна така підобласть мала розмір відповідної теплообмінної поверхні, відповідну пористість, що дорівнювала не зайнятій трубами площі в напрямку потоку та відповідному об'ємному тепловому потоку. Значення прохідного перетину та теплового потоку при навантаженні турбіни 280 МВт_е для теплообмінних поверхонь конвективної шахти, наведені в табл. 7.

Таблиця 7

Значення прохідного перетину та теплового потоку

Поверхня	Прохідний перетин, м ²	Тепловий потік, кВт/м ³
КПП ВТ	7,42	2126,0
КПП НТ II ст.	26,78	370,59
КПП НТ I ст.	42,75	265,677
ВЕ	21,41	386,0

Побудована комп'ютерна модель стандартного котла ТПП-312 представлена на рис. 4.

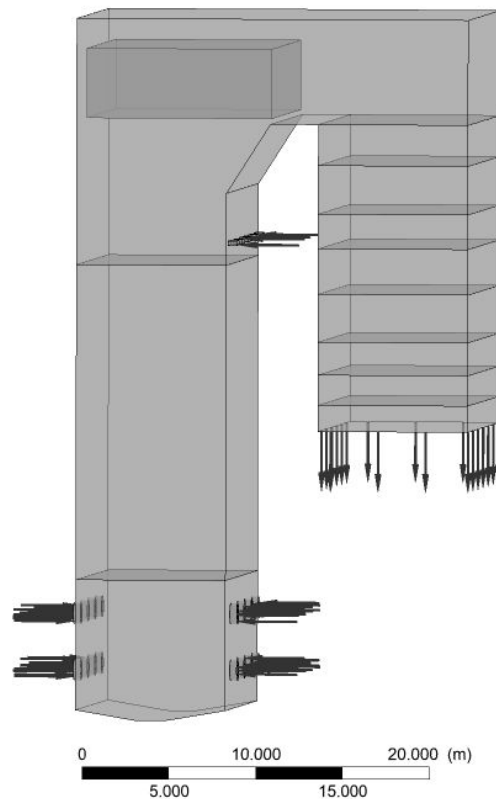


Рис. 4. Комп'ютерна модель стандартного котла ТПП-312

Характеристики палива. Осереднені характеристики суміші вугілля марок Г та ДГ, яке спалюється, наведені в табл. 8.

Таблиця 8

Фізико-хімічні характеристики суміші вугілля

Технічний аналіз, %						Елементний склад, %				
W^r , %	W^r , %	A^d , %	S^d , %	V^{daf} , %	Q_i^r , МДж/кг	S^{daf}	C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	O^{daf}
13,2	2,2	23,6	1,8	42,0	20,9	1,21	82,31	5,51	2,0	8,97

Для помелу вугілля використовуються кульові барабанні млини (КБМ). Зернова характеристика вугільного пилю, що спалюється в котлі ТПП-312 задовольняє наступному розподілу Розіна-Раммлера:

$$R_x = \exp(-(d/77,4)^{1,23}).$$

В табл. 9 наведено масові частки складових ТПВ, які використовувалися для створення RDF (Liedmann, at al., 2017). Отримане паливо по теплоті згорання відповідає 1-2 класу SRF згідно з EN 15359:2011 (табл. 2).

Таблиця 9

Фізико-хімічні характеристики складових ТПВ та отриманого RDF

Складова	Масова частка, %	Технічний аналіз на робочу масу (г)				Елементний склад на суху беззолну масу (daf), %			
		W^r , %	A^r , %	V^r , %	Q_i^r , МДж/кг	C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	O^{daf}
Поліетилен	22,0	1,05	1,04	97,91	37,73	78,93	12,03	0,07	8,98
Пластмаса	24,0	0,95	5,09	93,96	37,80	80,42	12,86	0,22	6,50
Папір та картон	19,0	25,68	10,68	53,19	10,78	45,72	6,74	0,24	47,30
Текстиль	8,0	6,26	10,99	73,18	20,61	64,96	7,47	1,39	26,18
Подрібнені волокна поліетилену та пластмаси	27,0	28,48	17,51	42,55	10,22	60,48	8,30	1,47	29,75
RDF	100,0	13,53	9,09	71,54	23,83	66,88	9,85	0,62	22,65

Приймалося, що тверде паливо має наступний розподіл діаметрів частинок по фракціям: 50; 100; 150; 200 мкм, а кожна фракція частинок містить 25 % маси.

Математична модель. Осереднені за числом Рейнольдса рівняння Нав'є-Стокса вирішувалися для в'язкого теплопровідного газу в стаціонарній постановці з використанням в якості моделі теплообміну повного рівняння збереження енергії. Для замкнення рівняння руху використовувалася RNG k-ε модель турбулентності. Густина суміші газів розраховувалася за допомогою закону ідеального газу для суміші газів.

Вплив гравітації враховувався шляхом завдання сили земного тяжіння в напрямку протилежному напрямленню осі Z. Радіаційний теплообмін моделювався за допомогою моделі Дискретного Переносу (Discrete Transfer).

Дослідження було виконана за допомогою пакета прикладних програм Ansys CFX.

Модель горіння твердого палива. В дослідженні використовувалася вбудована в пакет прикладних програм модель горіння вугілля. Для моделювання горіння частинок твердого палива використовувалася вбудована в пакет CFX стандартна модель. Згідно цієї моделі транспорт частинок моделювався шляхом розв'язання рівняння руху частинки в постановці Лагранжа. Зміну розміру діаметру частинки твердого палива прийнято пропорційною зміні її зовнішньої поверхні чи масі (у разі, коли частинка вважається непроникною для газів реагентів). Для врахування особливостей кожної складової твердого палива, а саме вугілля та RDF, були створені дві тверді речовини: Coal та RDF.

Згідно моделі горіння твердого палива, при потраплянні частинки твердого палива в котел з нею відбуваються наступні процеси: сушка; термічна деструкція; горіння вуглецю.

Термічна деструкція вугілля. Процес термічної деструкції вугілля марок Г та ДГ починається після досягнення температури виходу летких $T_{\text{devol}} = 700$ К. Передбачалося, що вугілля під час термічної деструкції розкладається на коксовий залишок (CHAR) та леткі (Fuel Gas):

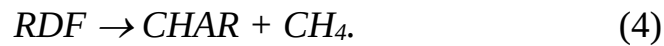


Зміна маси частинки залежить від залишку летких у матеріалі та задовольняє закону Ареніуса з властивими конкретному матеріалу значеннями температури активації T_{vol} та передекспонентним фактором k_0 :

$$k_{coal_vol} = k_0 \exp \left(\frac{T_{vol}}{T_p} \right). \quad (3)$$

Кінетичні параметри у виразі (3): $T_{vol} = 8852$ К та $k_0 = 1,34 \times 10^5$ 1/с.

Термічна деструкція RDF. В дослідженні було прийнято, що процес термічної деструкції твердого палива починається після досягнення температури виходу летких $T_{devol} = 550$ К. Передбачалося, що RDF під час термічної деструкції розкладається на коксовий залишок (*CHAR*) та леткі у вигляді метану:



Зміна маси частинки залежить від матеріалу твердого палива, залишку летких у матеріалі та задовольняє закону Ареніуса з властивими конкретному матеріалу значеннями енергії активації E_{vol} та передекспонентним фактором k_{vol0} :

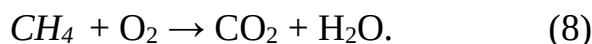
$$k_{vol} = k_{vol0} \exp \left(- \frac{E_{vol}}{RT_p} \right). \quad (5)$$

Кінетичні параметри у виразі (5) були взяті відповідно до рекомендацій роботи Liedmann et al. (2017), де для RDF відповідного складу (табл. 7) були запропоновані наступні значення $E_{vol} = 88,9$ кДж/моль та $k_{vol0} = 2,99 \times 10^6$ 1/с.

Горіння коксового залишку. Зважаючи на те, що при горінні *RDF* утворюється незначна кількість коксового залишку, для зменшення витрат машинного часу, коксовий вуглець від *RDF* окремо не виділявся. Утворена маса коксового залишку від *RDF* добавлялася до маси коксового залишку, що утворився при термічній деструкції вугілля. Для моделювання гетерогенного горіння коксового залишку використовувалася стандартна дифузійно-кінетична модель горіння вуглецю. Прийнято, що горіння відбувається на зовнішній поверхні за сумарною (брутто) реакцією:



Горіння летких. Після виходу летких їх горіння відбувається у гомогенному середовищі. Приймається, що леткі від вугілля мають властивості метану. Горіння відбувається за одностадійним механізмом:



Середня швидкість хімічної реакції компоненти визначалася як мінімальне значення швидкості реакції визначене за моделлю дисипації вихорів (R_{EDC}):

$$R_{EDC} = A_{EDC} \frac{\varepsilon}{k} \rho \cdot \min \left\{ \bar{Y}_{fuel}, \frac{\bar{Y}_{ox}}{s}, B_{EDC} \frac{1}{1+s} \bar{Y}_{prod} \right\}, \quad (9)$$

де $\bar{Y}_{fuel}$, $\bar{Y}_{ox}$ – масова концентрація палива та окислювача; s – стехіометричне відношення реакції паливо/окислювач; A_{EDC} и B_{EDC} константи моделі.

В моделі дисипації вихорів використовувалися стандартні значення констант $A_{EDC} = 4$ и $B_{EDC} = 0,5$.

Модель утворення оксидів азоту. Для розрахунку емісії оксидів азоту в атмосферу при спалюванні вугілля використовувалися термічний, prompt та паливний механізми утворення оксидів азоту.

Результати розрахунків

Вплив на теплову ефективність котла. Вплив заміни 10 % вугілля RDF на температурне поле в показано на рис. 5-7. Аналіз температурного поля показав, що заміна 10 % в тепловому балансі котла вугілля на RDF призводить до підвищення значення максимальної температури в топці котла, що передусім пов'язано з вищою реакційною здатністю RDF порівняно з вугіллям. Аналіз теплового балансу розрахункової області виявив, що в результаті сумісного спалювання зменшується на 4 % сумарне виділення теплоти, що можна трактувати як збільшення хімічного та механічного недопалу котла в цілому. Підвищення температури в нижній частині топки покращує умови для

вилучення більшої кількості жужелю у вигляді рідкого шлаку, що має зменшити навантаження на електрофільтр.

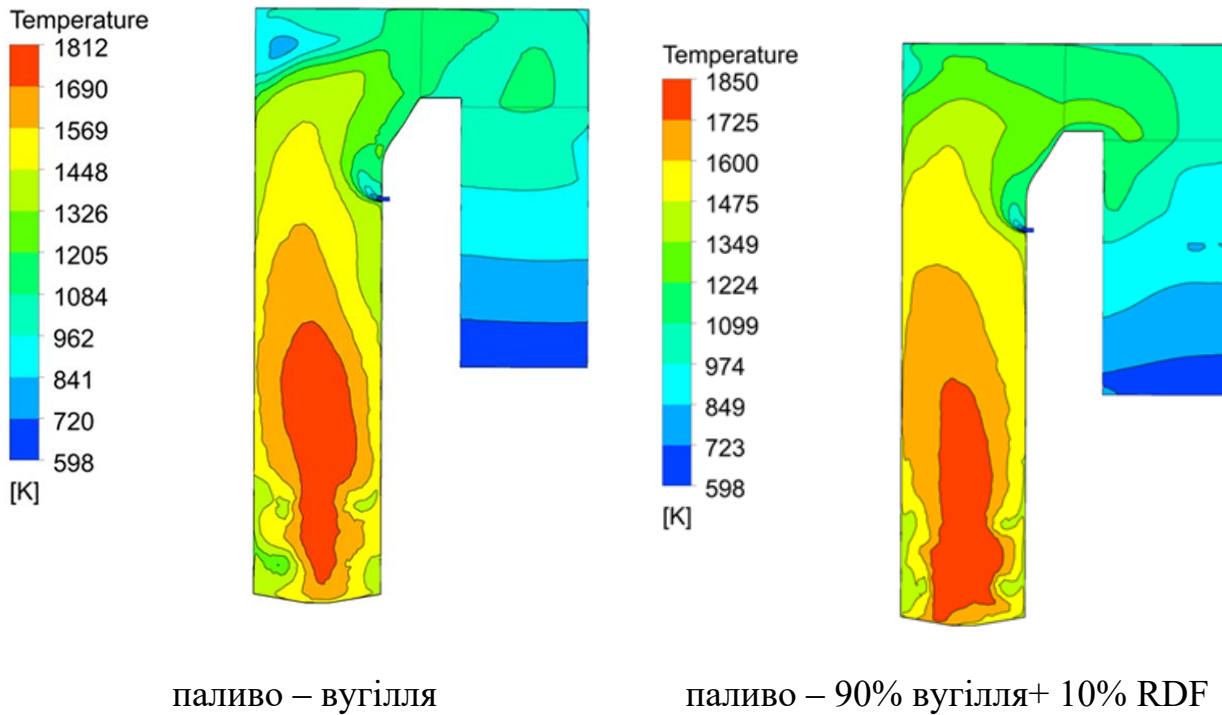


Рис. 5. Розподіл температури на осі котла

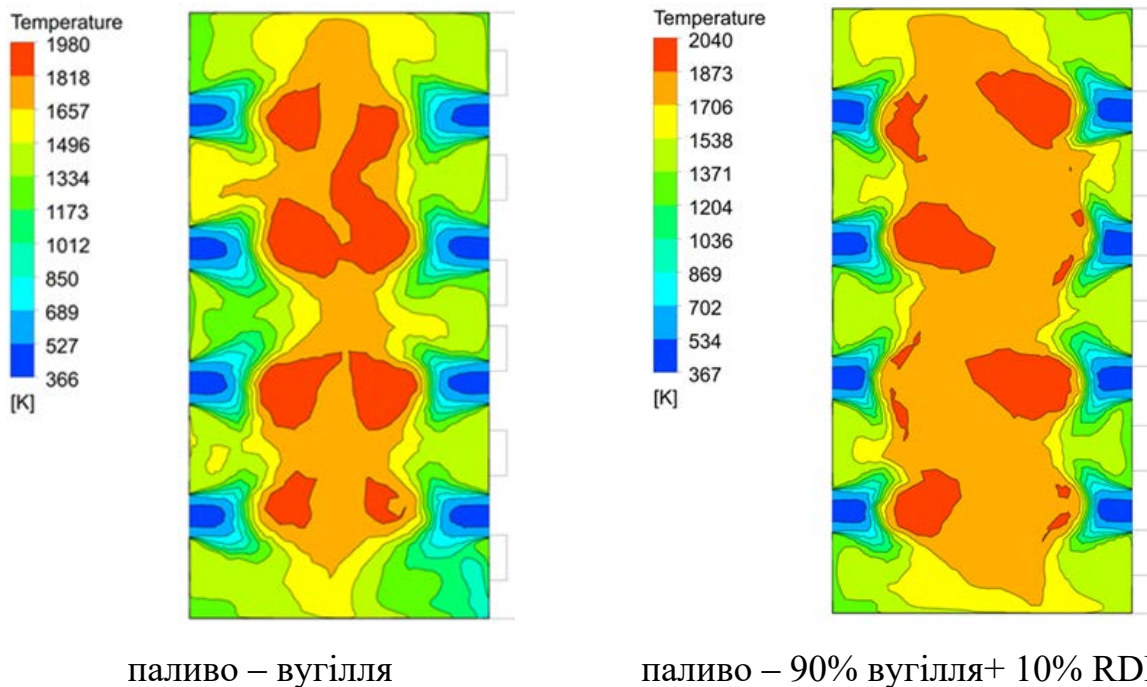
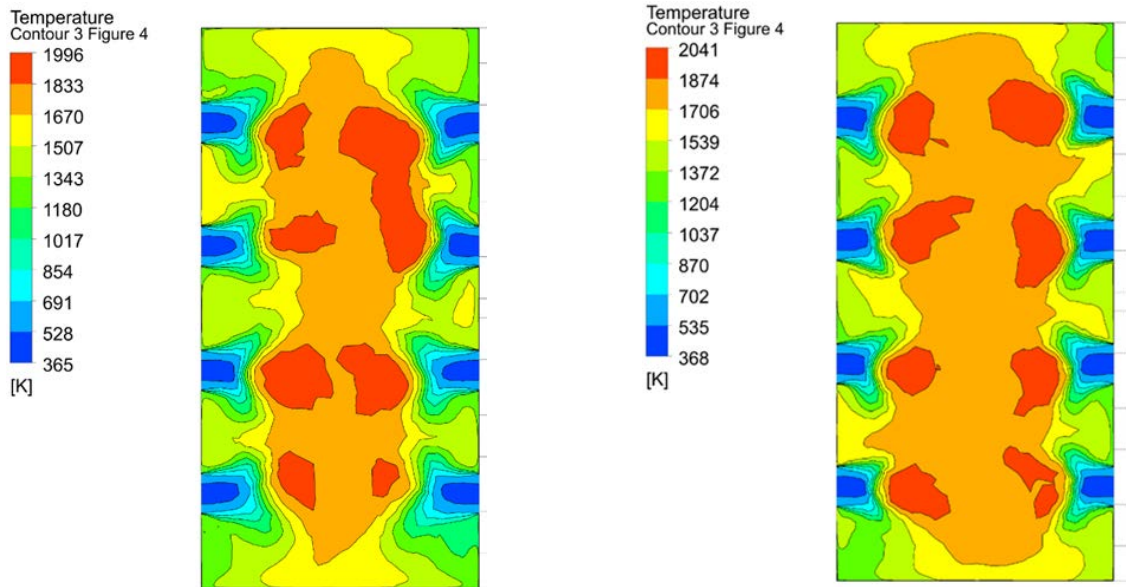


Рис. 6. Розподіл температури по осях пальників першого ярусу



паливо – вугілля

паливо – 90% вугілля+ 10% RDF

Рис. 7. Розподіл температури по осях пальників першого ярусу

Умови для знешкодження шкідливих речовин. При залучення RDF як палива для знешкодження шкідливих речовин (діоксинів та фуранів), що утворюються при спалюванні компонентів ТПВ, необхідно забезпечити тривалість перебування продуктів згоряння в зоні з температурою не нижче 850 °C (1123 K) як мінімум 2 с. (Neuwahl et al., 2019). Результати розрахунку температурного поля (дивись рис. 8а) та данні з динаміки руху частинок RDF (рис. 8б) дозволяють визначити середню тривалість знаходження в високотемпературній зоні частинок та продуктів згоряння ТПВ, вона становить 5-6 с. Таку тривалість можна визначити як прийнятну для знешкодження шкідливих речовин.

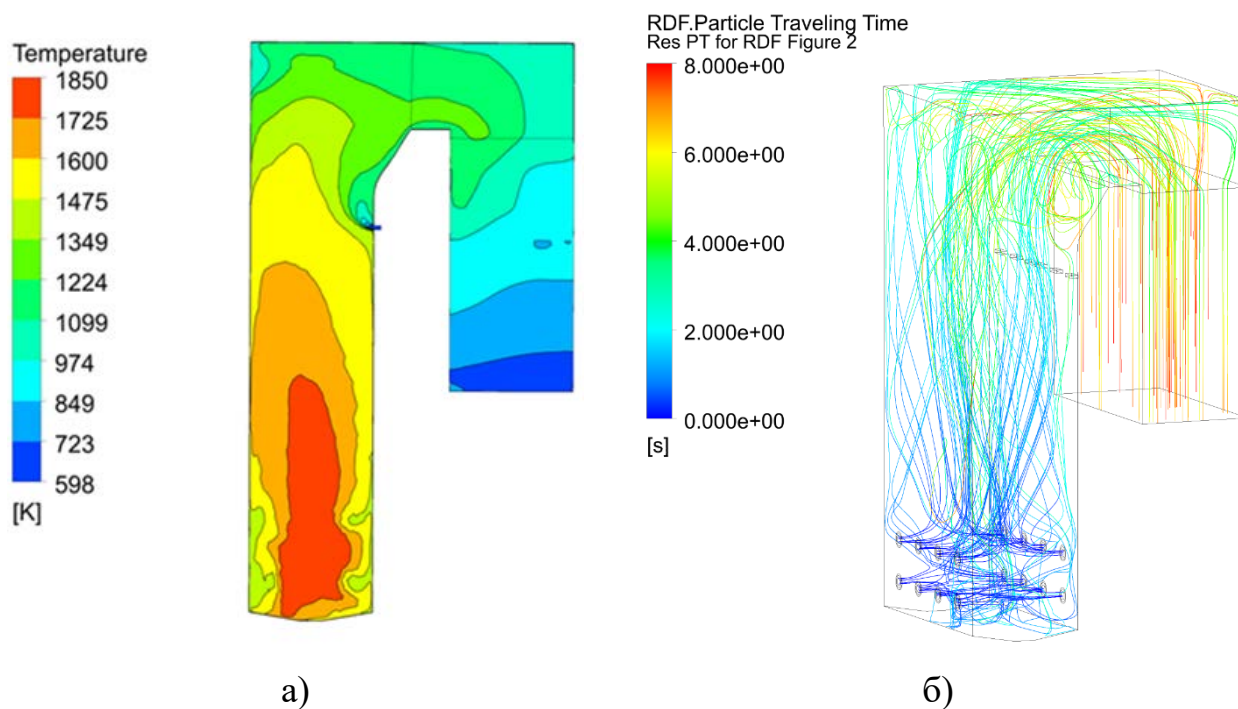


Рис. 8. Оцінка умов для знешкодження шкідливих речовин:

а) температурне поле; б) динаміка руху частинок RDF

Вплив на утворення оксидів азоту. Результати розрахунку концентрації оксиду азоту показали зменшення емісії оксидів азоту. Цей результат частково можна пояснити тим, що внаслідок заміни частини вугілля на RDF зменшується утворення оксидів азоту за паливним механізмом. На нашу думку, основний вплив на зменшення утворення оксидів азоту вносить утворена, внаслідок спалювання високореакційного палива, зона з відновлювальним середовищем, яка знаходиться в області з високою температурою. Наявність зони з відновлювальним середовищем потребує проведення додаткових досліджень по визначенню ймовірності виникнення високотемпературної газової корозії.

Висновки

1. Щорічні обсяги утворення ТПВ в Україні за останні роки сягають 11,5-12,5 млн т, з яких 11-12 млн т вивозять і складають на полігонах та сміттєзвалищах. Таке поводження з відходами призводить до щорічної втрати значної кількості енергоресурсів та цінних матеріалів, погіршення екологічної

ситуації.

2. Показано, що основна тенденція в управлінні ТПВ має базуватись на комплексному підході – окремому збиранні, сортуванні, компостуванні/анаеробному зброджуванні фракцій ТПВ, що біологічно розкладаються, та виробництві RDF/SRF з фракцій ТПВ, що залишилися. Перевагою цього підходу є перетворення відходів на енергетичну товарну продукцію. Виробництво та використання в енергетиці RDF/SRF здатне частково замінити дефіцитні в Україні органічні палива при виробництві електричної та теплової енергії з дотриманням вимог ЄС до питань управління відходами.

3. Виконано аналіз та визначено особливості, обсяги, морфологічний та елементний склад потенційного RDF в розрізі міст та областей України тощо. Осереднена частка складових ТПВ, яку можна вилучити для виробництва RDF в Україні, складає 28 %. Показано, що потенціал щорічного виробництва RDF в Україні складає 2,5-3,0 млн т. Визначено, що діапазон теплоти згорання RDF, виготовленого з ТПВ України, складає 13-16 МДж/кг, що відповідає 3 та 4 класам якості згідно з ДСТУ EN 15359:2018. При залученні цих палив в енергетику можна отримати щорічно близько 2000 млн кВт·год. теплової та електричної енергії, або 3000 млн кВт·год. теплової енергії. Потенціал заміщення природного газу при цьому 1,0-1,3 млрд м³, вугілля – 1,5-2,2 млн т.

4. Вивчено можливість сумісного спалювання RDF з вугіллям в котлі ТПП-312. Встановлено, що при використанні RDF з теплотворною здатністю не нижче ніж вугілля, заміна 10 % вугілля на RDF призводить до зменшення теплового ККД котла та зменшення утворення оксидів азоту. Подача RDF у пальники разом з вугіллям забезпечує необхідну тривалість перебування продуктів згорання компонентів ТПВ в зоні з температурою необхідною для знешкодження шкідливих речовин.

Список літератури

- Boavida, D., Abelha, P., Gulyurtlu, I., & Cabrita, I. (2003). Co-combustion of coal and nonrecyclable paper and plastic waste in a fluidized bed reactor. *Fuel*, (82), 1931-1938. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00151-0](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00151-0).
- Budiardjo, M. A., Yohana, E., Ramadan, B. S., Puspita, A. S., Adhana, S. N., & Rizkiana, J. N. (2022). Study of Potential Refuse Derived Fuels as Renewable Alternative Energy from a Jatibarang Landfill. *Polish Journal of Environmental Studies*. <https://doi.org/10.15244/pjoes/145614>.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development Series*. Washington: DC: World Bank. Retrieved from <https://elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/978-1-4648-1329-0>.
- Komilis, D., Evangelou, A., Giannakis, G., & Lymperis, C. (2012). Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. *Waste Management*, (32), 372-381. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.034>.
- Liedmann, B., Arnold, W., Krüger, B., Becker, A., Krusch, S., Wirtz, S., & Scherer, V. (2017). An approach to model the thermal conversion and flight behaviour of Refuse Derived Fuel, *Fuel*, 200, 252-271. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.069>.
- Lin, H., & Ma, X. (2012). Simulation of co-incineration of sewage sludge with municipal solid waste in a grate furnace incinerator. *Waste Management*, (32), 561-567. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.032>.
- Mutz, D., Hengevoss, D., Hugl, C., & Gross, T. (2017). *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management. A Guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries*. Eschborn: GIZ GmbH. Retrieved from https://www.giz.de/en/downloads/GIZ_WasteToEnergy_Guidelines_2017.pdf
- Neuwahl, F., Cusano, G., Benavides, J. G., Holbrook, S. & Roudier, S. (2019). *Best Available Techniques (BAT). Reference Document for Waste Incineration*.

- Luxembourg: Publications Office of the European Union. Retrieved from <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC118637>.
- Rada, E. C., Cioca, L.-I., & Lonescu, G. (2017). *Energy recovery from Municipal Solid Waste in EU: proposals to assess the management performance under a circular economy perspective*. MATEC Web of Conferences 121, 05006. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201712105006>.
- Saveyn, H., Eder, P., Ramsay, M., Thonier, G., Warren, K., & Hestin, M. (2016). Towards a better exploitation of the technical potential of waste-to-energy. EUR 28230 EN. Retrieved from <https://data.europa.eu/doi/10.2791/870953>.
- Themelis, N., Barriga, M., Estevez, P., & Velasco, M. (2013). *Guidebook for the Application of Waste to Energy Technologies in Latin America and the Caribbean*. WTE Guidebook, EEC/IDB, Earth Engineering Center, Columbia University. Retrieved from <https://gwcouncil.org/wte-guidebook-for-latin-america-and-the-caribbean/>.
- Гапонич, Л. С., Топал, О. І., Голенко, І. Л., & Кобзар, С. Г. (2022). Оцінка потенціалу виробництва RDF на основі визначених технологічних і морфологічних властивостей твердих побутових відходів України. *Наукові праці НУХТ*, 28 (3), 44-59. doi: 10.24263/2225-2924-2022-28-3-6
- Гелетуца, Г. Г., Жовмір, М. М., Олійник, Є. М., & Радченко, С. В. (2011). Біомаса як паливна сировина. *Пром. теплотехника*, (33), 76-84. Retrieved from: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/60379>.
- Кобзар, С. Г., & Халатов, А. А. (2017). Дослідження ефективності зниження оксидів азоту при застосуванні вдосконаленого методу триступеневого спалювання вугілля з використанням вугілля в якості палива допалення. *Пром. теплотехника*, 39 (5), 91-96. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.15>
- Кобзар, С. Г., Топал, О. І., Гапонич, Л. С., & Голенко, І. Л. (2020). Моделювання процесу сумісного спалювання природного газу з паливами із твердих побутових відходів. *Електронне моделювання*, (42). 74-92. <https://doi.org/10.15407/emodel.42.06.072>.

СЕЙСМІЧНИЙ І ГЕОАКУСТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ АВАРІЙ НА ТЕХНОГЕННО НАВАНТАЖЕНИХ ТЕРИТОРІЯХ

Назаревич Л.Є., Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, ВСКР,
к. геол. н., науковий співробітник, Україна, м. Львів

Назаревич А.В., Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна
НАН України, к. ф.-м. н., старший науковий співробітник,
Україна, м. Львів

Abstract

With a view to prevent eco-dangerous processes caused by seismotectonics, seismic monitoring is carried out in western Ukraine to localize local earthquakes and geoacoustic studies for time-spatial monitoring of the stress-strained state of the earth's crust are carried out also. Thanks to this, the seismicity of western Ukraine was studied in detail. It has been established that earthquakes of various strengths and nature occur here: natural (tectonic), technogenically provoked (induced) and technogenic. Seismic monitoring revealed seismogenic zones and structures controlled by the regional tectonic process. Geoacoustic monitoring revealed, in particular, a number of precursors of local tectonic earthquakes.

It is also briefly describes the methods of specifying the characteristics of seismic risk for the territories of the Carpathian region of Ukraine using the methods of analysis the macroseismic fields of local earthquakes and the methods of determining the directions of ruptures in their foci and the methods of evaluation the spectral characteristics of the seismic radiation of the foci of these earthquakes by the parameter cripex .

Вступ

Руйнівні землетруси на Землі є одними з найнебезпечніших явищ в системі природних катастроф за людськими, економічними, екологічними та іншими наслідками. В останні роки на земній кулі відбулося немало катастрофічних землетрусів, які спричиняли руйнування будівель, людські жертви, зміни ландшафту, екологічні загрози для біорізноманіття і природи в цілому. Такі наслідки притаманні не тільки сильним, але і слабшим землетрусам (хоч і меншою мірою), зокрема, через те, що вони відбуваються в районах, де є техногенне навантаження, і при них тією чи іншою мірою порушується цілісність геологічного середовища.

Розвиток господарського комплексу України відбувається в умовах нарощування техногенного навантаження на довкілля, наслідком чого є збільшення кількості кризових явищ в екологічних системах, зокрема, активізація екзогенних геологічних процесів (ЕГП). Зважаючи на подальше господарське освоєння територій, в балансі під житлове та промислове будівництво збільшується частка малопридатних, порушених земель, ділянок з розвитком небезпечних ЕГП. Мінливість інженерно-геологічних умов у межах території України пов'язана з особливостями структурно-геологічної будови приповерхневих породних та ґрунтових товщ, різними зонально-кліматичними, геоморфологічними, гідрогеологічними та сейсмічними умовами. Разом з техногенними чинниками, це визначає зони поширення різних ЕГП і небезпечних явищ, а також пов'язаних з ними змін довкілля. Екологічна небезпека значно зростає у місцях розташування об'єктів, що створюють сприятливі умови для активізації небезпечних процесів та виникнення надзвичайних ситуацій техногенного походження. Як приклад, можна назвати карстові провали на рудних полях у Стебнику у 2017 і 2020 рр., або найновіше (осінь 2022 р.) руйнування внаслідок зсуву автомобільного полотна біля села Нижня Яблунька Львівської області (рис. 1). Це останнє руйнування нагадує

наслідки землетрусу, але у цьому районі не було інструментально зафіксовано жодної сейсмічної події.

Подібну картину руйнування дорожнього полотна, але із значно меншою величиною тріщин, можна було спостерігати після згаданого провального землетрусу 17.09.2017 р. з М-3 біля Стебника (Назаревич Л. та Назаревич А., 2018) на дорозі Трускавець-Дрогобич.

В загальному, зростання такого роду екологічних загроз підтверджується результатами різнопланових режимних спостережень, які фіксують виразний статистичний зв'язок між динамікою росту господарського потенціалу та динамікою поширенням небезпечних ЕГП у відповідних регіонах.



Рис. 1. Карстовий провал на рудних полях у Стебнику у 2017 р. (зліва) і зсувне руйнування автомобільного полотна поблизу с. Нижня Яблунька Львівської області у 2022 р. (справа)

Сейсмічні події природного і техногенного характеру на територіях, які раніше не були схильні до таких загроз, стали причиною підвищеної уваги вчених до цієї проблеми. Характерною для таких територій є наявність житлової та промислової забудови, підприємств з видобування корисних копалин, численних нафто- та газопроводів. Зростаюча кількість як сильних, так і помірних землетрусів у місцях інтенсивного видобування вуглеводнів у різних країнах світу (наприклад, Газлійські землетруси 1976 і 1984 рр., Нефтегорський 1995 р., рої землетрусів на родовищі Гронінген у Голландії, на нафтових полях штатів Оклахома, на території Східного Передкавказзя, Південного Передуралля, Українського Передкарпаття та ін.) привернули увагу

вчених до проблеми вивчення впливу змін напружено-деформованого стану масивів гірських порід унаслідок видобування вуглеводнів на прояви природної та наведеної сейсмічності (De Pater., Baisch, 2011; Keranen, Savage, Aber, and Cochran, 2013; Назаревич Л., Ніщименко, Назаревич А., 2017). При дослідженнях такого роду дуже важливо також враховувати тектонічну обстановку в регіоні, напрямок стискаючих/розтягуючих напружень, кінематику розломів, переважний напрямок тріщин і сколів тощо.

Проблематика прогнозування сейсмоекологічних небезпек тісно пов'язана з проблемою прогнозу землетрусів. Проблема прогнозу землетрусів є дуже актуальною, але поки що її не вирішено в повному обсязі. На сьогодні в Україні на основі історичних та інструментальних сейсмологічних та комплексу геолого-геофізичних даних створено карти загального сейсмічного районування (ЗСР), які поділяють територію країни на ряд зон з певною ймовірністю виникнення землетрусів різної сили/бальності за статистичними та геолого-тектонічними даними. Ці карти використовуються для довгострокового соціально-економічного планування, раціонального землекористування, прийняття адміністративних і технічних рішень щодо забезпечення надійної експлуатації існуючих промислових споруд і об'єктів та розміщення нових (ГЕС, АЕС, трубопроводів тощо). Приклад такої карти показаний на рис. 2, це карта ЗСР-А в редакції 2004 р., вона входить до складу державних будівельних норм (ДБН).

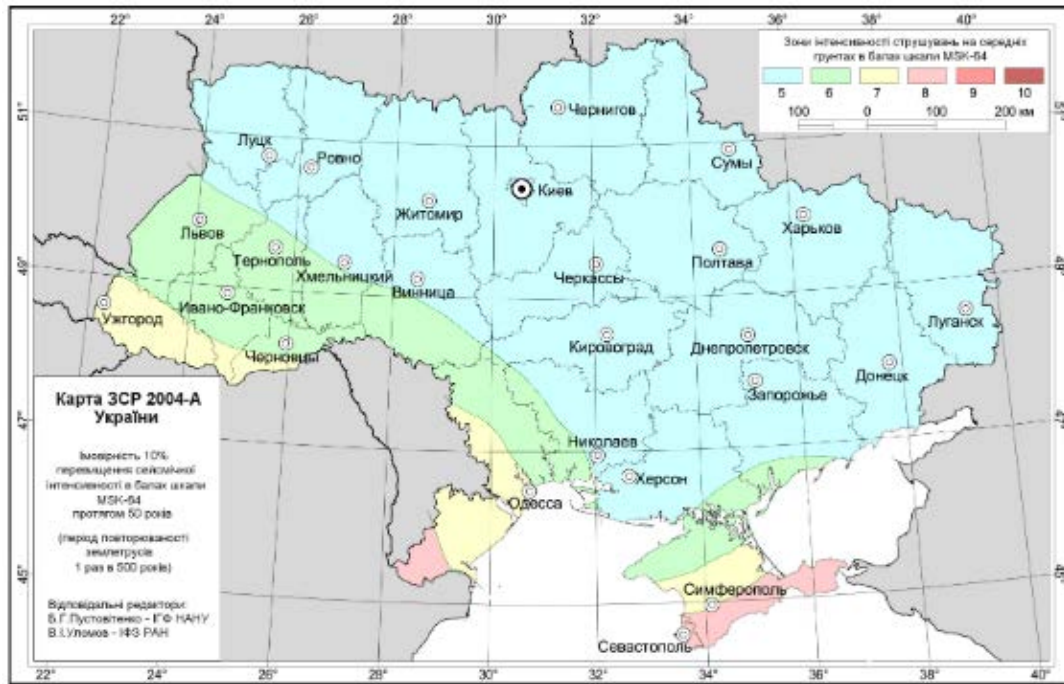


Рис. 2. Карта загального сейсмічного районування ЗСР-2004-А території України для періоду повторюваності землетрусів 1 раз в 500 років (під ред. Б. Пустовітенко, В. Уломова)

Виникає багато питань, а як же захистити від сейсмічних небезпек як природного, так і наведеного характеру існуючі старі будівлі, які були побудовані або без врахування цих небезпек, або з урахуванням того, що територія за старими картами зонування належала до асейсмічних зон і де є території з розміщенням потенційно-небезпечних виробництв. Для цього, крім вказаних вище статистичних використовуються також більш детермінізовані геофізичні підходи. Зокрема, вчені дослідили процеси підготовки землетрусів у різних районах світу і виявили певні аномальні зміни у різних геофізичних полях та параметрах – так звані провісники землетрусів у вигляді форшоків (слабких землетрусів перед сильнішими), деформацій і нахилів земної поверхні, зміни швидкостей об'ємних пружних хвиль, геомагнітного та геоелектричних полів, складу і режиму підземних вод, стану і властивостей геологічного середовища, поведінки тварин та ін. Напрацьовано ряд методик для детермінованого прогнозу сейсмічних подій на певній території, деякі прогнози були успішними, вдавалося врятувати багато людських життів. Але все-таки ця задача ще не розв'язана в повному обсязі, вчені продовжують свої дослідження.

Мета досліджень

Зважаючи на викладене вище, проблема прогнозу сейсмічних подій і оцінок їх впливів на окремих ділянках та територіях є вкрай важливою задачею як теоретичного, так і прикладного значення. Вирішення цієї задачі є актуальним ще й тому, що Європарламент ухвалив рішення щодо подальшого розвитку атомної генерації та добування природного газу. Природний газ та атом було визнано "чистою" енергією, отже, в найближчі десятиліття ці енергоресурси будуть "зеленими". Україна через запаси природного газу у близько 1,3 трлн куб м зможе стати не тільки самодостатньою в забезпеченні цим ресурсом, а й потенційним експортером природного газу, а це потребує пошукового буріння, збільшення кількості родовищ. І тут безпека районів розміщення атомних станцій і нафтогазових промислів, трубопроводів і підземних газових сховищ (ці останні в основному розміщені на заході України) є надважливою.

Методики досліджень

Для розв'язання цієї проблеми виникає необхідність у залученні нових методик, підходів і у комплексному підході до аналізу всіх наявних геолого-геофізичних, гідрологічних, тектонічних, сейсмічних, геодезичних даних.

Нами для оцінки ризиків від впливів місцевих землетрусів і моніторингу сейсмічної безпеки зон розташування критичної інфраструктури використовуються, зокрема, результати двох методів – сейсмологічного моніторингу і геоакустичного методу (Назаревич Л. та Назаревич А., 2020, 2022).

Окрім невеликої кількості сильніших місцевих землетрусів з магнітудою M 3-4 в останні роки на території України фіксується значна кількість слабших землетрусів з магнітудою M від 1.0 до 2.9. Також слід враховувати вплив на південні області України досить частих (раз на 20-30-50 років) сильних землетрусів зони Вранча в Румунії. Назагал до 40 % території України можуть

бути охоплені безпосереднім впливом небезпечних сейсмічних подій і 70 % з них – спільним впливом землетрусів із підтопленням, зсувами, просадками та іншими інженерно-геологічними процесами (Немчинов та ін., 2013), які негативно впливають на стійкість споруд. Зони з прогнозованою інтенсивністю сейсмічних струшувань I_0 6-8 балів займають близько 20 % території України, це приблизно 120 тис км², на них проживає понад 10 млн. людей (Немчинов та ін., 2013). Ще один вид землетрусів, які відбуваються на території України – техногенні або техногенно спровоковані (індуковані), вони викликані людською діяльністю розробкою корисних копалин, впливом водосховищ ГЕС тощо (Guide, 2010; Vilarrasa et al., 2022; Dvory, Yang & Dunham, 2022; Назаревич Л та Назаревич А., 2018).

Для вивчення сейсмічності Карпатського регіону України створена і розвивається Карпатська сейсмічна мережа (<http://seism.lviv.ua/>). Сейсмічний моніторинг розпочався у нашому регіоні у 60-х роках минулого століття. Зараз мережа нараховує 20 сейсмічних і чотири геофізичні станції, вони розташовані в Закарпатті, Карпатах і Передкарпатті (рис. 3). На них проводяться режимні сейсмічні і геофізичні спостереження. Зараз у Карпатському регіоні спостереження за сейсмічним режимом ведуться цифровими автоматичними станціями (Вербицький С. та Вербицький Ю., 2011), нами застосовуються нові спеціально розроблені методики уточненого (з точністю до ± 1 км і краще) визначення координат і глибин вогнищ землетрусів з урахування особливостей швидкісної будови літосфери регіону (Назаревич Л. та Назаревич А., 2002а, 2004; Kováčiková et al., 2016). Ці нові підходи і методики визначення координат і глибин вогнищ місцевих землетрусів, їх енергетичних, спектральних та інших характеристик, а також співставлення визначеної глибинно-просторової локалізації цих вогнищ з тектонікою та рель'єфом дозволяють надійно дешифрувати тектонічно активні структури літосфери регіону, визначати їх сейсмічний потенціал і таким чином уточнювати сейсмоекологічні ризики (Назаревич Л. та Назаревич А., 2020, 2022).

Carpathian Seismological Network of Ukraine

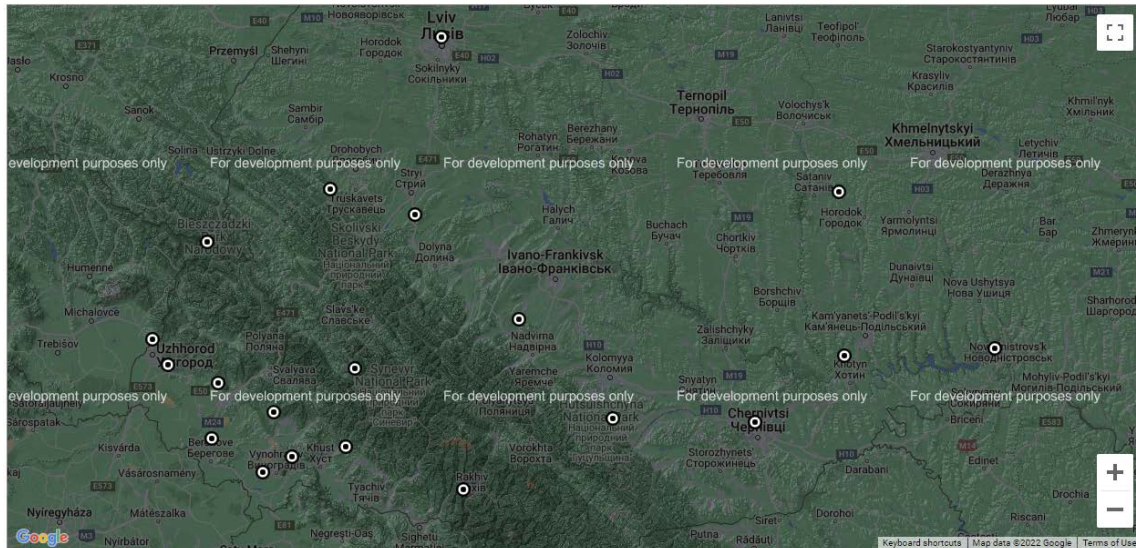


Рис. 3. Карта розташування сейсмічних і геофізичних станцій Карпатської сейсмологічної мережі – режим доступу <http://seism.lviv.ua/>

Для поглибленого аналізу особливостей сеймотектоніки конкретних сейсмогенних зон регіону досліджуються, зокрема, напрямки спорювання розривів у вогнищах сильніших місцевих землетрусів (Назаревич Л. та Назаревич А., 2018), це дає важливу інформацію про просторове простягання та тектонофізичні особливості відповідних сейсмогенних розривних структур.

Також важливу для уточнення оцінок сейсмічної небезпеки конкретних територій регіону інформацію вдається отримати шляхом детального просторового аналізу макросейсмічних полів відчутних місцевих землетрусів (Назаревич Л. та Назаревич А., 2008). Тут оцінюється і вплив особливостей сейсмічного випромінювання конкретних вогнищ на силу і характер струшувань у різних точках земної поверхні навколо них, і вплив на це особливостей поширення сейсмічних хвиль у різних шарах земної кори і в різних азимутах, і вплив характеристик осадових товщ та інших факторів.

Інший напрямок розвитку методик сейсмологічних досліджень, спрямованих на уточнення характеристик сейсмічної небезпеки – дослідження особливостей спектрального складу сейсмічного випромінювання землетрусів конкретних сейсмогенних зон. Нами розвинуто використання такого

інтегрального параметра оцінки цих особливостей, як кріпекс, саме стосовно вивчення характеристик місцевої сейсмічності Карпатського регіону (Назаревич Л., Назаревич А. та Баштевич Н., 2004; Назаревич Л. та Назаревич А., 2007, 2018). Досліджено зв'язки цього індикативного параметра з характеристиками спектрів сейсмічних хвиль від землетрусів з різних районів регіону і з особливостями геомеханічного режиму земної кори цих районів. Це дало можливість помітно уточнити і просторово деталізувати характеристики очікуваних сейсмічних впливів для різних територій регіону порівняно з загальними оцінками за даними карт загального сейсмічного районування. Дані дослідження зараз перебувають у стані подальшого постійного розвитку, зокрема, у напрямку розробки і застосування сучасних комп'ютерних та інформаційних технологій.

Результати досліджень

Сейсмічність Карпатського регіону України. Багаторічні (впродовж більш як 60 років) інструментальні спостереження за сейсмічним режимом території заходу України показали, що територія поділяється на певні сейсмоактивні зони, які контролюються регіональним тектонічним процесом, а ці зони, в свою чергу, підпорядковуються глобальному тектонічному процесу в Альпійсько-Карпатсько-Середземноморському сейсмоактивному поясі. За даними багаторічних досліджень вогнища землетрусів Карпатського регіону локалізуються в певних геолого-тектонічних структурах, мають свої характерні механізми, які визначаються напруженим станом геологічного середовища, спричиненим як природними геодинамічними процесами в регіоні, так і результатом людської діяльності, або кумулятивним ефектом від цих двох факторів (Kováčiková et al., 2016; Назаревич Л. та Назаревич А., 2018).

Якщо розглядати сейсмічний режим окремих територій Карпатського регіону України, то тут можна виділити три різні зони, відмінні за кількістю

землетрусів, їх магнітудою і глибиною залягання вогнищ – це Закарпаття, Складчасті Карпати і Передкарпаття (рис. 4).

Найбільшу кількість землетрусів, у т.ч. з магнітудами M 3-4 зафіксовано в Закарпатті, вогнища їх залягають неглибоко (в основному на глибинах 3-6-10 км, значно рідше на 12-20 км), основна сейсмогенеруюча структура тут – Закарпатський глибинний розлом. У Складчастих Карпатах зафіксовано порівняно небагато землетрусів з M 1-2,2, вогнища містяться частково у приповерхневих насувах і складках, частково – на більших глибинах, у піднасувних структурах фундаменту. І третя сейсмоактивна зона – Передкарпаття, де присутні здебільшого відносно слабкі землетруси M -1-2,8 з малими глибинами вогнищ (H до 6 км). У Передкарпатті, крім спорадичної сейсмічності краю Східноєвропейської платформи (північніше лінії Шегині – Івано-Франківськ – Чернівці) з рядом відчутних (у т.ч. історичних – за період з 1650-х років) неглибоких землетрусів з більшими магнітудами чітко виділяється кілька сейсмогенних зон, територіально пов'язаних з зонами видобування вуглеводнів (Борислав, Долина, Надвірна), землетруси в основному концентруються тут вище або нижче від зон видобування корисних копалин (Назаревич Л. та Назаревич А., 2018). Але через відносно малу глибину залягання і додаткові накопичення напружень сейсмічні та деформаційні впливи від місцевих землетрусів (пре-, ко- і постсейсмічні деформації) можуть мати значний вплив на різні промислові об'єкти. Це показано багатьма дослідженнями зарубіжних вчених, які проводилися у зв'язку з негативними впливами на екологію і безпеку життєдіяльності районів, на яких впродовж багатьох років проводиться видобування корисних копалин (Guide, 2010; Vilarrasa et al., 2022; Dvory, Yang & Dunham, 2022; De Pater & Baisch, 2011; Keranen et al., 2013).

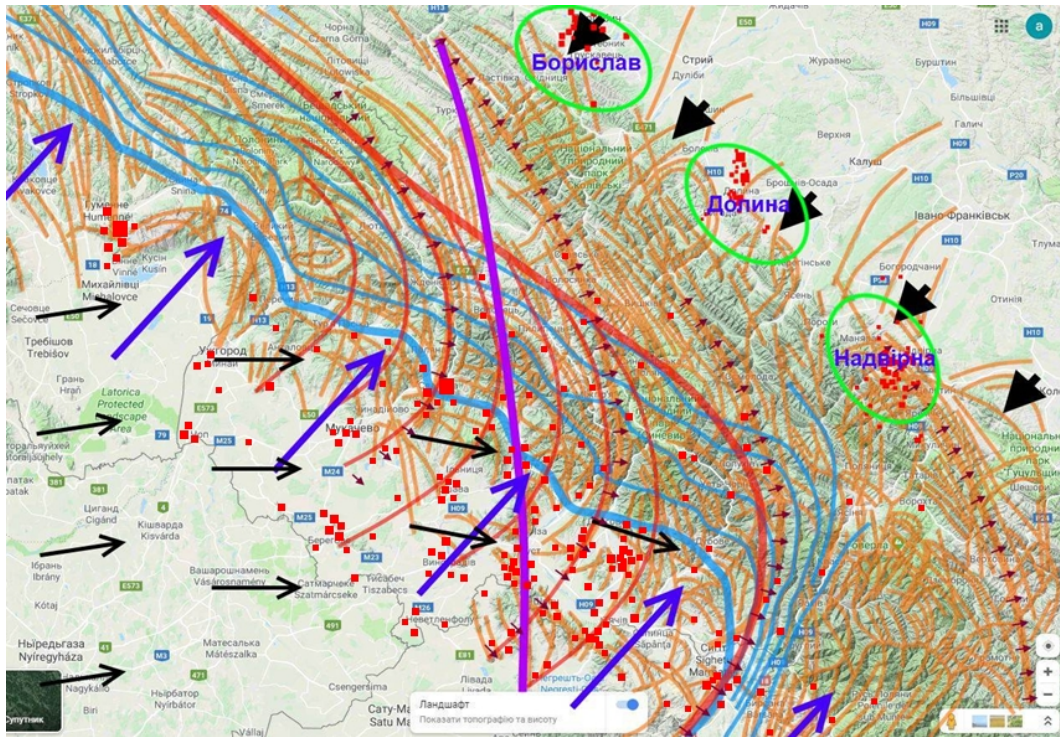


Рис. 4. Сейсмічність і геодинаміка Карпатського регіону України
(на картооснові Google) (Назаревич А. та Назаревич Л., 2019)

Такі ж негативні впливи мали місце і на території Карпатського регіону України – на свердловини в районі нафтопромислів Долини, на нафтопровід «Дружба» у місці перетину ним зони сейсмоактивного Закарпатського глибинного розлому (район м. Сваляви на Закарпатті).

Особливості сейсмічності Передкарпаття. Як приклад аналізу сейсмічного режиму території розглянемо дані по сейсмічному моніторингу території Передкарпаття Карпатською сейсмологічною мережею за останні роки (2018-2022 рр.) (табл. 1). Короткий опис позначень в таблиці: перший зліва стовпець – дата виникнення землетрусу, наступний стовпець – час виникнення землетрусу (година, хвилина, секунди за Грінвічем), далі – координати епіцентру (широта і довгота у градусах), енергія землетрусу (магнітуда у безрозмірних одиницях – приблизно еквівалент логарифму енергії землетрусу з коефіцієнтом 1.8), район. Як видно з аналізу таблиці і карти родовищ вуглеводнів на Івано-Франківщині (Іванюта, 1998; Крупський, 2001) землетруси відбуваються в межах зон родовищ вуглеводнів – Надвірна, Долина,

Яремче. Здебільшого це землетруси, вогнища яких локалізовані або вище, або нижче нафтогазоносних горизонтів. Тут концентруються основні тектонічні напруження, які й спричиняють виникнення землетрусів різної енергії (магнітуди), яка залежить від кількох факторів: природний напружений стан геологічного середовища, його зміна внаслідок розробки покладу/інтенсивності відкачування вуглеводнів, зміна фізико-механічних властивостей порід-колекторів, тектонічні особливості району, тощо.

Таблиця 1

Каталог землетрусів Прикарпаття за 2018-2022 рр.,
зарєєстрованих Карпатською сейсмічною мережею

Дата	Час в дже-релі (Грін.)	Координати		Магні- туда	Район
		φ^0N	λ^0E		
19.02.2018	11.52.17	48.55	24.48	2.7	Надвірна
14.09.2018	13.02.22	48.56	24.46	2.8	Надвірна
05.09.2018	14.50.06	48.63	24.53	2.6	Надвірна
12.09.2018	00.00.23	49.76	24.35	2.2	Східніше Львова
19.10.2018	14.00.51	48.63	24.32	3.0	Надвірна
16.08.2019	13.11.15	49.32	23.51	1.8	Стебник
17.09.2019	11.01.22	48.61	24.41	1.4	Надвірна
16.10.2019	15.53.30	48.56	24.43	1.6	надвірна
22.11.2019	14.40.40	48.60	24.50	2.6	Надвірна
03.12.2019	23.25.49	50.19	24.91	3.0	Район Радехова
28.02.2020	14.04.43	48.62	24.45	2.8	Надвірна
17.03.2020	05.22.41	49.30	23.52	1.6	Стебник
21.03.2020	20.35.51	49.10	23.31	3.1	Район Сколе
21.03.2020	22.02.00	49.08	23.30	2.9	Район Сколе
15.04.2020	17.26.36	49.17	23.31	3.1	Район Сколе
01.06.2020	07.22.49	49.09	23.97	3.2	Долина
01.06.2020	01.05.43	49.05	23.96	2.7	Долина
27.07.2020	13.45.04	48.72	24.48	2.5	Старуня
11.08.2020	16.05.53	48.63	24.52	2.3	Надвірна
02.12.2020	16.14.32	48.65	24.58	2.7	Надвірна
10.01.2021	13.13.33	49.59	23.55	1.9	Рудки
21.02.2022	18.05.16	50.35	24.16	2.8	Червоноград
18.03.2022	23.50.11	49.09	24.30	2.5	Калуш
11.08.2022	13.34.20	49.67	23.43	1.9	Рудки
07.09.2022	13.10.37	48.58	24.58	2.2	Надвірна
30.09.2022	13.323.37	48.47	24.46	2.2	Яремче

Ще ряд землетрусів відбулися в районі Калуша і Старуні. Це старі промисли. У Калуші видобували калійну сіль шахтним способом, утворені

пустоти консервували розсолами, які з часом розмивали цілики підземних камер, руйнували їх, плюс природні геодинамічні процеси карстоутворення активізувалися і спричиняють інтенсифікацію руйнування цих порід. В результаті усіх таких процесів у 1987 р. на околиці Калуша в зоні старих шахтних полів стався провальний землетрус з інтенсивністю I 3-4 бали, який завдав матеріальних збитків. Цей небезпечний геодинамічний процес триває і далі, на даний час на цій території в ряді місць зафіксовано помітне опускання денної поверхні землі, а у 2020 р. у с. Кропивник Калуської ОТГ утворилось нове провалля.

На території села Старуня, де після сильного землетрусу у 1977 р. в зоні Вранча (Румунія) активізувався грязьовий вулкан під однойменною назвою, який активний і донині, викидає на поверхню, газ, глину, воду, іноді нафту, яка збирається в заглибинах, у 2020 р. інструментально зареєстровано землетрус магнітудою 2.5 (без макросейсмічних ефектів). За даними сейсмічного моніторингу тут (це сейсмоактивна Надвірнянська зона (рис. 4)) відбуваються землетруси різної сили – від слабких до трохи сильніших, вони реєструються інструментально, тут закладено сейсмічний пункт спостереження, оскільки це місце (район грязьового вулкану Старуня) є чутливою точкою, яка реагує на зміни напруженого стану тектоносфери не тільки в нашому регіоні, але і на значно більших відстанях.

На Львівщині, завдяки розширенню мережі сейсмічних спостережень, в останні роки помітно зросла кількість зареєстрованих слабких землетрусів (табл. 1). Як і в Передкарпатті, це зони видобування корисних копалин – Рудки, Комарно, Стебник, Червоноград. Зокрема, за даними вчених (Іванов, 2003) територія Червоноградського ГПР (зони шахтних полів вугільних шахт) зазнає вираженого опускання, місцями значного, такі зміни напруженого стану середовища приводять до деформацій у масивах порід і згодом до виникнення техногенних та техногенно спровокованих (індукованих) землетрусів. Згадаймо ще раз у цьому зв'язку про провальний землетрус у вересні 2017 р. на шахтних

полях Стебницького комбінату полімінералів (рис. 1), у 2020 р. новий землетрус в цій зоні призвів до утворення нового провалля. Геодинамічні процеси, які відбуваються у Стебнику на шахтних полях (Дяків, 2017) подібні до тих, які раніше інтенсивно відбувалися (і зараз частково продовжуються) у Калуші. Інші землетруси на Львівщині відбуваються на територіях, де наявні різнорангові сеймотектонічно активні розломи. Для виявлення таких розломів і для визначення зон, де можливі підготовка та виникнення землетрусів, велике значення має вивчення змін напружено-деформованого стану (НДС) геологічного середовища, для цього за допомогою різної геофізичної апаратури (деформографів, нахиломірів, магнітометрів, геоакустичної та геоелектричної апаратури, гідротермальних досліджень у свердловинах та ін.) моніторяться часово-просторові зміни параметрів відповідних геофізичних полів. Ефективними тут є, зокрема, геоакустичні дослідження, фізичною основою яких є вплив змін НДС гірських порід на швидкості поширення в них пружних хвиль та на інтенсивність геоакустичної емісії цих порід.

Геофізичні моніторингові дослідження

Геофізичні дослідження, спрямовані на моніторинг геодинамічних процесів, пошук провісників і прогноз місцевих землетрусів, ведуться на Карпатському геодинамічному полігоні з 1980-х років за допомогою мережі режимних геофізичних станцій та окремих експериментальних пунктів і пунктів повторних спостережень (Подстригач та Чекунов, 1978; Старостенко, 2005; Латынина и др., 1993; Назаревич, 1997; Назаревич А. та Назаревич Л., 2002б, 2006, 2008). В результаті цих досліджень отримано великий фактичний матеріал, у першу чергу – неперервні багатокomпонентні ряди геофізичних даних з різних пунктів полігону. Як приклад, тут наведемо результати аналізу за період спостережень січень-травень 1989 р., цей часовий інтервал характеризувався сейсмічною активністю у Закарпатті і добре відображений у різних геофізичних полях (деформографія, геоакустика, геоелектрика,

геомагнетизм), що дозволяє провести комплексний аналіз цих даних для виявлення провісників відчутного Виноградівського землетрусу 6 травня 1989 р. з М 2,9.

Деформографія. Деформографічні дослідження в Українському Закарпатті проводились в районах міст Берегове і Королево, що зумовлено важливістю цих районів як одних з ключових у тектонічній структурі літосфери субрегіону, а також наявністю тут придатних для таких досліджень підземних виробок (Назаревич А., 2011). Деформографічна станція “Берегове-1” (“Мужієво”), дані з якої аналізуються у цій роботі, знаходилась у розвідувальній штольні № 22 на південному схилі гори Мужіївської (Великої Березівської, за 3 км на південний схід від м. Берегове у підніжжі її вершинного купола, складалася з двох горизонтальних кварцових деформографів (Латынина, Байсарович, Брымых, 1993) довжиною 28 м (азимут 37°) і 12 м (азимут 73 °). Зареєстровані на цій станції деформації масиву порід гори Мужіївської за період з літа 1986 до літа 1990 р. наведено на рис. 5а. Аналізуючи хід деформацій контрольованого масиву порід, ми виділили деформаційний провісник досліджуваних Виноградівських землетрусів (детальніше див. у (Назаревич А. та Назаревич Л., 2008; Назаревич А., 2011) та ін.), який за якісною характеристикою (стиск змінився розтягом) та часовим розвитком добре кореспондується з виділеним та проаналізованим нами раніше геоакустичним провісником цього ж землетрусу (див. детальніше у (Назаревич А. та Назаревич Л., 2002б, 2006) та ін.). Щодо провісника коротко можна зазначити таке: зміни деформаційних процесів у масиві порід гори Мужіївської розпочалися за 5 місяців до майбутніх землетрусів (рис. 5а), а це наближено до значень, отриманих за результатами аналізу геоакустичного провісника цих же землетрусів (рис. 5б); зміни деформацій по деформографу d1 мали якісний характер (стиск змінився розтягом) і становили близько 11×10^{-7} відносно біжучої трендової складової ряду d1; після землетрусів змінився характер деформаційних процесів у масиві порід гори Мужіївської – по деформографу d1

середньорічний стиск величиною $\approx 10,5 \times 10^{-7}$ змінився розтягом величиною $\approx 4,1 \times 10^{-7}$, по деформографу d2 середньорічний стиск з $\approx 23 \times 10^{-7}$ зменшився до $\approx 9,6 \times 10^{-7}$.

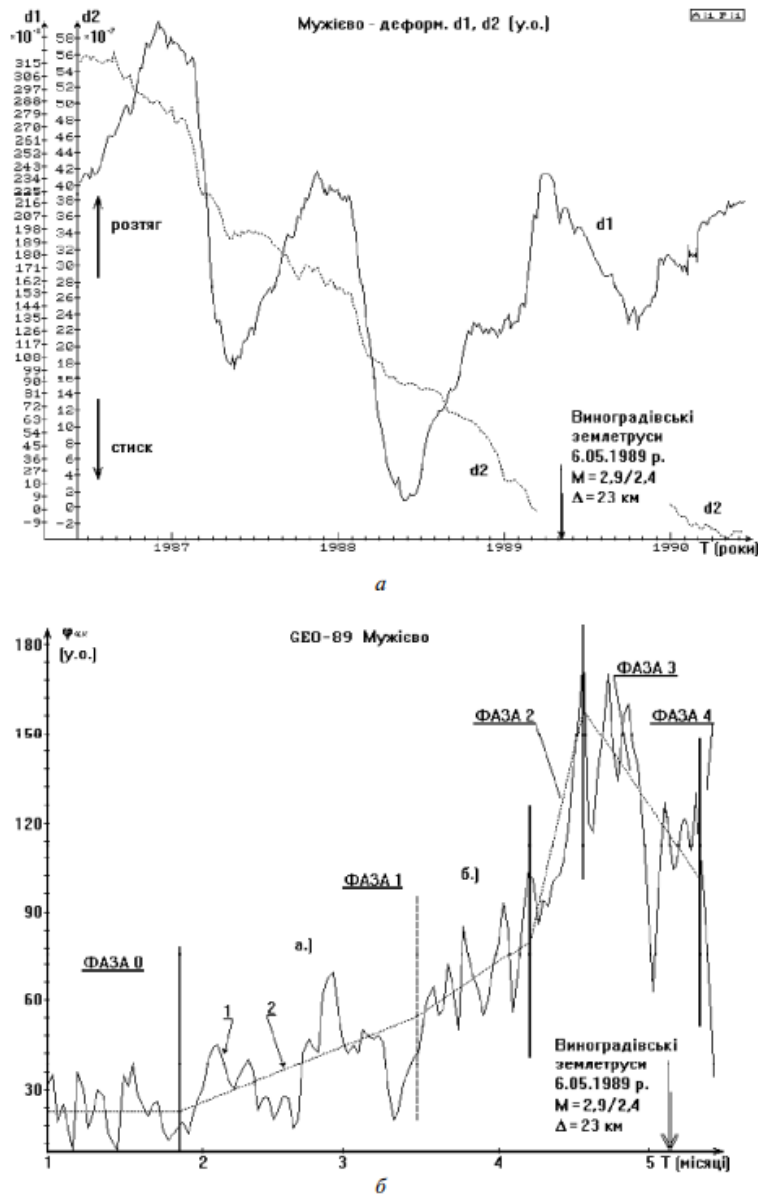


Рис. 5. Деформації порід гори Мужіївської за період з літа 1986 до літа 1990 р. (деформографічна станція «Берегове-1» («Мужієво»)) (а); часові зміни-фази/швидкості ультразвуку в породах (середньодобові значення) за січень-травень 1989 р. у штольні №23 на горі Мужіївській (б).

За величиною цього провісника та спеціально розробленою методикою нами оцінено величини загальних деформацій у вогнищі даного землетрусу ($D=30,8$ мм) та зміщення по розриву в його джерелі $D_s \approx 3,08$ мм) (Назаревич А.

та Назаревич Л., 2008), ці дані добре корелюють з визначеними нами такими ж параметрами за іншими методиками та для інших подібних за енергією місцевих землетрусів (Назаревич Л. та Назаревич А., 2006).

Геоакустика. Геоакустичні дослідження в Закарпатті проводились в районі Берегівського горбогір'я (Назаревич А., 1997; Назаревич А. та Назаревич Л., 2002б; Старостенко, 2005). В основі впливу змін напружено-деформованого стану (НДС) гірських порід на швидкості поширення в них пружних хвиль лежить мікротріщинний фізичний механізм (Назаревич А., 1997; Назаревич А. та Назаревич Л., 2002б). Методика, апаратура та результати наших режимних геоакустичних сейсмопрогностичних досліджень детально описані у низці публікацій (Назаревич А., 1997, 2011; Назаревич А. та Назаревич Л., 2002б; Старостенко, 2005). Один з найцікавіших фрагментів часових рядів (часові зміни фази/швидкості ультразвуку в породах, середньодобові значення) під час періодів активізації сеймотектонічного процесу в Закарпатті, а саме за січень-травень 1989 р. наведено на рис. 5б. Аналіз цієї та інших зареєстрованих геоакустичних аномалій – провісників місцевих закарпатських землетрусів виявив важливі закономірності часового ходу та спектрально-часової структури цих аномалій, у яких чітко відображені різні фази підготовки даних землетрусів (Назаревич А. та Назаревич Л., 2002б; Старостенко, 2005; Назаревич А., 2011). Так, періоди активізації місцевого сеймотектонічного процесу, які настають після фази відносного спокою (Фаза 0, рис. 5б), розпочинаються Фазою 1 (фазою глибинної субрегіональної активізації) за кілька (3-7-12-20) тижнів до майбутнього землетрусу і призводять до накопичення значніших напружень у зоні його підготовки, супроводжуються підвищенням у 3-5 разів фонових амплітуд геоакустичних варіацій, що найяскравіше видно по діапазонах крипових рухів у періодах 3-5 годин, з характерними криповими мікроземлетрусами на цих же частотах за невеликих змін середнього рівня значень фази (швидкості) прийнятого зондувального ультразвукового сигналу. Наступна фаза підготовки землетрусу

(Фаза 2, “приповерхневої”, локальної активізації, рис. 5б), коли починається формування майбутньої вогнищевої зони, розпочинається за 3-20 діб до майбутнього землетрусу і супроводжується мікросейсмічними криповими бурями з амплітудами варіацій у 20-100 разів вищими від фонових (особливо у вказаному діапазоні періодів) за значних (до 4-5 %) бухтоподібних змін повного середнього значення фази (швидкості) зондувальних хвиль. Далі настає Фаза 3, коли напруження перерозподіляються і концентруються безпосередньо в майбутньому вогнищі землетрусу, нарастають аж до досягнення тут межі міцності порід і спричиняють сам землетрус, у цей час напруження у більш віддалених областях середовища і величини повного середнього значення фази (швидкості) зондувальних хвиль та амплітуди мікросейсмічної бурі у більш віддалених областях зони підготовки землетрусу дещо знижуються. Цикл активізації завершується Фазою 4 (фазою релаксації) протягом 1-10 діб після землетрусу з поверненням величин варіацій і середнього значення фази/швидкості ультразвуку до початкового спокійного рівня. Важливо також відзначити, що проведена нами за допомогою спеціально розробленої методики геомеханічна інтерпретація цієї та інших геоакустичних провісникових аномалій (Назаревич, 1997, 2011; Назаревич А. та Назаревич Л., 2002б) показали наявність під час таких аномалій режиму розтягу в масиві порід гори Мужіївської, що повністю співпадає з даними прямого деформографічного методу (див. рис. 5а та 5б).

Висновки

Підсумовуючи викладене, відзначимо таке. У роботі показано способи уточнення характеристик сейсмічного ризику для територій Карпатського регіону України з застосуванням ймовірісно-статистичних та інших сейсмологічних методів. Також коротко описано способи застосування моніторингових геофізичних методів для оцінок сейсмічної небезпеки від прогнозованих на основі більш детерміністичних підходів конкретних

сейсмічних подій і відповідних сейсмодислокаційних впливів для конкретних сейсмогенних зон та структур. Для реалізації таких способів та підходів запропоновано проводити відповідні комплексні дослідження.

Якщо йдеться про прогнозування майбутніх сейсмічних подій і ризиків від них на певних конкретних ділянках, де ведуться активні роботи по видобуванню корисних копалин, будівництво очисних споруд, електростанцій, дамб, використання підземних сховищ газу, тощо, то спочатку проводять на цих територіях сейсмічний моніторинг кушем станцій впродовж певного часу разом з геоакустичним моніторингом, причому досліджена ділянка знаходиться в центральній частині такого куща пунктів спостережень. Зареєстровані часові і спектральні аномалії сейсмічного, мікросейсмічного та сейсмоакустичного режиму проходять складний комплексний аналіз, ці результати співставляються з особливостями тектонічної і геологічної будови досліджуваного району і роблять прогноз сейсмотектонічної активності тут на майбутнє, оцінюють ймовірність виникнення тут сейсмічної події певної сили, можливі негативні впливи від неї на різні інженерні об'єкти.

Наведені результати комплексних досліджень сейсмічності та геофізичних полів, зокрема, дані деформометрії і геоакустики в геоактивних зонах, виявлені і зареєстровані геофізичні аномалії, часові особливості розвитку локальних сейсмічних процесів дають можливість прогнозувати у певних часових вікнах (3-20 діб) сейсмічні події в зонах, де ведеться такий моніторинг.

Силу та інші характеристики можливого землетрусу можна прогнозувати за сейсмічним потенціалом наявних у досліджуваних районах геологічних структур і за величинами, тривалостями і просторовими характеристиками зареєстрованих геофізичних аномалій.

Подібного роду спостереження за змінами НДС геологічного середовища проводяться в зонах водосховищ, шахтних полів, у зонах видобування газу/нафти в багатьох країнах світу для мінімізації екологічних ризиків від індукованих та техногенних сейсмічних подій. Для заходу України такі

дослідження є актуальними через наявність тут магістральних нафто- і газопроводів, залізниць, автошляхів, зон гірничих виробок, АЕС, водосховищ ГЕС і ГАЕС.

Представлені дослідження будуть розвиватись у напрямку розширеного та поглибленого вивчення особливостей сеймотектоніки конкретних сейсмогенних зон регіону та зв'язків провісникових геофізичних аномалій з будовою, геомеханічним режимом та геодинамікою літосфери цих зон і всього Карпатського регіону України.

Список літератури

- De Pater, C. J., & Baisch, S. (2011). *Geomechanical Study of Bowland Shale Seismicity*. Synthesis Report, Lancashire: Cuadrilla Resources.
- Dvory, N. Z., Yang, Y., & Dunham, E. M. (2022). Models of injection-induced aseismic slip on height-bounded faults in the Delaware Basin constrain fault-zone pore pressure changes and permeability. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL097330. <https://doi.org/10.1029/2021GL097330>
- Guide, No. (2010). *SSG-9. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations*, Vienna: IAEA.
- Keranen, K. M., Savage, H. M., Abers, G. A., & Cochran, E. S. (2013). Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA: Links between wastewater injection and the 2011 Mw 5.7 earthquake sequence. *Geology*, 41, 699-702. DOI: 10.1130/G34045.1
- Kováčiková, S., Logvinov, I., Nazarevych, A., Nazarevych, L., Pek, J., Tarasov, V., & Kalenda, P. (2016). Seismic activity and deep conductivity structure of the Eastern Carpathians. *Stud. Geophys. Geod.*, 60, 280-296, DOI: 10.1007/s11200-014-0942-y

- Vilarrasa, V., De Simone, S., Carrera, J. et al. (2022). Multiple induced seismicity mechanisms at Castor underground gas storage illustrate the need for thorough monitoring. *Nat Commun* 13, 3447 <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30903-6>
- Вербицький, С. Т., & Вербицький, Ю. Т. (2011). Сучасний стан та перспективи розвитку сейсмологічних досліджень в Карпатському регіоні України. *Геодинаміка*, 2(11), 35-37.
- Дяків, В. О. (2017). Динаміка водопритоків, розвитку техногенно-активізованого карсту та прогнозованого провалу 30 вересня 2017 р. у зоні впливу рудника №2 Стебницького ГХП “Полімінерал”. *Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції “Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування”*. Україна, м. Трускавець, (6-10 листопада 2017 р.), 2, 273-288.
- Іванов, Є. (2003). Технології ландшафтного моделювання в гірничодобувній промисловості. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 63, 215-219.
- Іванюта, М. Н. (гол. ред.). (1998). *Атлас родовищ нафти і газу України*, Львів: Вид-во “Центр Європи”.
- Карпатська сейсмологічна мережа України (*Carpathian Seismological Network of Ukraine*). Режим доступу: <http://seism.lviv.ua/>.
- Крупський, Ю. З. (2001). *Геодинамічні умови формування і нафтогазоносність Карпатського та Волино-Подільського регіонів України*, Київ: Укр ДГРІ.
- Латынина, Л. А., Байсарович, И. М., Брымых, Л. и др. (1993). Деформационные измерения в Карпато-Балканском регионе. *Физика Земли*, 1, 3-6.
- Назаревич, А., & Назаревич, Л. (2002а). Будова літосфери Закарпаття і проблема гіпоцентрії місцевих землетрусів. *Збірник матеріалів науково-технічного симпозіуму “Геомоніторинг-2002”*, 15-18.

- Назаревич, А. В. (1997). *Експериментальне дослідження спектрально-часової структури варіацій параметрів пружних хвиль в масивах гірських порід*. (Кандидатська дисертація). К.: ІГФ.
- Назаревич, А. В. (2011). Деформографічний метод у дослідженнях сеймотектонічних процесів у вогнищевих зонах землетрусів Закарпаття. *Геодинаміка*, 1(10), 134-146.
- Назаревич, А. В. & Назаревич, Л. Е. (2007, сентябрь). Характеристики сейсмических очагов землетрясений Украинского Закарпатья, крипекс землетрясений и некоторые проблемы уточнения сейсмического риска. *Сборник материалов международной конференции «Уроки и следствия сильных землетрясений»*. 100-102.
- Назаревич, А. В., & Назаревич, Л. Є. (2002б). Нелінійна пружність і тензочутливість гірських порід (дослідження та застосування для геодинамічного моніторингу), *Вісник КНУ імені Тараса Шевченка. Геологія*, 23-24, 33-38.
- Назаревич, А. В., & Назаревич, Л. Є. (2008). Деформаційні провісники закарпатських землетрусів: методики виділення та результати аналізу. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*, 311-320.
- Назаревич, А. В., & Назаревич, Л. Є. (2019, жовтень). Про терейнові особливості геодинаміки Українських Карпат та їх зв'язок з нафтогазоносністю. *Матеріали шостої міжнародної науково-практичної конференції "Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування"*, 1, 355-359.
- Назаревич, Л. Е., Назаревич, А. В., & Баштевич, Н. В. (2004, октябрь). Крипекс землетрясений и его применение в сейсмологии. *Материалы международной конференции “Проблемы оценки сейсмической опасности, сейсмического риска и прогноза землетрясений”*, 33-37.

- Назаревич, Л. Є., & Назаревич, А. В. (2020). Сейсмічна небезпека територій в умовах видобутку корисних копалин як фактор екологічного ризику (на прикладі Українського Передкарпаття). Мальований М.С. (Ред.). *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*, 97-124, book doi: 10.23939/book.ecocongress.2020.
- Назаревич, Л. Є., & Назаревич, А. В. (2004). Методики уточнення параметрів гіпоцентрів Карпатських землетрусів. *Геодинаміка*, 1(4), 53-62.
- Назаревич, Л. Є., & Назаревич, А. В. (2006). Характерні землетруси Берегівської сейсмогенної зони: особливості джерела і макросейсмічного поля. *Вісник КНУ імені Тараса Шевченка. Геологія*, 38-39, 42-47.
- Назаревич, Л. Є., & Назаревич, А. В. (2018). Сейсмогеодинамічна активізація нафтогазоносних районів Передкарпатського прогину (Долина, Надвірна, Борислав). *Мінеральні ресурси України*, 2, 36-42. DOI: 10.31996/mru.2018.2.36-42.
- Назаревич, Л. Є., & Назаревич, А. В. (2022). Сейсмічна активність району Дністровського гідровузла і сейсмічна небезпека. Мальований М.С, Степова О.В. (Ред.). *Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій*, 394-415. book doi: 10.23939/monograph2022.
- Назаревич, Л. Є., Ніщименко, І. М., & Назаревич, А. В. (2017, березень). Сейсмогеодинамічна активізація Бориславського нафтогазоносного району як фактор екологічного ризику. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції “ЕКОГЕОФОРУМ-2017. Актуальні проблеми та інновації”*, 192-194.

- Назаревич, А. В., & Назаревич, Л. Е. (2008). Изучение макросейсмических полей землетрясений в проблеме уточнения сейсмического риска (на примере Украинского Закарпатья). *Проблемы сейсмологии в Узбекистане*, 5, 259-263.
- Немчинов, Ю. І., Хавкін, О. К., Мар'єнков, М. Г., Жарко, Л. О., Дунін, В. А., Бабік, К. М., ... Лисиця, М. І. (2013). Практичні питання динаміки будівель. *Науково-виробничий журнал «Будівництво України»*, 6, 6-21.
- Подстригач, Я. С., & Чекунов, А. В. (гол. ред.). (1978). *Карпатский геодинамический полигон*. М.: Сов. радио.
- Старостенко, В. І. (гол. ред.). (2005). *Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат*. К.: Наук. думка.

**ВАРТІСНА ОЦІНКА ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ ДЛЯ
ВСТАНОВЛЕННЯ ПЛАТИ ЗА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ЧИ ЗНИЩЕННЯ:
ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИЙ КОНТЕНТ НАЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ
(на прикладі національного парку «Бузький Гард»)**

Сухіна О.М., Державна установа «Інститут економіки природокористування та сталого розвитку Національної академії наук України», к.е.н., с.н.с., старший науковий співробітник відділу екосистемного оцінювання природно-ресурсного потенціалу, Україна

Антоненко В.М., ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», к.е.н., доцент, доцент кафедри управління і фінансово-економічної безпеки, Україна

Улицький О.А., Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, доктор геологічних наук, доцент, директор Навчально-наукового інституту екологічної безпеки та управління Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління, Україна

Abstract

In today's conditions, the problem of the state's national security is more relevant than ever before. National security is a system of internal subsystems, among which its environmental and economic components are of great importance. Their complex influence on the state of national security of Ukraine as a whole strengthens their separate importance in this sense.

Taking into account the urgency of the problem of the ecological and economic approach to ensuring national security, the problem of assessing the value of ecosystems is put on the agenda, the solution of which has been delayed for a long time due to objective and subjective reasons.

In principle, classic methods of pricing, both market and cost, cannot be applied to the valuation of ecosystems. That is why the authors propose and substantiate their own approach and methodology for evaluating the value of ecosystems based on the consumer utility of ecosystems, that is, by evaluating the value of ecosystem services that are produced by the evaluated ecosystems throughout their life cycle.

The methodology was tested on the example of the forests of the Buzkyi Gard National Nature Park, in particular, the cost of assimilation and oxygen-producing services provided to consumers by forest ecosystems was calculated.

The methodological concept and the corresponding technique are of practical importance and can be used to justify changes in environmental taxation and to determine the extent of damages from the Russian military invasion of Ukraine. This will contribute to strengthening the national security of our country in the future.

Вступ

Сучасне українське сьогодення, пов'язане із війною росії проти української держави, стосується усіх сфер нашого життя. Війна напряду і впритул зачепила інтереси і життя усіх без винятку українців та страшним відлунням прокотилася теренами інших країн світу. Усі злочини, скоєні сусіднім «братом», про які просто жахливо читати у новинах, важко уявити їх реальність, намагатися їх зрозуміти і досягнути людським розумом, – так чи інакше чинять вплив на усе, що відбувається в країні, ба більше – й в усьому світі. На це звертають увагу урядовці і політики, про це пишуть журналісти і блогери, це аналізується військовослужбовцями й істориками, коментується експертами і навіть екстрасенсами. Тобто тема цієї війни розглядається у різних площинах і з різних точок зору (Antonenko, 2022).

Означена тема стосується національної безпеки держави, у складі якої важливими складовими є її екологічна і економічна компоненти. Вони чинять суттєвий комплексний вплив на усю систему національної безпеки України,

питання якої стало надто важливим і актуальним в умовах українського сьогодення. В результаті військових дій значна частина території (ліси, ґрунти, водойми) України є знищеною, що має бути зафіксовано, оцінено та у подальшому – відшкодовано. Руйнування екосистем призводить до їх критичних змін та суттєвого порушення динамічної екологічної рівноваги, до екологічних криз та забруднення навколишнього природного середовища, навіть до зникнення умов існування живих організмів, знищення окремих популяцій та зниження рівня біологічного різноманіття.

Тому в Україні доцільно вже зараз розпочати здійснення оцінки вартості усіх екосистем. *Метою* цього дослідження є обґрунтування методологічного підходу та методичних засад кількісного визначення вартості екосистем як об'єкта екологічної безпеки для забезпечення стійкості системи національної безпеки в цілому. Виходячи з логіки дослідження та для досягнення поставленої мети, автори науковими завданнями вважають наступне:

- показати роль та значення еколого-економічних проблем в контексті забезпечення національної безпеки України;
- визначитися і обґрунтувати методологічну концепцію щодо вартісного оцінювання екосистем, які мають специфічні ознаки у якості об'єкта оцінювання і стосовно яких не можуть бути застосовані методи класичного ціноутворення (йдеться як про ринкове, так і про витратне ціноутворення);
- виходячи з того, що екосистеми, як правило, не є товаром, і до них не застосовуються вказані вище методи ціноутворення, – розробити і теоретично довести можливість і доцільність використання так званого опосередкованого ринкового ціноутворення, яким, ми вважаємо, є визначення споживчої корисності від функціонування екосистем;
- дослідити сутність і екологічні результати функціонування екосистем, якими вважаються надавані ними екосистемні послуги, що отримують їх споживачі, тобто територіальні громади, протягом всього життєвого циклу екосистем;

- розробити методичні підходи до визначення вартості лісових екосистем через оцінювання вартості їх екосистемних послуг, а саме асиміляційних та киснепродукуючих;

- зважаючи на тривалий період життєвого циклу лісових екосистем, провести аналіз доцільності врахування часового фактору і відповідно – процедури дисконтування вартісних показників у методиці оцінки вартості екосистемних послуг;

- визначитися із складом і сформувати необхідне інформаційне забезпечення для практичної апробації авторської методики ціноутворення;

- на базі висхідної інформації та дотримуючись розробленої методики, здійснити кількісні розрахунки вартості асиміляційних та киснепродукуючих послуг лісових екосистем на прикладі лісів Бузького Гарду;

- визначитися із практичними напрямками реалізації методичних і практичних результатів проведеного дослідження, накреслити сфери і питання, щодо яких є нагальна потреба у впровадженні і практичному застосуванні отриманих результатів.

Дослідження виконано на прикладі лісів національного природного парку «Бузький Гард», який знаходиться на контрольованій Україною території, і інформацію про нього можна було отримати з доступних джерел. Апробовані на цьому прикладі (лісів Бузького Гарду) методологічний підхід і методика оцінки обсягу і зниження вартості екосистем є універсальною, тобто їх можна використовувати і в інших оціночних процедурах.

Основний текст

Роль та значення екологічної безпеки у складі національної полягає у її впливу на інші складники національної безпеки, як-то: державна, політична, соціальна, військова, оборонна, продовольча, гуманітарна, демографічна, науково-технічна, соціокультурна, інформаційна, але найбільш потужний вплив вона чинить саме на економічну безпеку (Antonenko, 2022). Військові умови

надто загострили цей вплив. Зв'язок сучасної війни та пов'язаних із нею екологічних і фінансових проблем відбувається через внутрішні системні сполуки зазначених елементів національної системи безпеки. Цей зв'язок є двостороннім: вплив війни на національну безпеку зазвичай є прямим за напрямком та недискреційним (опосередкованим) за характером.

Прямий (його можна назвати первинним) вплив екологічної складової безпеки на систему національної безпеки обумовлений тим, що збільшується навантаження на економіку країни у зв'язку із проведенням природоохоронних і подібних заходів. Опосередкований вплив екологічної безпеки – це її негативний прояв у сенсі погіршення стану названих вище видів безпеки (тобто локальних складових безпеки: державної, політичної, соціальної, військової, оборонної, продовольчої, гуманітарної, демографічної, науково-технічної, соціо-культурної, інформаційної), які системно погіршують рівень економічної захищеності держави.

Так само можна розглядати і негативні наслідки сучасної війни на національну безпеку. Прямий (первинний) напрямок впливу війни на національну безпеку розуміється як об'єктивне виникнення в період і після війни таких негативних тенденцій, як зменшення надходжень і збільшення видатків бюджету. Опосередкований характер такого впливу пояснюється тим, що війна не прямо впливає на розбалансованість бюджетної системи держави, а через інші сфери та через відповідні інші складники глобальної системи безпеки, призводячи до виникнення загроз у цих сферах (локальних складових національної безпеки).

Розглядаючи національну безпеку як систему, слід вказати і на внутрішнє поєднання екологічної і економічної підсистем, що в контексті цього дослідження є окремим специфічним питанням.

Системний зв'язок між екологічною і економічною підсистемами національної безпеки тлумачиться як аналітично-оціночний підхід до вартісного оцінювання природних екосистем. По-перше, мова йде про видатки

з державного бюджету на здійснення екологічних заходів, проєктів тощо; по-друге, збитки, нанесені екосистемам, мають бути відшкодовані винними у цьому особами. Саме з цієї позиції досліджується анонсована у цій публікації тема; тобто її автори зосереджувалися на оцінюванні обсягів збитків, що заподіяні екосистемам неощадливим, недбайливим поводженням зі сторони вітчизняних суб'єктів підприємницької діяльності або інших споживачів чи навіть навмисним його руйнуванням російськими загарбниками. Іншими словами, тема є актуальною для оцінювання розмірів відшкодування збитків від нанесення будь-якої і будь-ким шкоди екосистемам України. Накопичені до війни і не вирішені й досі екологічні проблеми посилюються до критичних масштабів шкодою, що завдає тривала війна виснаженням до того вже наявним екосистемам.

Отже, екологічна безпека і усі напрямки екологічних наукових розвідок, здійснюваних задля її забезпечення, мають розглядатися з точки зору її системного взаємозв'язку із іншими підсистемами глобальної системи національної безпеки.

Виходячи з мети цього дослідження, логіка його здійснення вимагає формування необхідного інформаційного забезпечення, що, як виявилось на практиці, наразі не є простим і доступним процесом, тому запиномся на ньому більш докладно.

Загальна адміністративно-територіальна характеристика національного природного парку «Бузький Гард». Національний природний парк «Бузький Гард», загальна площа якого становить 6 138,13 гектара, тягнеться на 70 км вздовж річки Південний Буг від південної частини Первомайська до села Олександрівка колишнього Вознесенського району, а також в долині річки Велика Корабельна від села Благодатне до села Семенівка.

До складу Благодатненської ОТГ входять 11 сіл: Семенівка, Благодатне, Воеводське, Садове, Рябоконева, Новогригорівка, Виноградний Яр, Остапівка, Зелена Поляна, Новомихайлівка, Булацелове. Зовсім мало лісових насаджень є

біля цих сіл Благодатненської ОТГ: Благодатне, Остапівка, Рябоконеве (поруч – с. Воєводське), Садове, Булацелове (рис. 1). На території села Семенівки Благодатненської сільської об'єднаної територіальної громади Первомайського району Миколаївської області розміщені заплавні ліси та інша рослинність, що мають асиміляційні та киснепродукуючі властивості й надають відповідні екосистемні послуги. Село розташоване на березі Південного Бугу. Ліси та лісосмуги не стоять на балансі села і не належать до його комунальної власності, а є власністю Державного підприємства «Вознесенське лісове господарство».

Основна частина водних рекреаційних ресурсів Національного природного парку «Бузький Гард» представлена річкою Південний Буг, де проходять водні маршрути по порогах II–III категорії складності на плавзасобах різних класів (рафти, катамарани, каяки). Вся ділянка русла річки, де проходять водні маршрути (від с. Мигії до с. Богданівки), має популярність серед любителів активного виду відпочинку. Найбільш відвідуваними є: урочище «Протич» та гирло річки Велика Корабельна.

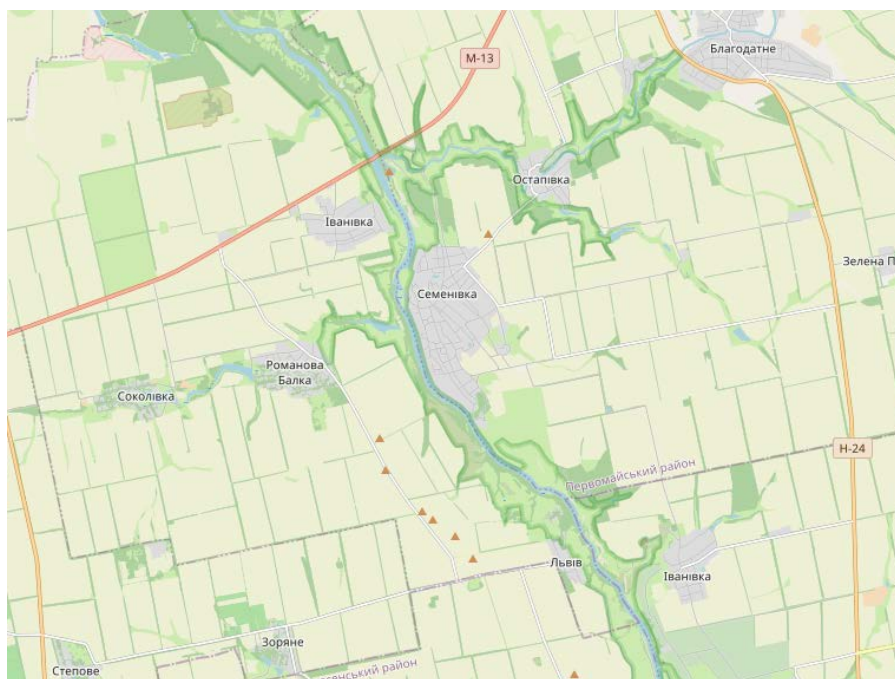


Рис. 1. Географічна карта с. Семенівки та інших сіл Благодатненської сільської об'єднаної територіальної громади Первомайського району Миколаївської області (як складової національного парку «Бузький Гард») (Boldyrev, 2001)

Річка Велика Корабельна бере початок у селі Миколаївці. Тече переважно на південний захід, у пониззі – на південь. На південь від села Воєводське впадає до Корабельної (зливається з річкою Малою Корабельною, даючи початок Корабельній). Тобто, в с. Воєводське як складової частини Благодатненської сільської ОТГ, де розміщено гирло річки Велика Корабельна, з часом може бути розвинений активний туризм. Поки що в рубриках «Економіка» та «Освіта і культура» с. Воєводське туризм не згадується, як і в с. Семенівка. Але, якщо і буде розвинено такий вид туризму, то він не буде пов'язаний із забрудненням атмосферного повітря.

Проблеми визначення кількісних характеристик Національного природного парку «Бузький Гард». ДП «Вознесенське лісове господарство»: сосна, дуб, ясен, акація, клен, горіх, в'яз, тополя, гледичія, горіх грецький, софора японська, чагарники (SE «Voznesen Forestry» [SVF], 2021). Ще в Інтернеті зазначено такі дані: лісові насадження представлені в основному листяними породами (дуб, ясен, клен). Взагалі лісистість Миколаївської області складає найменший показник по Україні – від 0 до 4,9 % (найвищий показник – 60 %) (Tovarystvo lisivnykiv Ukrainy [TIU], 2021).

Доречно зазначити, що в заплавних лісах шириною 20-30 м ростуть ясен, берест (або в'яз граболистий), по балках – дуб наскельний, є багато шипшини, кущів глоду. На південній окраїні с. Семенівки росте акація. Є дубові лісосмуги. Також в лісах с. Семенівка є хвоя, ясен, в'яз, дуба трохи, якщо не вирубали. Є дерева віком 90, 70 і 50 років. Отож, в будь-якому разі дослідження лісів Національного природного парку «Бузький Гард» є надто важливим як для місцевих громад, так і для державних інтересів в цілому.

Варто наголосити, що це дослідження проводилося в умовах браку необхідної облікової інформації: як виявилось, такий облік наразі не ведеться з причини відсутності правового врегулювання та економічної зацікавленості ані місцевих громад, ані загальнодержавних інституцій. Про це, наприклад, йдеться у відповіді головного лісничого ДП «Вознесенське лісове господарство»

А.В. Чикачової, яка на офіційний запит, здійснений О. М. Сухіною про статус цього лісу, відповіла дослівно наступне: «Ви надіслали запит до ДП «Вознесенське лісове господарство» щодо наявності земель лісогосподарського призначення в межах Благодатненської ОТГ Первомайського району Миколаївської області. Вивчивши матеріали по запиту, повідомляємо наступне: вкриті лісом землі, розташовані в межах та за межами населених пунктів Семенівка, Булацелове та Остапівка Благодатненської ОТГ не відносяться до земель лісогосподарського призначення і не обліковуються в ДП «Вознесенське ЛГ». Ці насадження були створені як яружно-балкові ліси колгоспів. Тому будь-яка інформація щодо породного складу, віку та інші характеристики, що стосуються цих насаджень, в лісгоспі відсутні» (з офіційного листування).

Тому для отримання необхідної інформації було частково використано експертні методи. Нами отримано дані для відповідних розрахунків з Інтернету та від декількох установ та громадян (які і стали експертами), які проживають, працюють в с. Семенівка чи мають до нього відношення по роботі.

Розрахунки здійснені для с. Семенівка з селами Булацелове та Остапівка Благодатненської ОТГ. Для здійснення кількісно-вартісних розрахунків необхідні визначити: яке процентне співвідношення сосон та дубів у лісі (можливо, там ще є інші дерева, то яке співвідношення всіх дерев); скільки сосон росте на території в 1 га; яка кількість дубів росте на території в 1 га; скільки інших дерев росте на території в 1 га; скільки коштує насадження лісу вручну без суцільної оранки; яка вартість насадження лісу з допомогою техніки, якщо така є; яка вартість збереження та охорони лісу від шкідників за 1 рік; яка вартість догляду за новонасадженим лісом протягом 1 року; скільки років лісу; якщо ліс різного віку, то хоч приблизно у процентному співвідношенні: по скільки років; чи ліс молодий чи старий; для порівняння можна оцінити дерева як деревину, і для цього необхідно знати вартість одного дерева (дорослого) як кругляку (ділової деревини різних дерев) й дров (для

дубу, сосни й інших дерев, якщо такі є); у зв'язку із процесом децентралізації владних повноважень в Україні, ще дуже важливим є здійснення розрахунків для об'єднаної територіальної громади (ОТГ), і для Благодатненської зокрема, тому також необхідно знати площу лісів по всій цій ОТГ та інші дані.

Зібрана необхідна інформація під час проведеного експертного дослідження містить дані: площа с. Семенівка з селами Булацелове та Остапівка складає 10 513,10 га угідь; ліси та інші вкриті лісом площі – 540,54 га, з них – 534,14 га – всього лісові насадження, чагарники й ін.; 522,4191 га – й полезахисні смуги, чагарники, й інші вкриті рослинами площі; 11,7209 га – інші захисні насадження над залізничними дорогами й інші; 10 га з цих 11,7209 га – землі автомобільного транспорту понад трасою. Отже, площа лісу села Семенівки разом з лісополосами становить 540,54 га.

При цьому з'ясовано, що ліси та лісосмуги не стоять на балансі села, не належать до його комунальної власності, вони також і не належать до ДП «Вознесенське лісове господарство», тобто фактично відсутній офіційний власник екосистемних активів, до яких відноситься даний ліс. Але ліси вирубуються, в окремих місцях мало що залишається, а інвентаризація буде дорогим та тривалим процесом. Землевпорядником Благодатненської ОТГ зазначалося, що для того, щоб перевести ліси на баланс села, треба робити інвентаризацію лісів. Водночас необхідно змінювати і діюче у цій галузі законодавство. Отже, практика конче вимагає наукової уваги до цієї проблеми.

Вартісне оцінювання асиміляційних послуг лісових екосистем територіальної громади с. Семенівка. Різні види дерев мають різну вуглецепоглинаючу та киснепродукуючу здатність. Тому для визначення вартості асиміляційних та киснепродукуючих послуг лісових екосистем необхідні питомі вартісні показники. Для всіх розрахунків питомими вартісними показниками приймалася вартість квот на викиди вуглекислого газу на рівні 30 євро (Institut razvitiya tekhnologij TEK (IRTTEK) [Irt], 2021). Це – 990 грн/т.

Варто зупинитися на досить важливому, принциповому з наукової точки зору, питанні щодо оцінювання вартості екосистем у часі. Класична фінансова теорія передбачає врахування часового фактору в усіх розрахунках, де розглядається досить тривалий часовий період і фігурує коефіцієнт дисконтування. Дійсно, коли мова іде про часове вимірювання вартості грошей, то названий коефіцієнт має бути присутнім в подібних розрахунках. Як відомо, гроші у часі знецінюються під впливом інфляції (найбільш впливовий чинник), ризиків та інших чинників, і з цим класичним постулатом апріорі ніхто не сперечається.

Але, у нашому дослідженні йдеться не про часове оцінювання вартості грошей, а про оцінку вартості природних ресурсів (екосистем) та послуг (екосистемних послуг), які вони надають суспільству. Іншими словами, нами зроблена спроба оцінити майбутню споживчу вартість екосистем. І тому в цих оцінювальних процедурах необхідно ще додавати такий специфічний чинник, яким є саме об'єкт вартісного оцінювання, вартість якого, незалежно від інфляції, буде зростати. Тобто, конкретизуючи останню тезу, треба дати пояснення, що наша позиція зводиться до наступного:

- по-перше, екосистеми (як екосистемні активи) мають бути оцінені у вартісному вимірі, для чого нами обраний варіант їх оцінювання із застосуванням методу оцінювання споживчої корисності таких активів;

- по-друге, корисність екосистемних послуг, а, відповідно – і їх вартість, буде збільшуватися у часі; і це прогнозовано, скоріш за все, буде відбуватися із більшим зростанням (T_c), ніж темпи інфляції (T_i), тобто: ($T_c > T_i$). Саме збільшення вартості оцінюваних екосистем відбуватиметься з певним випередженням відносно змінювання вартості інших (не екосистемних) активів, тому скоригований коефіцієнт дисконтування (K_d^*), якби він застосовувався у наших розрахунках, мав би наступний вигляд: $K_d^* = K_d : K_c$, де K_d – коефіцієнт дисконтування, застосовуваний у вартісних розрахунках грошових потоків, K_c – коефіцієнт зростання цін на природні ресурси (екосистеми). Останній

коефіцієнт може бути тільки менше за одиницю: якщо, наприклад, розмір діючих наразі квот збільшуватиметься у часі (а, безумовно, що так і буде у майбутньому) у двічі, то відповідно індекс Кц приймає значення 0,5; тоді скоригований коефіцієнт дисконтування (K_d^*) буде $2 \cdot K_d$. Тому опосередковано це враховує часовий вплив на вартість екосистем і їх послуг;

- по-третє, додатково додамо, щодо такого оцінювання: в Україні склалася досить невтішна ситуація, яка підтримувалася надто довгий період, з приводу нехтування екологічними проблемами і, звісно, вартісним оцінюванням екосистем так само. До речі, рентні платежі за використання природних ресурсів в нашій країні є незрівнянно меншими, ніж в інших; тобто, якщо ми у наших розрахунках плануємо використовувати розміри діючих наразі в Україні квот (наприклад, на викиди вуглекислого газу (грн./т) або на інші), то це дає підстави для припущення про діючу зараз в нашій економіці несправедливу, не ринкову, ціну (квоту) зазначених викидів. Тому варто було б передбачити збільшення такої ціни (квоти) у майбутньому. Тобто ця теза є ще додатковим аргументом для обґрунтованого припущення про умовне (не пряме, а опосередковане) дисконтування вартості екосистем.

Отже, викладені ідеї саме і реалізуються в наших розрахунках, що представлені далі.

Розрахунки щодо визначення вартості асиміляційних послуг лісових екосистем, що розташовані в межах територіальної громади с. Семенівка, подані у табличній формі (табл. 1).

Розрахунки щодо вартісного оцінювання асиміляційних послуг лісових екосистем територіальної громади с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ Миколаївської області *

№ п/п	Розрахунки
1	Вартісне оцінювання асиміляційних послуг лісових екосистем територіальної громади с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ Миколаївської області <i>Дані для розрахунків:</i> Ліси та інші лісом вкриті площі поблизу с. Семенівка, Булацелове й Остапівка Благодатненської ОТГ Миколаївської області розміщені на території 540,54 га, і представлені такими породами дерев: сосна, акація, тополя, дуб та ін. Породний склад насаджень ДП «Вознесенське лісове господарство»: сосна, дуб, ясен, акація, клен, горіх, в'яз, тополя, гледичія, горіх грецький, софора японська, чагарники (Irt, 2021). У с. Семенівка і поблизу села значно менше дубових насаджень. В заплавах лісах шириною 20-30 м ростуть ясен, берест (або в'яз граболистий), по балках – дуб наскельний, є багато шипшини, кущів глоду. На південній окраїні с. Семенівки росте акація. Є дубові лісосмуги. Оскільки ліси с. Семенівка, Булацелове й Остапівка Благодатненської ОТГ не відносяться ні до ДП «Вознесенське лісове господарство», ні до територіальних утворень, й не була здійснена інвентаризація лісів, тому наші розрахунки є дещо приблизними й базуються на фахово-експертному оцінюванні. Якщо в с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ соснових лісів більше, то це може бути близько 35 %, і якщо дубових лісів менше, тоді можна припустити, що в цьому регіоні дубових насаджень – 15 %. Якщо в переліку дерев усього ДП «Вознесенське лісове господарство» акації зазначені першими, а після них – то тополь і ще три види порід дерев, тоді акацій – 30 %, а тополь – 20 %. Отже: 1) соснові насадження – 189,19 га ($35 \% / 100 \% \times 540,54$ га); 2) акацієві насадження – 162,16 га ($30 \% / 100 \% \times 540,54$ га); 3) тополіні насадження – 108,11 га ($20 \% / 100 \% \times 540,54$ га); 4) дубові насадження – 81,08 га ($15 \% / 100 \% \times 540,54$ га).

1.1	<i>Вартість асиміляційних послуг (роботи асиміляційного потенціалу) сосни звичайної складає: 809,13 млн. грн. (14,4 т/га/рік × 990 грн./т. × 189,19 га × 300 років).</i> Для визначення цієї вартості узято: - маса викидів вуглекислого газу, яку поглинають сосни звичайні, – 14,4 т/га/рік; - вартість квот на викиди вуглекислого газу, грн./т. – 30 євро (Irt, 2021), або 990 грн./т.; - площа насаджень сосни звичайної у с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ – 189,19 га; - тривалість життєвого циклу сосни складає більше 300 років.
1.2	<i>Вартість асиміляційних послуг (роботи асиміляційного потенціалу) акації складає: 240,81 млн. грн. (20,0 т/га/рік × 990 грн./т. × 162,16 га × 75 років).</i> Висхідні дані (за аналогією до п.1.1): - маса викидів вуглекислого газу, яку поглинають сосни звичайні, – 20,0 т/га/рік; - вартість квот на викиди вуглекислого газу, грн./т. – 30 євро (Irt, 2021), (990 грн./т.) - площа насаджень акації у с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ – 162,16 га; - тривалість життєвого циклу акації складає більше 75 років.
1.3	<i>Вартість асиміляційних послуг тополі (роботи асиміляційного потенціалу тополі) складає: 256,87 млн. грн. (40,0 т/га/рік × 990 грн./т. × 108,11 га × 60 років).</i> Висхідні дані (за аналогією до п.1.1): - маса викидів вуглекислого газу, який поглинають тополі, 40,0 т/га/рік; - вартість квот на викиди вуглекислого газу, грн./т. – 30 євро (Irt, 2021), (тобто 990 грн./т.); - площа насаджень тополь в с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) та поблизу – 108,11 га; - тривалість життєвого циклу тополі складає більше 60 років).
1.4	<i>Визначення вартості асиміляційних послуг дубу (або роботи асиміляційного потенціалу дубу) територіальної громади с. Семенівка без урахування коефіцієнтів</i>

	Вартість асиміляційних послуг (роботи асиміляційного потенціалу) дубу звичайного складає: 1 155,88 млн. грн. ($18 \text{ т/га/рік} \times 990 \text{ грн./т.} \times 81,08 \text{ га} \times 800 \text{ років}$). Висхідні дані (за аналогією до п.1.1): - маса викидів вуглекислого газу, яку поглинають дуби, – 18 т/га/рік; - вартість квот на викиди вуглекислого газу, грн./т. – 30 євро (Irt, 2021), (990 грн./т.); - площа насаджень дубу звичайного у с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ – 81,08 га; - тривалість життєвого циклу дубу складає більше 800 років.
Всього	Отже, вартість асиміляційних послуг <i>дерев</i> лісових екосистем (або роботи асиміляційного потенціалу дерев) с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ без врахування коефіцієнтів складає: 2 462,69 млн. грн., або 2,46 млрд. грн. (809,13 млн. грн. + 240,81 млн. грн. + 256,87 млн. грн. + 1 155,88 млн. грн.)
1.6	Визначення вартості асиміляційних послуг лісових екосистем (або роботи асиміляційного потенціалу дерев) с. Семенівка, Булацелове й Остапівка Благодатненської ОТГ Миколаївської області з урахуванням коефіцієнту, який характеризує асиміляційні властивості екосистем Вартість асиміляційних послуг лісових екосистем с. Семенівка, Булацелове й Остапівка Благодатненської ОТГ Миколаївської області з урахуванням коефіцієнту, який характеризує асиміляційні властивості екосистем, складатиме 2,56 млрд. грн. ($2,46 \text{ млрд. грн.} \times 1,04$ (коефіцієнт для Степової природної зони, де розміщено с. Семенівка)).
2	Вартісне оцінювання асиміляційних послуг підліску лісових екосистемних активів територіальної громади с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ Миколаївської області Ліси та інші лісом вкриті площі поблизу с. Семенівка, Булацелове й Остапівка Благодатненської ОТГ Миколаївської області розміщені на території 540,54 га, і таку площу має підлісок і трав'янистий ярус. В лісах підлісок поглинає CO_2 0,7 т/га на рік (Kravchuk, 2011, р. 13). Тоді вартість асиміляційних послуг підліску (або роботи його асиміляційного потенціалу) лісових екосистемних активів (капіталу) територіальної громади с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ Миколаївської області становитиме 0,01873 млрд. грн.

	$(0,7 \text{ т/га/рік} \times 990 \text{ грн./т.} \times 540,54 \text{ га} \times 50 \text{ років}).$ Висхідні дані (за аналогією до п.1.1): - маса викидів вуглекислого газу, який поглинає підлісок, 0,7 т/га/рік; - вартість квот на викиди вуглекислого газу, грн./т. – 30 євро (Irt, 2021), (990 грн./т); - площа підліску в с. Семенівка та поблизу – 540,54 га; - тривалість життєвого циклу підліску може складати і більше 50 років. Вартість асиміляційних послуг підліску лісових екосистем с. Семенівка, Булацелове й Остапівка Благодатненської ОТГ Миколаївської області з урахуванням коефіцієнту, який характеризує асиміляційні властивості екосистем, складатиме 0,019 млрд. грн. $(0,01873 \text{ млрд. грн.} \times 1,04 \text{ (коефіцієнт для Степової природної зони, де розміщено с. Семенівка)})$.
3	<i>Вартісне оцінювання асиміляційних послуг трав'янистого ярусу лісових екосистем територіальної громади с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ Миколаївської області</i> В лісах трав'янистий ярус поглинає CO₂ 0,6 т/га на рік (Kravchuk, 2011, р. 13). Вартість асиміляційних послуг трав'янистого ярусу лісів с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ Миколаївської області становитиме 0,00963 млрд. грн. $(0,6 \text{ т/га/рік} \times 990 \text{ грн./т.} \times 540,54 \text{ га} \times 30 \text{ років (деякі трави можуть на зиму завмирати, але навесні відновлюється)})$. Висхідні дані (за аналогією до п.1.1): - маса викидів вуглекислого газу, який поглинає трав'янистий ярус, 0,6 т/га/рік; - вартість квот на викиди вуглекислого газу, грн./т. – 30 євро (Irt, 2021) (990 грн./т); - площа трав'янистого ярусу с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ та поблизу – 540,54 га; - тривалість життєвого циклу трав'янистого ярусу може складати і більше 30 років. Вартість асиміляційних послуг трав'янистого ярусу лісових екосистем с. Семенівка, Булацелове й Остапівка Благодатненської ОТГ Миколаївської області з урахуванням коефіцієнту, який характеризує асиміляційні властивості екосистем, складатиме 0,01 млрд. грн. $(0,00963 \text{ млрд. грн.} \times 1,04 \text{ (коефіцієнт для Степової природної зони, де розміщено с. Семенівка)})$.

Разом	Тоді загальна вартість асиміляційних послуг лісових екосистем с. Семенівка, Булацелове й Остапівка Благодатненської ОТГ Миколаївської області буде становити 2,59 млрд. грн. (2,56 млрд. грн. + 0,019 млрд. грн. + 0,01 млрд. грн.).
--------------	---

** Розраховано Сухіною О.М.*

Вартісне оцінювання киснепродукуючих послуг лісових екосистем територіальної громади с. Семенівка

Крім асиміляційних, лісові екосистеми надають також киснепродукуючі послуги, які так само мають бути враховані і оцінені. Принципи їх оцінювання також базуються на визначенні корисності цих послуг для їх споживачів. Як зазначено нами вище, за умови, якщо вартість квот на викиди вуглекислого газу (CO₂) складає 30 євро/т в ЄС, то 1 т атмосферного кисню коштує 41,3 євро (30/0,727) (Irt, 2021). Для оцінювання вартості асиміляційного потенціалу екосистем ми використовували курс євро до гривні – 33 грн., тому і в цих розрахунках зупинимося на цій цифрі. Тоді вартість 1 т кисню складатиме 1 362,9 грн.

Нашим завданням є спрощення розрахунків для територіальних громад. І, оскільки, знайти всі дані досить важко, можна визначити киснепродуктивність лісів наступним чином (маючи на увазі, що нами здійснюються розрахунки для змішаних лісів, де переважає сосна):

- для насадження лісів використовувати ціну – 20,0 тис. грн.,
- для щорічного догляду (більше, ніж для насадження лісу) скористаємося вартістю у 23,0 тис. грн.;
- тривалість життєвого циклу таких лісів – 80 років.

Тобто, можна здійснювати таку вартісну оцінку не для кожної породи дерев, а для лісів: хвойних, листяних, змішаних. Змішані ліси та інші лісом вкриті площі поблизу с. Семенівка, Булацелове й Остапівка Благодатненської ОТГ Миколаївської області розміщені на території 540,54 га.

Розрахунки здійснено зазначено у табл. 2.

Розрахунки щодо вартісного оцінювання киснепродукуючих послуг лісових екосистем територіальної громади с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка)

Благодатненської ОТГ Миколаївської області *

№ п/п	Розрахунки
1.	Вартісне оцінювання киснепродукуючих послуг лісових екосистем територіальної громади с. Семенівка Благодатненської ОТГ Миколаївської області: 1) соснові насадження – 189,19 га (35 % / 100 % × 540,54 га); 2) акацієві насадження – 162,16 га (30 % / 100 % × 540,54 га); 3) тополіні насадження – 108,11 га (20 % / 100 % × 540,54 га); 4) дубові насадження – 81,08 га (15 % / 100 % × 540,54 га).
1.1	Вартість киснепродукуючих послуг сосни звичайної складає: 626,57 млн. грн. (8,1 т/га/рік × 1 362,9 грн./т × 189,19 га × 300 років). Для визначення цієї вартості узято: - кількість кисню (O₂), який виділяється за 1 рік з 1 га поверхні насаджень сосни, – 8,1 т/га/рік; - вартість кисню – 1 362,9 грн./т.; - площа насаджень сосни звичайної у с. Семенівка Благодатненської ОТГ – 189,19 га; - тривалість життєвого циклу сосни складає більше 300 років.
1.2	Вартість киснепродукуючих послуг акації складає: 99,45 млн. грн. (6,0 т/га/рік × 1 362,9 грн./т. × 162,16 га × 75 років). Висхідні дані (за аналогією до п.1.1): - кількість кисню (O₂), який виділяється за 1 рік з 1 га поверхні насаджень акації, – 6 т/га/рік; - вартість кисню – 1 362,9 грн./т.; - площа насаджень акації у с. Семенівка Благодатненської ОТГ – 162,16 га; - тривалість життєвого циклу акації складає більше 75 років.
1.3	Вартість киснепродукуючих послуг тополі складає: 297,04 млн. грн. (33,6 т/га/рік × 1 362,9 грн./т. × 108,11 га × 60 років). Висхідні дані (за аналогією до п.1.1): - кількість кисню (O₂), який виділяється за 1 рік з 1 га поверхні насаджень

	тополі, 33,6 т/га/рік; - вартість кисню – 1 362,9 грн./т.; - площа насаджень тополь в с. Семенівка та поблизу – 108,11 га; - тривалість життєвого циклу тополі складає більше 60 років.
1.4	Вартість киснепродукуючих послуг дубу звичайного складає: 751,43 млн. грн. (8,5 т/га/рік × 1 362,9 грн./т. × 81,08 га × 800 років). Висхідні дані (за аналогією до п.1.1): - кількість кисню (O₂), який виділяється за 1 рік з 1 га поверхні насаджень дубу, – 8,5 т/га/рік; - вартість кисню – 1 362,9 грн./т.; - площа насаджень дубу звичайного у с. Семенівка Благодатненської ОТГ – 81,08 га; - тривалість життєвого циклу дубу складає більше 800 років.
Всього	Отже, вартість киснепродукуючих послуг дерев лісових екосистем с. Семенівка Благодатненської ОТГ без врахування коефіцієнтів складає: 1 774,49 млн. грн., або 1,77 млрд. грн. (626,57 млн. грн. + 99,45 млн. грн. + 297,04 млн. грн. + 751,43 млн. грн.)
2	Вартісне оцінювання киснепродукуючих послуг підліску лісових екосистем територіальної громади с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ Миколаївської області Ліси та інші лісом вкриті площі поблизу с. Семенівка, Булацелове й Остапівка Благодатненської ОТГ Миколаївської області розміщені на території 540,54 га, і таку площу має підлісок і трав'янистий ярус. В лісах підлісок виділяє кисню (O₂) 0,5 т/га на рік (BRAVERZ TO BE UKRAINE [BTU], 2021, р. 13). Тоді вартість киснепродукуючих послуг підліску лісових екосистемних активів (капіталу) територіальної громади с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ Миколаївської області становитиме 0,018 млрд. грн. (0,5 т/га/рік × 1 362,9 грн./т. × 540,54 га × 50 років). Висхідні дані (за аналогією до п.1.1): - виділення кисню (O₂) підліском – 0,5 т/га/рік; - вартість кисню – 1 362,9 грн./т.; - площа підліску в с. Семенівка та поблизу – 540,54 га; - тривалість життєвого циклу підліску може складати і більше 50 років.

3	Вартісне оцінювання киснепродукуючих послуг трав'янистого ярусу лісових екосистем територіальної громади с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ Миколаївської області В лісах трав'янистий ярус кисню (O₂) виділяє 0,5 т/га на рік (BTU, 2021, р. 13). Вартість киснепродукуючих послуг трав'янистого ярусу лісів с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ Миколаївської області становитиме 0,011 млрд. грн. (0,5 т/га/рік × 1 362,9 грн./т. × 540,54 га × 30 років (деякі трави можуть на зиму завмирати, але навесні відновлюються)). Висхідні дані (за аналогією до п.1.1): - трав'янистий ярус виділяє кисню (O₂) – 0,5 т/га/рік; - вартість кисню – 1 362,9 грн./т.; - площа трав'янистого ярусу с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ та поблизу – 540,54 га; - тривалість життєвого циклу трав'янистого ярусу може складати і більше 30 років.
Разом	Тоді загальна вартість киснепродукуючих послуг лісових екосистем с. Семенівка, Булацелове й Остапівка Благодатненської ОТГ Миколаївської області, буде становити 1,8 млрд. грн. (1,77 млрд. грн. + 0,018 млрд. грн. + 0,011 млрд. грн.).

** Розраховано Сухіною О.М.*

Узагальнення результатів дослідження та поширена апробація авторської методики. Таким чином, у таблицях 1 і 2 детально наведені розрахункові процедури з оцінювання вартості асиміляційних і киснепродукуючих послуг лісових екосистем територіальної громади с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ Миколаївської області. Ця методика є універсальною для оцінки будь-яких екосистем і може бути застосована в інших оціночних процедурах. В табл. 3 наводяться результати апробації авторської методики, представлені остаточні результати такого оцінювання.

Таблиця 3

Вартість екосистемних (асиміляційних та киснепродукуючих) послуг
с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ Миколаївської
області, млрд. грн. *

Територіальна громада	Площа лісів, га	Вартість екосистемних послуг:		
		асиміляційних	киснепродукуючих	асиміляційних та киснепродукуючих (разом)
с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ Миколаївської області	540,54	2,59	1,80	4,39

* Розраховано Сухіною О.М.

Як свідчать результати оціночних розрахунків (табл. 3), Україна має досить значний у вартісному вимірі потенціал лісових екосистем.

Повертаючись до анонсованої мети цього дослідження, варто вказати на практичну спрямованість проведених нами розрахунків. Їх результати мають бути враховані при відшкодуванні збитків українським екосистемам, а, отже, і екологічній безпеці та всій системі національної безпеки України, що були завдані і завдаються їм російською країною-агресором. Крім того, відшкодування із справедливим вартісним оцінюванням екосистем має стати базою для реформування податкового екологічного законодавства України, що також відповідає інтересам держави (українському народу або територіальним громадам).

Висновки

Таким чином, сформований і обґрунтований нами власний підхід і розроблена методика визначення вартості екосистемних (асиміляційних та киснепродукуючих) послуг дав змогу оцінити такі. За розробленою методикою здійснено оцінку таких послуг для частини лісів національного парку «Бузький

Гард», а саме – лісів, які розташовані в межах територіальної громади с. Семенівка, Булацелове й Остапівка Благодатненської ОТГ Миколаївської області. Пропонований підхід і методика оцінювання є науковою новизною даного дослідження і можуть сприяти розвитку економічної теорії оцінювання природних ресурсів.

Вартість асиміляційних послуг лісових екосистем визначена нами через добуток маси викидів вуглекислого газу, який поглинають рослини, вартість квот на викиди вуглекислого газу, площі зелених насаджень та тривалості життєвого циклу рослин. Вартість киснепродукуючих послуг лісових екосистем визначається через добуток кількості кисню, який виділяється за 1 рік з 1 га поверхні насаджень, вартості кисню, площі лісової екосистеми та тривалості життєвого циклу рослин лісової екосистеми (дерев, підліску, трав'яного ярусу).

Детально авторська методологія оцінювання включає наступні позиції: формалізацію запропонованої методології; метод визначення вартості екосистемних послуг лісів; метод непрямого (опосередкованого) врахування часового фактору в оціночних процедурах вартості екосистем та їх послуг (асиміляційних та киснепродукуючих); визначення коригуючих коефіцієнтів врахування інтенсивності киснепродукуючих послуг екосистем та поправочних коефіцієнтів до них; врахування коефіцієнту лісистості території України, віку лісів, їх функцій; обґрунтування визначення вартості вуглекислого газу, кисню; визначення тривалості життєвого циклу окремих порід дерев та кущів; розміру кореляційних коефіцієнтів урахування асиміляційних властивостей екосистем та ін.

В результаті дослідження отримано: вартість асиміляційних послуг лісових екосистем для с. Семенівка (та Булацелове й Остапівка) Благодатненської ОТГ Миколаївської області – 2,59 млрд. грн.; вартість киснепродукуючих послуг лісів цієї ОТГ складає 1,8 млрд. грн.; сумарна вартість асиміляційних та киснепродукуючих послуг – 4,39 млрд. грн.

Це також має практичне застосування у питаннях відшкодування Україні усієї шкоди, нанесених війною РФ проти нашої країни. А, як зазначалося, такі збитки є величезними, але точної їх оцінки поки що не здійснено. Тому презентована методика пропонується до використання під час визначення розмірів відшкодування з боку РФ збитків нашої країни. В цілому, це сприятиме забезпеченню нашої України як незалежної суверенної держави та зміцнить систему її національної безпеки.

Список літератури

- Antonenko, V. M. (2022). Sustainability and security of the financial system of Ukraine – the economic component of its victory. *The russian-ukrainian war (2014–2022): historical, political, cultural-educational, religious, economic, and legal* (pp. 9-17). Retrieved from <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-223-4-2>.
- Boldyrev, V. (2001). *Atmosfernym kislorodom – po globalizacii i kreditoram. Znachimyj faktor geopolitiki, nacional'noj bezopasnosti i pogasheniya dolgov Rossii* [Atmospheric oxygen – according to globalization and creditors. A significant factor in geopolitics, national security and the repayment of Russia's debts]. Retrieved from http://www.promved.ru/mart_2001_01.shtml.
- Braverz to be Ukraine (2021). *Semenivka, Arbuzinsky district on the map of Ukraine* [Semenivka, Arbuzynskiyi raion na karti Ukrainy] Retrieved from <https://ua.igotoworld.com/ua/map/398490-semenivka-geo.htm>.
- Institut razvitiya tekhnologij TEK (IRTTEK) [Institute for the Development of Technologies in the Fuel and Energy Complex (IRTTEK)]. (2021). *How much CO2 do trees take in? The question that will bring down the market* [Skol'ko SO2 pogloshchayut derev'ya? Vopros, kotoryj obrushit rynok] Retrieved from <https://nangs.org/news/ecology/skolyko-so2-pogloshtayut-derevyaya-vopros-kotoryy-obrushit-rynok>.

- Kravchuk, L. A. (2011). *Strukturno-funkcional'naya organizaciya landshaftno-rekreacionnogo kompleksa v gorodah Belarusi* [Structural and functional organization of the landscape and recreational complex in the cities of Belarus]. Minsk, Belarus: Nauka. 171 p.
- SE «Voznesen Forestry» [DP «Voznesenske lisove hospodarstvo»]. (2021). Retrieved from http://mikolaivlis.gov.ua/struktura_post.php?id=5.
- Tovarystvo lisivnykiv Ukrainy [Society of Foresters of Ukraine]. (2021). *General characteristics of the forests of Ukraine* [Zahalna kharakterystyka lisiv Ukrainy]. Retrieved from <https://tlu.kiev.ua/nasha-dijalnist/profesiin.-pro-lis/objektivna-informacija-shchodo-lisiv.html>.

ЕКОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ НА ІСНУЮЧИХ АЕС

Уланов М.М., Інститут технічної теплофізики НАН України, к. т. н., ст. н. с.,
Україна

Abstract

The article considers assessment of the environmental impacts of electricity production on the environment for various energy sources based on the analysis of the life cycle of the power plant based on international standards. Between all types of generation, nuclear power produces almost 80 times less CO₂ emissions than coal generation, 4 times less than solar power generation, and 2 times less than hydro generation.

Вступ

Два роки тому Європа оголосила про свої плани до 2050 року зробити наш континент кліматично нейтральним завдяки низці глобальних енергетичних програм. У найближчі кілька років Європа має намір прискореними темпами створити нову глобальну структуру економіки, яка базуватиметься на відновлюваних джерелах енергії, зокрема водневій енергетиці.

У водневій стратегії Європейського союзу («Воднева стратегія для кліматично-нейтральної Європи») йдеться про план, згідно з яким ЄС до 2030 року знадобиться 40 ГВт електролізерів на території блоку та 40 ГВт у сусідніх країнах для експорту водню до Євросоюзу (European commission, 2020). При цьому на території ЄС буде вироблятися до 10 млн т водню. Технологічна позиція Європи на світовому ринку водню оцінюється як лідируюча, і очікується, що у водневому секторі Європи, по всьому ланцюжку, може бути створено близько 1 млн робочих місць. Єврокомісія вважає нашу країну пріоритетним партнером у розвитку водневої енергетики з огляду на

природні ресурси України, виробничі можливості, розгалужену національну мережу трубопровідного транспорту, що з'єднана з європейською мережею та інфраструктуру для зберігання. У нашій країні також є потужна атомна енергетика.

Водень використовується у різних промислових процесах, починаючи від виробництва синтетичного палива та нафтохімії, до виготовлення напівпровідників та електромобілів на водневих паливних елементах.

Сьогодні більша частина (~95-97 %) водню виробляється шляхом парового риформінгу природного газу або газифікації вугілля з викидами двоокису вуглецю (CO_2). На щорічне виробництво водню витрачається близько 205 млрд m^3 природного газу (6 % світового споживання природного газу) та 107 млн т вугілля (2 % світового використання вугілля).

Це неприйнятно у світлі глобального переходу до екологічно чистої енергії, особливо з огляду на те, що попит вже досить високий і продовжує зростати. За даними Міжнародного енергетичного агентства, з 1975 року попит на водень збільшився більш ніж утричі.

Щоб зменшити шкідливий вплив на навколишнє середовище через виробництво 70 млн тон водню на рік, деякі країни звертаються до ядерної енергетики. Переведення лише 4 % поточного виробництва водню на електроенергію, що виробляється на АЕС, дозволив би зменшити викиди вуглекислого газу на 60 млн тон на рік, а якби весь водень вироблявся з використанням ядерної енергії, то можна було б говорити про скорочення викидів вуглекислого газу на більш ніж 500 млн тон на рік.

Мета дослідження за допомогою аналізу життєвого циклу заснованого на міжнародних стандартах оцінити екологічний вплив виробництва електроенергії на навколишнє середовище для різних джерел енергії та визначити екологічні переваги генерації електричної енергії на існуючих блоках АЕС для виробництва екологічно-чистого водню в Україні.

Науково-дослідницькими завданнями дослідження є визначення екологічних показників впливу на навколишнє середовище різних технологій генерації електричної енергії, зокрема технологій використання енергії сонця, вітру та атомної енергії з метою виробництва екологічно-чистого водню.

Основний текст

Нині кілька країн впроваджують виробництво водню з використанням АЕС або вивчають таку можливість з метою сприяння декарбонізації свого енергетичного, промислового та транспортного секторів. Це дозволяє також збільшити віддачу від АЕС, що сприятиме підвищенню її рентабельності.

Особливість ядерної енергетики – це робота при дуже високих коефіцієнтах використання встановленої потужності, що дозволяє виробляти водень з нульовим викидом вуглецю в досить великому обсязі як енергоносіє, що розвивається, з широким спектром застосувань.

Водень, отриманий за допомогою ядерної енергії, є економічно доцільним порівняно з іншими джерелами енергії за деякими важливими показниками:

- по-перше, це більш якісний процес виробництва, оскільки тільки ядерна енергетика має найвищу ефективність отримання енергії без викидів парникових газів;
- по-друге, є можливість створення великомасштабного виробництва водню;
- по-третє, експлуатаційні витрати станцій менш схильні до волатильності цін на паливо, ніж електростанції, що працюють на викопному паливі. Так, підвищення вартості палива на 50 % призводить лише до ~5 % збільшення загальної вартості виробництва ядерної електроенергії, тобто ядерна економіка виробництва водню стабільніша.

У сукупності ядерна енергетика допомагає зміцнити енергетичну безпеку. Таким чином, водень, який отримується на АЕС – це відносно дешевий чистий продукт у великих обсягах. Водночас водень є акумулятором енергії, і збільшення обсягів виробництва водню збільшує і потужність ядерної енергії,

тобто вирішуються деякі проблеми атомної енергетики, зокрема підвищує її рентабельність.

В рамках запущеної на початку 2020 року Міністерством енергетики Сполучених Штатів ініціативи «H2@Scale» проводиться дослідження доцільності розробки ядерно-енергетичних систем, що водночас вироблятимуть водень і низьковуглецеву електроенергію (Ruth et al, 2020). Серед десятків проектів, які фінансуються за допомогою цієї ініціативи, один буде реалізовано трьома комерційними електроенергетичними компаніями США у співпраці з Айдахською національною лабораторією Міністерства енергетики. До проекту увійдуть технічні та економічні оцінки, а також експериментальні демонстрації виробництва водню на кількох АЕС що розташовані на території США.

Одна з компаній, яка бере участь у проекті це електроенергетична компанія «Exelon», яка є найбільшим виробником низьковуглецевої електроенергії в США, в даний час робить кроки зі встановлення на одній зі своїх АЕС електролізера з полімерною електролітичною мембраною потужністю один мегават з відповідною інфраструктурою. За допомогою цієї системи, яка може бути введена в експлуатацію до 2023 року, можна буде наочно побачити економічну доцільність виробництва водню при використанні електролізних установок для задоволення потреб систем, пов'язаних із виробництвом електроенергії на місці, а також можливість масштабування у майбутньому.

У Великобританії також відбуваються роботи з проведення оцінок. У рамках некомерційної ініціативи «Energy Systems Catapult» створено модель цілої енергетичної системи, і тепер до неї включено можливість використання передових ядерних технологій для виробництва водню (IEA, 2022). Таким чином, можна подивитися на потенційно найбільш економічну структуру енерговиробництва, яка до 2050 року зможе забезпечити нульові викиди парникових газів у чистому вираженні, а результати покажуть, що вдосконалені

ядерні реактори можуть бути задіяні у виробництві водню поряд з іншими технологіями.

Французька державна компанія «EDF» з метою підвищення рентабельності двох атомних електростанцій, що будуються у Великобританії, має намір використовувати частину енергії другого енергоблоку електростанції Sizewell C для електролізу (Sizewell, 2020). Модульний характер електролізерів означає, що їх також можна використовувати на другій АЕС – Hinkley Point C. «EDF» має намір використовувати надмірну потужність своїх АЕС у періоди надвиробництва, щоб за допомогою електролізу виробляти водень.

Доповідь МЕА «Майбутнє водню» за 2019 рік показує, що нормована вартість водню (LCOH) залежить від кількості годин, протягом яких працює електролізер. Якщо електролізер працює 500 годин на рік, то можна виробити водень із LCOH близько 4 доларів за кілограм. Однак, якщо він працює протягом 8000 годин на рік, вартість падає до 0,50 долара за кілограм (The Future of Hydrogen, 2019). Французька компанія має намір встановити експериментальний електролізер потужністю 2 МВт, який вироблятиме водень обсягом 800 кілограмів на добу. До 2035 року потужність може збільшитися до 550 МВт при добовому виробленні 220 тон EDF очікує, що LCOH складе близько 2,44 євро за кілограм протягом 20-річного проектного циклу з урахуванням ціни на електроенергію та витрат на технології.

Атомні електростанції – найбільше джерело низьковуглецевої електроенергії серед базових видів генерації електричної енергії (IEA, 2019). Найбільш показове дослідження щодо рівня викидів CO₂ на кВт·год виробленої електроенергії здійснила Міжурядова група з питань зміни клімату (Edenhofer et al, 2014).

Україна належить до держав, які мають розвинену галузь ядерної енергетики. За часткою генерації АЕС у сукупному виробництві електроенергії Україна посідає четверте місце у світі після Франції, Словаччини та Угорщини. В Україні експлуатується 15 енергоблоків загальною потужністю 13,835 ГВт на

чотирьох АЕС: 6 – на Запорізькій, 4 – на Рівненській, 3 – на Південно-Українській та 2 – на Хмельницькій.

В цьому дослідженні вплив на навколишнє середовище представлений у вигляді викидів:

- парникові гази отримані при спалюванні викопного палива (виражені в еквівалентах вуглекислого газу);
- оксиди азоту;
- діоксид сірки.

Ефекти впливу цих викидів представлені в таблиці 1. Еквівалент вуглекислого газу – розглядає різні внески, які різні парникові гази вносять у глобальне потепління, і визначає, скільки вуглекислого газу потрібно було б викинути, щоб мати такий же вплив на клімат. Метан, наприклад, сприяє глобальному потеплінню в 25 разів більше, ніж вуглекислий газ.

Таблиця 1

Вплив на здоров'є та навколишнє середовище різних чинників

Вид забруднюючих газів	Джерело потрапляння	Вплив на здоров'є людини та навколишнє середовище
Вуглекислий газ еквівалент CO ₂ , парникові гази	Вміст вуглецю у паливі Емісія метану та вуглецю при видобутку вугілля	Внесок у глобальне потепління (враховується лише викопне паливо, яке збільшує чисти викиди двоокису вуглецю).
Оксиди азоту NO _x	Умови горіння: температура, тривалість та надлишок повітря	Закислення Евтрофікація Шкідливий для здоров'я при вдиханні Сприяють утворенню приземного озону
Діоксид сірки SO ₂	Вміст сірки у паливі	Закислення Вплив на здоров'я людей, які мають проблеми з диханням

Поточні показники впливу на навколишнє середовище для різних джерел в процесі експлуатації енергоустановок наведено в таблиці 2 в перерахунку на генерацію 1 ГВт електричної енергії.

Таблиця 2

Порівняння показників впливу на навколишнє середовище різних джерел генерації електроенергії

Показник	Джерела генерації електричної енергії						
	Вугілля	Нафта	Газ	Ядерна	Гідро	Сонце	Вітер
Відчуження земель, га/ГВт	24	2017	150	63	2650	2400	7100
Викиди CO ₂ , млрд м ³ /ГВт·год	4,0	3,2	0,3	-	-	-	-
Викиди SO ₂ , тис. т/ГВт·год	54	121	40	-	-	-	-
Викиди NO _x , млрд м ³ /ГВт·год	12,7	4,1	2,6	-	-	-	-
Викиди твердих частинок (пил), т/ГВт·год	1600	2190	930	-	-	-	-

Оцінка життєвого циклу заснована на міжнародних стандартах ISO 14040 та ISO 14044. Вплив виробництва електроенергії на навколишнє середовище описується з точки зору життєвого циклу, включаючи будівництво та демонтаж електростанцій, виробництво палива, експлуатацію та поводження з залишковими продуктами. Оцінка життєвого циклу надає інформацію про викиди за нормальної експлуатації, що означає, що поломки або аварії не враховуються. Основний вплив на довкілля який завжди відбувається у процесі експлуатації станції. Для одних технологій вирішальним є етап будівництва, а інших домінує виробництво палива. Оцінка життєвого циклу проводиться відповідно до міжнародної системи EPD[®] та її методології.

За визначенням цілей та обсягу оцінки життєвого циклу слід інвентаризаційний аналіз, у ході якого намічається життєвий цикл та узагальнюється використання ресурсів та викидів від усіх підпроцесів. Результат ділиться на електроенергію, вироблену протягом терміну служби станції, що дає вплив на довкілля на вироблений кВт·год.

Системні межі та принципи розподілу для оцінки життєвого циклу ґрунтуються на міжнародних нормах, які містяться в Правилах категорій продукції (PCR), визначених у Міжнародній системі екологічних декларацій продукції (EPD[®]). Розподіл між електроенергією та теплом базується на застосовному PCR для виробництва електроенергії.

На рисунках (рис. 1-3), наведені дані для атомної, гідро- та вітрової енергетики базуються на результатах EPD для кожного джерела енергії. Дані для сонячної енергії не відповідають усім вимогам у правилах категорії EPD, оскільки використовувалися більш загальні вихідні дані.

Екологічні параметри для різних джерел енергії виражаються в грамах на кВт·год виробленої електроенергії. Відображення викидів на генерований кВт·год дозволяє представити різні джерела енергії незалежно від електричної потужності станцій.

На рисунках викиди розподілені за чотирма етапами життєвого циклу.

- виробництво палива – виробництво та транспортування палива;
- експлуатація – експлуатація електростанції, включаючи звичайне поводження з відходами:
 - інфраструктура – будівництво, обслуговування та демонтаж електростанції;
 - поводження з радіоактивними відходами – радіоактивних відходів атомних електростанцій.

Слід зазначити, що різні джерела електроенергії не можуть бути повністю замінені один одним, оскільки вони виконують різні функції в системі постачання електричної енергії.

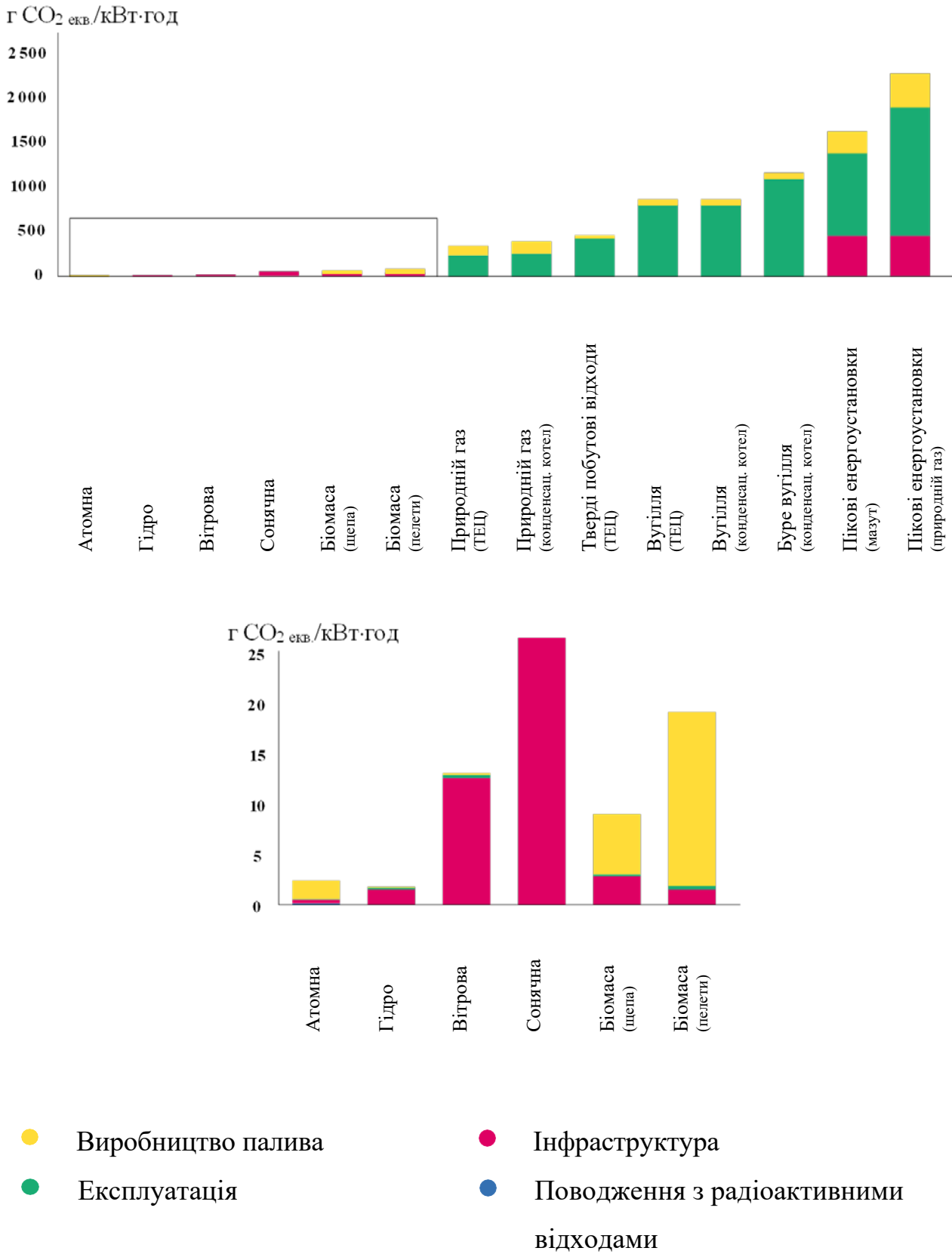


Рис. 1. Викиди парникових газів (еквівалент вуглекислого газу) з точки зору життєвого циклу для різних джерел генерації електричної енергії

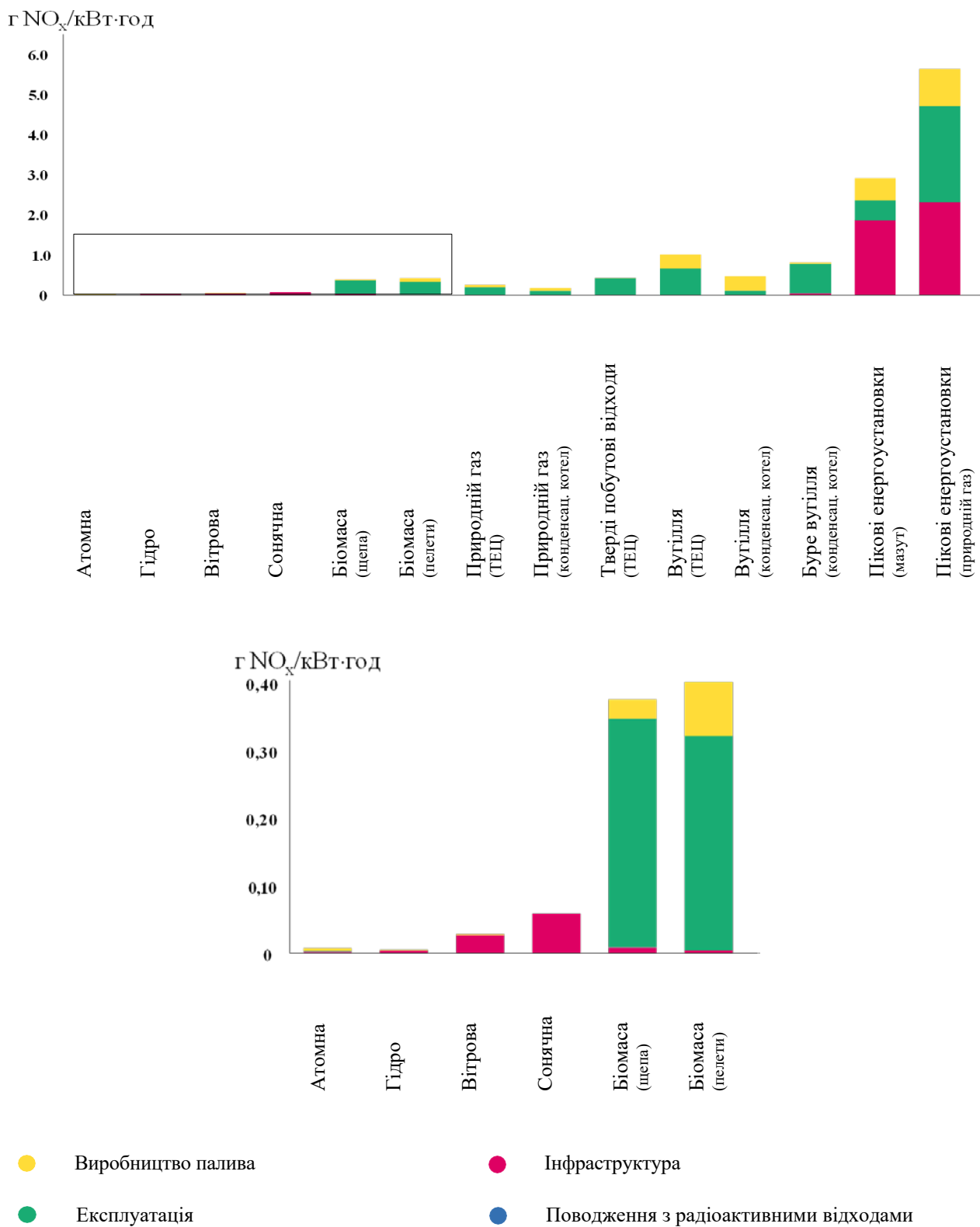


Рис. 2. Викиди оксидів азоту з точки зору життєвого циклу
для різних джерел генерації електричної енергії

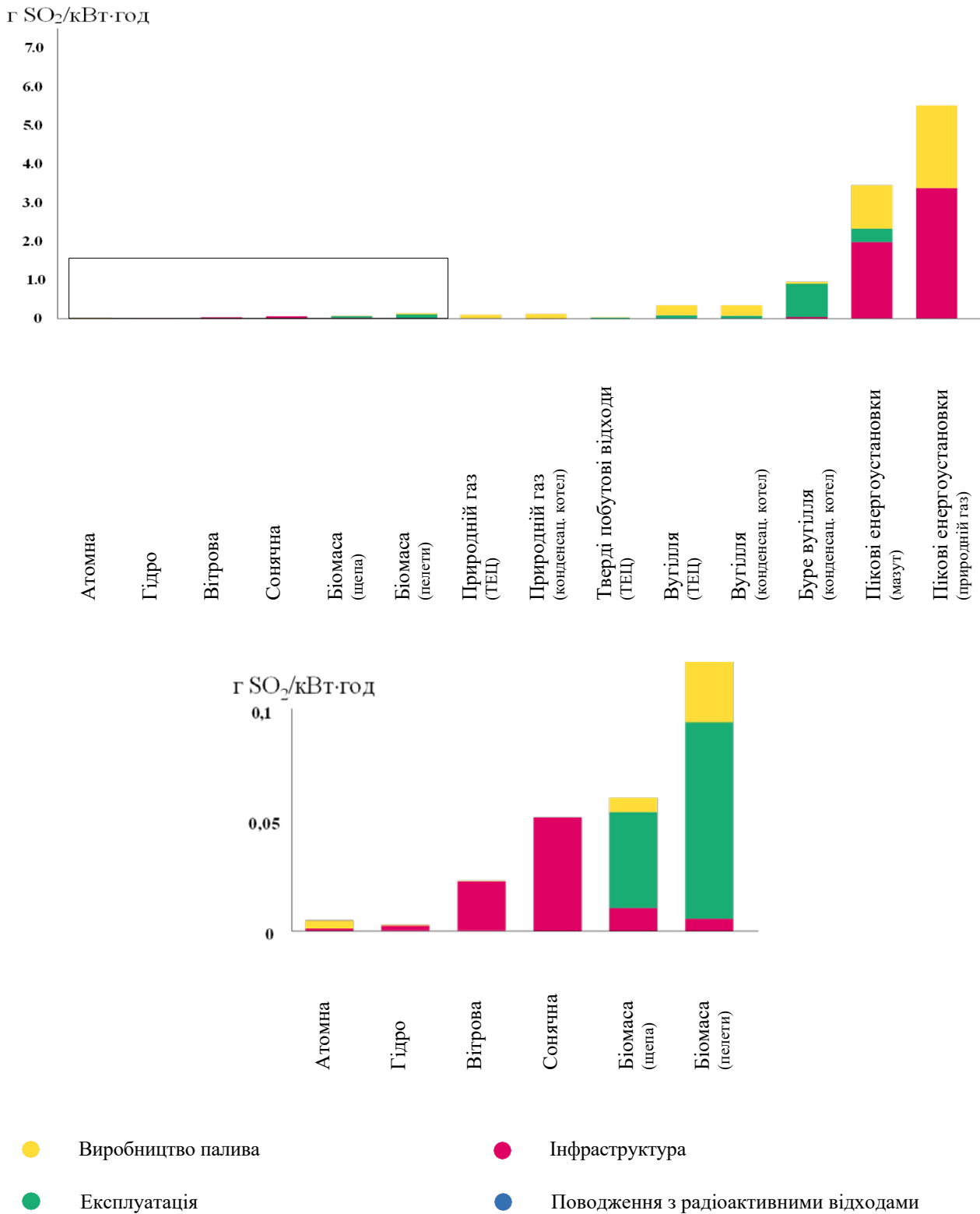


Рис. 3. Викиди діоксидів сірки з точки зору життєвого циклу
для різних джерел генерації електричної енергії

Вплив на навколишнє середовище різних джерел генерації електричної енергії. Атомна енергетика забезпечує низькі викиди вуглекислого газу протягом усього життєвого циклу. Найбільша частка цього впливу на навколишнє середовище виникає через виробництво палива – більше половини викидів у повітря протягом життєвого циклу виробляється на цьому етапі. Виробництво палива охоплює транспортування, видобуток урану, конверсію, збагачення та виготовлення палива. Використання резервного джерела живлення, виробництво хімічних реактивів і транспортування радіоактивних відходів є основними причинами викидів від роботи атомної електростанції.

Вплив гідроенергетики на навколишнє середовище є найбільшим під час будівництва та реінвестування, насамперед від виробництва сталі та бетону, що призводить до викидів вуглекислого газу, діоксиду сірки та оксидів азоту. Робота гідроелектростанцій забезпечує низькі викиди. Ті, що трапляються, здебільшого викликані транспортуванням у поєднанні з перевітками та техобслуговуванням. Якщо розширити сферу застосування для включення інших парникових газів, окрім газів викопного походження, викиди від змін землекористування, таких як затоплені землі, роблять значний внесок. Ґрунт містить органічні сполуки вуглецю та поживні речовини, які поступово розщеплюються та вивільняються внаслідок затоплення.

Енергія вітру є відновлюваним джерелом енергії, яке спричиняє дуже низькі викиди протягом свого життєвого циклу. Вплив на навколишнє середовище на етапі будівництва домінує в життєвому циклі вітрової енергії. Виробництво сталі, бетону та композитів є основним джерелом викидів. Приблизно половина викидів парникових газів виникає в результаті виробництва сталі для турбін.

Сонячна енергія є відновлюваним джерелом енергії, яке спричиняє дуже низькі викиди на етапі експлуатації протягом життєвого циклу. Вплив на навколишнє середовище в основному відбувається на етапі будівництва, а виробництво фотоелектричного елемента та його компонентів є основним

джерелом викидів. Вплив на виробництва кВт·год електричної енергії також залежить від того, де розташовані панелі.

Викиди вуглекислого газу вугільною електростанцією відбуваються здебільшого на етапі експлуатації в результаті спалювання вугілля. Видобуток вугілля та транспортування також мають вплив. Видобуток вугілля використовує машини та різноманітні транспортні засоби для транспортування вугілля з району видобутку. Видобуток корисних копалин також може призвести до викиду відносно великої кількості метану, але це значно відрізняється від шахти до шахти.

Спалювання біомаси призводить до викидів вуглекислого газу, діоксиду сірки та оксидів азоту. Однак вважається, що вуглекислий газ не сприяє глобальному потеплінню, оскільки біомаса зв'язує вуглекислий газ шляхом фотосинтезу під час свого зростання. Навпаки, виробництво палива призводить до викидів викопного вуглекислого газу різних типів. Викиди відбуваються переважно під час транспортування та переробки, а також у лісовому чи сільському господарстві, залежно від походження палива.

Спалювання природного газу призводить до нижчих рівнів викидів вуглекислого газу порівняно з іншими викопними джерелами енергії. Вплив природного газу на навколишнє середовище здебільшого виникає на етапі експлуатації в результаті спалювання, яке виділяє вуглекислий газ і оксиди азоту. Однак викиди діоксиду сірки дуже обмежені, оскільки паливо не містить сірки. Природний газ часто транспортується по трубопроводах, де може статися певний витік.

Для мазутних конденсаційних і газотурбінних електростанцій як експлуатація, так і інфраструктура мають високий вплив на навколишнє середовище. Значний вплив інфраструктури пояснюється дуже обмеженою кількістю робочих годин на рік, і оскільки результати нормалізуються на генеровану кВт·год, вплив стає значним.

Виробництво палива становить більше половини викидів у повітря за

життєвий цикл ядерної енергетики. Вибір постачальника в паливному ланцюжку має велике значення, особливо щодо видобутку та збагачення урану. Важливе значення має вміст урану в руді. Шахти з низьким вмістом урану або ті, що використовують електроенергію з викопного палива, мають більший вплив на навколишнє середовище. Те саме стосується і вибору методу збагачення. Вирішальне значення має споживання електроенергії та палива на різних етапах обробки. Споживання електроенергії може відрізнятись в десять разів для різних методів збагачення. Навіть суміш виробництва електроенергії, що використовується постачальниками, має велике значення. Велика частка електроенергії з викопного палива призведе до більшого впливу на навколишнє середовище через викиди в повітря.

Кількість матеріалів за встановленою потужністю є ключовим параметром для екологічного профілю типів електроенергії, що використовують поточні джерела енергії (енергія вітру, гідроенергії), як і вибір матеріалів, які будуть використовуватися. Як правило, чим більша кількість матеріалів і чим вони дефіцитніші, тим більший їхній вплив на навколишнє середовище.

Іншим важливим фактором є те, де були вироблені матеріали та яка електроенергія використовувалася в процесі виробництва. Виробництво електроенергії на основі викопного палива та великі відстані транспортування призводять до більших викидів у повітря. Крім того, ефективність перетворення потокової енергії в електроенергію має важливе значення для екологічного профілю, а доступність поточної енергії протягом року також має великий вплив на загальні результати. Чим довше працює установка, тим менший її вплив на навколишнє середовище в розрахунку на вироблену кВт·год електричної енергії. Гарне розташування для вітру збільшує потужність турбіни протягом терміну служби, що призводить до меншого впливу на навколишнє середовище.

Для спалювальних установок, що працюють на викопному паливі або

біомасі, критичним фактором є ефективність, тобто наскільки ефективно енергія в паливі перетворюється на електрику. Чистота палива та ефективність очищення димових газів також впливають на вплив на навколишнє середовище. Чим нижчий ККД, тим більший вплив виробництва палива на результати, оскільки більше палива використовується на кВт·год, виробленого при нижчих рівнях ККД. Теплоелектростанція має вищий ККД порівняно з електростанцією або теплоелектростанцією і, таким чином, позитивно впливає на вплив на навколишнє середовище.

Загалом, транспортні відстані між видобутком і спалюванням дуже важливі для впливу біомаси на навколишнє середовище. Це навіть більше, ніж для інших видів палива; оскільки вміст енергії в біомасі, як правило, нижчий, ніж, наприклад, у вугіллі. Однак у наведених тут випадках паливо видобувається локально, тому транспортні відстані між видобутком і використанням відносно короткі. Дані для установок з піковим навантаженням (мазутних конденсаційних і газових турбін) були отримані від старих установок з відносно низьким рівнем ефективності та обмеженим (або відсутнім) очищенням димових газів. Оскільки установки з піковим навантаженням працюють лише кілька годин на рік, допускаються вищі викиди.

Мінімальне та максимальне значення показників викидів CO₂ на всьому життєвому циклі кожного з видів генерації наведено у таблиці 3. Атомна енергетика поміж усіх видів генерації здійснює майже в 80 разів менше викидів CO₂, ніж вугільна генерація, у 4 рази менше, ніж сонячна, та у 2 рази менше за гідрогенерацію (Schlömer, 2018).

Викиди на етапі життєвого циклу, г CO₂ екв./кВт·год

Вид генерації електричної енергії	Значення, г CO ₂ екв./кВт·год		
	Мін.	Сер.	Макс.
Вугілля	740	820	910
Газ – комбінований цикл	410	490	650
Біомаса – спільне спалювання	620	740	890
Біомаса – пряме спалювання	130	230	420
Сонячна енергія – сонячні електростанції	18	48	180
Геотермальна енергетика	6	38	79
Гідроелектростанції	1	24	2200
Концентрована сонячна	8,8	27	63
Прибережна вітроенергетика	8	12	35
Атомна енергетика	3,7	12	110
Наземна вітроенергетика	7	11	56

Висновки

В роботі розглянуто оцінка екологічних впливів виробництва електроенергії на навколишнє середовище для різних джерел енергії на основі аналізу життєвого циклу енергоустановки заснованого на міжнародних стандартах. Викиди на етапі будівництва домінують у впливі на навколишнє середовище тих джерел енергії, які не спалюють паливо, а використовують поточне джерело енергії (гідро, вітрова, сонячна). Для спалювальних установок (біомаса, вугілля, мазут, природний газ) домінують викиди на етапі експлуатації, після чого йде виробництво палива. Для ядерної енергетики домінуючим етапом є виробництво уранового палива. Етап демонтажу має відносно незначний вплив на всі джерела енергії, частково тому, що метали та бетон можна переробити.

Атомна енергетика відноситься к одним із чистих с точки зору впливу на навколишнє середовище джерелом електричної енергії і поміж усіх видів генерації здійснює майже в 80 разів менше викидів CO₂, ніж вугільна генерація, у 4 рази менше, ніж сонячна, та у 2 рази менше за гідрогенерацію.

Список літератури

- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Kadner, S., Minx, J. C., & Brunner, S. (2014). Technical summary. In: climate change mitigation of climate change. *Cambridge University Press*, 69-72.
- European commission. (2020). A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe – Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. *European commission: Brussels, COM 301, 8.7.2020*.
- IEA. (2019). *Electricity Information Overview* (Technical Report). IEA: Paris, France.
- IEA. (2022, 14 March). *Energy Systems Catapult Living Lab – Part of How Governments Support Clean Energy Startups*; IEA.
- Ruth, M. F., Jadun, P., Gilroy, N., Connelly, E., Boardman, R., Simon, A. J., Elgowainy, A. & Zuboy, J. (2020). *The Technical and Economic Potential of the H2@Scale Concept within the United States* (Technical Report NREL), TP-6A20-77610.
- Schlömer, S. (2018). Technology-specific Cost and Performance Parameters. Annex III. *Cambridge University Press*, 1329-1356.
- Sizewell, C. (2020). *Expression of Interest – Sizewell C Hydrogen Demonstrator Project Written Evidence Submitted by Sizewell C (HNZ0062)*.
- The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities*. (2019). Report prepared by the IEA for the G20.

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ. ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ НАСЛІДКИ ЗМІНИ КЛІМАТУ

- Вронська Н.Ю.**, Національний університет «Львівська політехніка», к.т.н., доц., доцент кафедри екології та збалансованого природокористування, Львів, Україна
- Бондар О.І.**, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, д.б.н., проф., засл. діяч науки і техніки України, член-кор. НААН України, ректор, Київ, Україна
- Мальований М.С.**, Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., проф., завідувач кафедри екології та збалансованого природокористування, Львів, Україна
- Попович О.Р.**, Національний університет «Львівська політехніка», к.т.н., доц., доцент кафедри екології та збалансованого природокористування, Львів, Україна
- Тимчук І.С.**, Національний університет «Львівська політехніка», к.с-г.н., доц., доцент кафедри екології та збалансованого природокористування, Львів, Україна

Abstract

Sustainable development is an objective need of human civilization, as it is an alternative to its previous development, which faced a person and society with the problem of survival and self-preservation.

The problem of sustainable development is one of the most urgent in the modern world. World leaders take care of it, hundreds of governmental and intergovernmental programs are dedicated to it, it has been on the agenda of the most influential international organizations for many years.

Sustainable development provides an answer to the objective need to bring human life and the development of society in line with natural processes in order to preserve the global balance and avert catastrophe.

Вступ

Стає все більш очевидним, що населення світу стає заручниками глобальних проблем, які стосуються усіх. Жодна країна в світі не впорається одна з такими проблемами як вичерпаність невідновлюваних ресурсів (в першу чергу енергоносіїв), кліматичні зміни, забруднення води та повітря.

Як альтернатива сучасному незбалансованому розвитку, з'явилась концепція сталого розвитку. Ідея сталого розвитку взята на озброєння у різних країнах. Розробляються стратегії сталого розвитку на різних рівнях управління (глобальному, національному, регіональному, місцевому). Досягається збалансованість економічного, соціального, екологічного розвитку. Досягнуті результати є кращі там, де місцеві громади брали активну участь в процесі стратегій сталого розвитку.

Проблема сталого розвитку – одна з найбільш актуальних проблем світу. В кінці XX та на початку XIX ст ООН почала активну діяльність з цієї проблематики. Були проведені такі важливі заходи, як всесвітні конференції, спеціальні сесії Генеральної Асамблеї ООН, зустрічі на найвищому рівні представників практично всіх країн світу. Проблема сталого розвитку перетворилася на важливу складову внутрішньої та зовнішньої політики багатьох держав на різних континентах (Садовенко, Масловська, Середя та Тимочко, 2011).

Основний матеріал

Концепція сталого розвитку втілює новий підхід, який дозволяє робити глобальну комплексну переоцінку та планувати зміни в усіх сферах життя

(природи і людства) і на цій основі зменшити ціннісні втрати від некерованих екологічних змін.

Концепція і стратегії сталого розвитку тісно пов'язані і переплітаються з ідеями людського розвитку, який має на меті розширення можливостей для вибору людьми параметрів свого життя і перспектив особистісного розвитку. Можна виділити три складові – добробут, здоров'я та освіченість людини. Ці складові сприяють збільшенню людського потенціалу як рушійної сили сталого розвитку, його впливу на економічні та соціальні процеси, збереження довкілля та його збалансований розвиток.

Сьогодні людина і природа залежать один від одного. У трикутнику «людина – природа – соціум» центр ваги зміщується і на перший план виступає захист природи від негативних наслідків людської діяльності. Цей природоохоронний аспект сталого розвитку є надзвичайно важливим, першорядним, але, як вже наголошувалося, не єдиним. Сучасне розуміння концепції сталого розвитку бере до уваги не лише економічний чи еколого-економічний, а й суспільний (соціальний) вимір з його політологічними, ідеологічними, моральними, культурологічними складовими (Садовенко та ін., 2011).

Головними передумовами реалізації сталого розвитку можна визначити такі:

- поширення у масовій свідомості глибокого розуміння взаємозв'язку між людиною, людством та природою, а також фундаментальних основ стійкого розвитку відкритих стаціонарних систем;
- визначення напрямів зміни сутності людини як особистості, перетворення її з об'єкту у суб'єкт глобального розвитку;
- формування глобальних, національних, місцевих стратегій сталого розвитку за умов економічного зростання та забезпечення основних потреб людей;
- суттєве зменшення споживання ресурсів;

- віднайдення джерел фінансування економічних, екологічних, соціальних, політичних та інших перетворень, особливо для країн, що розвиваються;
- створення нормативно-правової та інституційної бази сталого розвитку;
- створення та удосконалення національних та міжнародних систем моніторингу щодо ефективності реалізованих заходів та корегування програм розвитку;
- забезпечення скоординованого у масштабах усього світу наукового опрацювання проблем та супроводу практичних дій щодо реалізації концепції сталого розвитку.

Зміна клімату є однією з найбільших проблем світу з далекоглядним впливом на людину, природу та економіку. Зміна клімату впливає на весь всесвіт та все населення.

Адаптація до глобальної зміни клімату є процесом пристосування у природних чи людських системах у відповідь на фактичні або очікувані кліматичні впливи, що дозволить знизити їх негативні наслідки та скористатися сприятливими можливостями.

Зміна клімату на території України підвищує ризики для стану здоров'я населення, екосистем, водних, лісових ресурсів, сталого функціонування енергетичної інфраструктури та агропромислового комплексу, що може завдати і вже завдає колосальних збитків.

Найбільш вразливими до проявів зміни клімату галузей економіки можуть виявитися сільське, лісове і водне господарство та енергетика, загалом як антропогенні, так і природні екосистеми (Іванюта, Коломієц, Малиновська та Якушенко, 2020).

Земельні ресурси, сільське та лісове господарство. У сучасному світі сільське господарство залишається ключовою галуззю економіки, забезпечуючи продовольчу безпеку та вироблення важливих видів сировини. Але також є суттєвим джерелом парникових газів. Отже, виникає потреба

модернізації наявних моделей аграрного виробництва та удосконалення способів управління сільськогосподарськими системами з урахуванням зміни клімату. (Іванюта та ін., 2020).

Клімат кожної країни є її природним ресурсом. У нашій країні цей ресурс, у цілому, сприятливий для сільського господарства, однак фактична щорічна погода дуже різноманітна й іноді буває досить несприятливою.

Практично всі посівні площі сільськогосподарських культур в Україні знаходяться в зоні ризикованого землеробства (території із природним дефіцитом опадів), де є постійний ризик втрати обсягів урожаю у надто посушливий рік або втрати якості урожаю у надмірно дощовий рік (Зміна клімату та сільське господарство в Україні, 2019).

Зміни погодних умов (підвищення температури повітря, нерівномірний розподіл опадів, які мають зливовий характер у теплий період, неефективне накопичення вологи в ґрунтах) зумовлюють збільшення кількості та інтенсивності посушливих явищ. Це може призводити до розширення зони ризикового землеробства та до опустелювання в південних областях України (Іванюта та ін., 2020).

Вплив клімату на сільське господарство очевидний. Однак сільське господарство, яке часто потерпає від зміни клімату, одночасно є джерелом викидів парникових газів, а отже однією із причин цієї зміни.

Відповідно до звітів про викиди, які уряди країн регулярно представляють в Секретаріат Рамкової конвенції ООН зі зміни клімату, на сільське господарство припадає приблизно 15% від світового обсягу викидів парникових газів (Зміна клімату та сільське господарство в Україні, 2019).

Отже, з точки зору підвищення продуктивності сільського господарства зміна клімату має як позитивні, так і негативні наслідки.

До позитивних слід віднести: покращення умов і скорочення термінів збирання врожаю; можливість ефективного впровадження пізньостиглих сортів (гібридів), для яких необхідно більше теплових ресурсів; покращення умов

перезимівлі сільськогосподарських культур і багаторічних трав; підвищення ефективності внесення добрив.

До негативних належать: погіршення якості зерна внаслідок підвищення концентрації вуглекислоти у повітрі; почастищення та посилення посух у вегетаційний період; прискорення розкладання гумусу в ґрунтах; погіршення зволоження ґрунту в південних регіонах; зростання вітрової та водної ерозії ґрунту, спричинене збільшенням кількості посух та екстремальних опадів; збільшення ризиків вимерзання озимих культур через відсутність стійкого снігового покриву при значному зниженні температури (Іванюта та ін., 2020).

Зміна клімату також негативно впливає і на лісове господарство, змінюючи оптимальні показники екологічних умов для лісових екосистем.

Основні ефекти впливу зміни клімату на лісові екосистеми:

- ареали зростання деяких порід будуть змінені через зміни меж природних зон, в деяких випадках окремі продуктивні види повністю зникнуть;
- зміняться режими, типи, інтенсивність і частота впливу на ліс різних пошкоджуючих чинників – комах, хвороб, пожеж тощо;
- відбудуться зміни в балансі поживних елементів;
- відбудуться (переважно негативні) зміни в стабільності і життєвості лісових екосистем, продуктивності лісових деревних і недеревних рослин;
- зміняться цикли репродуктивності лісових порід, динаміка сукцесій, відбудуться зміни екологічних і соціальних функцій лісів;
- зменшення рівня біорізноманіття, видів на межі ареалів та ендемічних видів (Іванюта та ін., 2020).

Для того, щоб лісове господарство та їхня продукція могли виконувати свою функцію по зменшенню парникових газів, потрібно дотримуватися кількох правил:

- збільшення площі лісів, захисних насаджень та лісових смуг;

- підвищення біологічної стійкості лісових насаджень через підбір деревних і чагарникових порід, стійких до проявів зміни клімату, при лісовідновленні та лісорозведенні;
- дотримання принципів лісонасінневого районування і лісоекологічної типології при проектуванні та створенні лісових культур;
- проведення рубок формування і оздоровлення лісів, а також санітарних рубок і рубок головного користування;
- удосконалення охорони і захисту лісів від пожеж, шкідників та хвороб;
- сприяння заміщенню енергоємної продукції (наприклад, з металу чи бетону) на продукцію з деревини, вирощеної при збалансованому веденні лісового господарства та заготовленої без порушень законодавства.

Щоб краще адаптуватися лісовому господарству до зміни клімату потрібно:

- підтримка перманентного лісового покриву і збагачення лісів видами та породами, стійкими до сучасних та майбутніх проявів змін клімату;
- збільшення біологічного різноманіття лісових екосистем;
- удосконалення системи управління природно-заповідними територіями;
- забезпечення відновлення водно-болотних угідь;
- природне поновлення лісів, а у випадку зі штучним лісовідновленням – забезпечення достатньої кількості змішаних лісових культур;
- адаптивне коригування термінів і технологій підготовки ґрунту, схем змішування, термінів посадки та проведення доглядів за лісовими культурами;
- застосування сучасних технічних засобів оперативного виявлення та гасіння лісових пожеж (Зміна клімату та лісове господарство, 2020).

Водні ресурси. Вода, клімат та енергетика нерозривно пов'язані. Для стійкого управління цими ресурсами необхідний комплексний підхід, адже зміни клімату починають все більше впливати на водні ресурси всього світу.

Гідроенергетика є головним гравцем у сфері відновлюваної енергетики і забезпечує близько 16 % світової генерації електроенергії. А її інфраструктура

надає такі важливі послуги як збереження води, водопостачання, зрошення, боротьба з паводками та запобігання посухам (Погляд в майбутнє, 2020).

Галузь водного господарства і самі водні ресурси України – досить вразливі до наслідків змін клімату. Адже Україна вже зараз належить до групи країн з обмеженими запасами води і є однією із найменш забезпечених водою країн в Європі на душу населення (1 тис м³ місцевого стоку на 1 мешканця) (Держводагентство, 2021).

Зміна клімату негативно впливає також на стан підземних вод, що зумовлено значним зменшенням інфільтраційного живлення внаслідок прогресуючого зростання сумарного випаровування. Ілюстрацією негативного впливу зміни клімату на стан підземних, ґрунтових та поверхневих вод є водно-екологічна ситуація в районі Шацького поозер'я у 2019 р., основним проявом якої стало істотне обміління Шацьких озер і озера Світязь (Іванюта та ін., 2020).

Основним завданням адаптації водного господарства до зміни клімату є збереження потенціалу та запобігання втрат обсягів та якості водних ресурсів.

Основними пріоритетами у цій сфері є:

- зменшення втрат поверхневих водних ресурсів завдяки зменшенню площі випаровування та оптимізації використання води в сільському господарстві;
- удосконалення моніторингу, прогнозування, картографування небезпек, що пов'язані зі шкідливою дією вод;
- оновлення схем захисту та планів реагування, оптимізація та оновлення системи водозахисних споруд;
- модернізація водогосподарської системи, підвищення коефіцієнтів корисної дії водогосподарських споруд, осучаснення правил експлуатації водосховищ, модернізація зрошувальних систем;
- збереження водного потенціалу великих річок, оптимізація регулювання стоку, охорона та регулювання водоохоронних зон, лісових масивів, водно-болотних угідь;

- збереження якості водних ресурсів: осучаснення моніторингу, систем водовідведення та водоочищення, вдосконалення та диверсифікація водопідготовки та розподілу води (Іванюта та ін., 2020).

Біорізноманіття. Біорізноманіття забезпечує нас важливими екосистемними послугами: продовольством, ліками, родючими ґрунтами для вирощування їжі, що забезпечується за рахунок живих систем і взаємодії видів, від найдрібніших мікроорганізмів до великих хижаків. Воно відіграє важливу роль у збереженні цих ґрунтів від руйнування водою чи вітром. Крім того, саме в екосистемах відбувається вирішальна біологічна частина колообігу вуглецю, води та інших важливих речовин, які беруть участь у формуванні місцевого та глобального клімату (Бутрик та Мельник-Шамрай, 2022).

Криза біорізноманіття представляє для людського суспільства такий же великий ризик, як і зміна клімату. Проте цю загрозу важче окреслити. Частково це пов'язано з тим, що втрату біорізноманіття неможливо чітко оцінити, як це можна зробити з проблемою зміни клімату. Для прикладу, кліматичну кризу можна оцінити рівнем викидів вуглекислого газу або підвищенням глобальної температури. А мережа, що пов'язує біологічні види в екосистемах між собою, є навіть більш складною, ніж процеси, що зумовлюють зміну клімату. Однак розуміння проблеми є необхідним кроком до її вирішення (Zn.ua, 2021).

Визначаються три види реакцій біоти на зміну клімату: міграція, адаптація та зникнення.

Міграція у звичайних умовах є екологічно врівноваженим процесом, проте через збільшення темпів змін у навколишньому середовищі та наявність антропогенних перешкод (екологічних дірок) рівновага порушується.

Адаптація – еволюційний тривалий процес, а клімат на сьогодні змінюється швидше за еволюційні можливості. В глобальному масштабі це призводить до скорочення запасів енергії в біомасі екосистем і в кінцевому випадку – до порушення енергетичної піраміди.

Особливо негативним є процес зникнення видів. Прогнозують, що протягом століття з окремих територій зникнуть 17-35 % видів, а в Європі, зокрема до 2080 р., свій ареал скоротить близько 50 % видів рослин.

Для України існує ризик негативного впливу зміни клімату на рівні екосистем, зокрема на болотні екосистеми, які депонують вуглець і відіграють особливу роль у кругообігу й балансі CO₂. Відбуватиметься заростання боліт лісом та зникнення болотних видів. Для зони Полісся існує ризик опустелювання та збіднення екосистем внаслідок засушливості, що стимулюватиме поширення посухостійких видів. Засушливість сприятиме збільшенню кількості та частоти пожеж у хвойних лісах від Полісся до гірського Криму. Підйом рівнів ґрунтових вод підсилить заболочення та засолення, скоротить площі піщаних дюн, що є осередком багатьох ендемічних видів. Загалом для умов України вплив факторів зміни клімату може зумовити збіднення чисельності 8 % видів рослин та 10 % – тварин (Іванюта та ін., 2020).

Висновки

Глобальна зміна клімату стала однією з найнагальніших екологічних проблем, до вирішення якої прикута увага людства. Її наслідками є небезпечні погодні катаклізми, різкі зміни погоди, паводки, повені, сильні вітри, зливи і дощі, град, посухи, що призводять до значних екологічних та економічних збитків у всьому світі.

Дані проблеми треба вирішувати на міжнародному, національному та локальному рівні. Ці дії мають відбуватись у двох взаємодоповнюючих напрямках боротьби: послаблення зміни клімату шляхом скорочення викидів парникових газів та адаптація до зміни клімату. В нашій країні необхідно зараз розробити національний та регіональні плани адаптації до зміни клімату, які повинні також включати екосистемну адаптацію. Це дасть змогу: підтримувати та відновлювати природні екосистеми: старих лісів, боліт, степів; зменшити навантаження на дику природу через обмеження надмірного мисливства,

рибальства та інших форм видобутку природних ресурсів; організувати місця безпечного існування для видів, яким загрожує вимирання; створення мережі наземних, прісноводних та морських територій з урахуванням прогнозованих кліматичних змін. Варто пам'ятати, що природа – наша найперша союзниця у боротьбі зі зміною клімату.

Список літератури

- Zn.ua. (2021). *Унаслідок діяльності людини велика кількість видів опинилася під загрозою зникнення*. Retrieved from: <https://zn.ua/ukr/WORLD/ljudstvu-mozhe-zahrozhuвати-masove-vimirannja-cherez-vtratu-bioriznomanittja-the-economist.html>
- Бутрик, І. Д., та Мельник-Шамрай, В. В. (2022, жовтень). Вплив змін клімату на біологічне різноманіття. *XVIII Всеукраїнська наукова on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених з міжнародною участю «Сучасні проблеми екології»*. Retrieved from: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/11/81.pdf>
- Держводагентство. (2021). *Україна має хороший потенціал, щоб адаптуватися до викликів, які виникають у зв'язку зі змінами клімату*. Retrieved from: <https://www.kmu.gov.ua/news/ukrayina-maye-horoshij-potencial-shchob-adaptuvatisya-do-viklikiv-yaki-vinikayut-u-zvyazku-zi-zminami-klimatu-derzhvodagentstvo>
- Зміна клімату та лісове господарство*. (2020). Retrieved from: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://buvrzbits.davr.gov.ua/wp-content/uploads/2020/05/%D0%97%D0%BC%D1%96%D0%BD%D0%B0-%D0%BA%D0%BB%D1%96%D0%BC%D0%B0%D1%82%D1%83-%D1%82%D0%B0-%D0%BB%D1%96%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B5-%D0%B3%D0%BE%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE..pdf>

Зміна клімату та сільське господарство в Україні: що варто знати фермерам?

(2019). Retrieved from: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://mepr.gov.ua/files/docs/Zmina_klimaty/2020/%D0%97%D0%BC%D1%96%D0%BD%D0%B0%20%D0%BA%D0%BB%D1%96%D0%BC%D0%B0%D1%82%D1%83%20%D1%82%D0%B0%20%D1%81%D1%96%D0%BB%D1%8C%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B5%20%D0%B3%D0%BE%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%20%D0%B2%20%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D1%96.pdf

Іванюта, С. П., Коломієц, О. О., Малиновська, О. А., та Якушенко, Л. М. (2020). *Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь*. К. : НІСД.

Погляд в майбутнє: водні ресурси, зміни клімату та гідроенергетика. (2020). Retrieved from: https://www.uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/poglyad-v-maybutne-vodni-resursi-zmini-klimatu-ta-gidroenergetika

Садовенко, А., Масловська, Л., Середя, В., та Тимочко, Т. (2011). *Сталий розвиток суспільства*. 2 вид. К.

**ПОРІВНЯННЯ ПОЛІВ СЕРЕДНЬОЇ МІСЯЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ
ПОВІТРЯ ПРОТЯГОМ КЛІМАТИЧНИХ НОРМ
1991-2020 рр. ВІДНОСНО 1961-1990 рр.**

Пясецька С.І., Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та
НАН України, к.геогр.н., с.н.с. відділу кліматичних досліджень
та довгострокових прогнозів погоди, Київ, Україна

Щеглов О.А., Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та
НАН України, к.геогр.н., с.н.с., відділу фізики атмосфери, Київ,
Україна

Гребенюк Н.П., Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та
НАН України, м.н.с. відділу кліматичних досліджень та
довгострокових прогнозів погоди, Київ, Україна

Abstract

The article is devoted to the study of changes in the average monthly air temperature on the territory of Ukraine during the last thirty-year period 1991-2020 relative to the past climatological norm of 1961-1990 for individual months of the year.

The purpose of the study was to establish modern trends in the spatio-temporal distribution of the field of average monthly air temperature in the territory of Ukraine at the current stage of climate change.

The materials of observations at 55 long-range stations of Ukraine during the last 30 years 1991-2020 and data of the climatological standard norm 1961-1990 were used for processing.

The main research methods were physical and statistical for calculating anomalies (deviations) and their sign of the current 30th year from the standard climatological norm of 1961-1990, as well as cartographic for visualizing the obtained results for each individual month.

It has been proven that during all the studied months there was an increase in the average monthly air temperature. The most intensive increase in the average monthly air temperature occurred in the months of the cold period of the year, January-March, when this trend was most clearly manifested in the entire territory of Ukraine, as well as in the warm period of the year during July-August. Territorially, the greatest increase in the average monthly air temperature in the cold period of the year was observed in the territory of the northwestern, northern, and northeastern regions, and in some places in the center. In the warm period of the year, the most noticeable changes in the average monthly air temperature in the direction of its increase were observed in the territories of the western and central regions and in some places in the south.

Вступ

Клімат є одним з головних природних ресурсів, від якого залежать умови життєдіяльності суспільства. Серед кліматичних ресурсів одним з основних складових виділяють температурний режим повітря. Температура повітря визначає умови формування та характер погоди, які впливають на господарську діяльність.

Проблема зміни клімату на теперішній час вже вийшла за межі суто наукової та набула екологічного, економічного та політичного значення. Знання про глобальний і регіональний клімат продовжують поповнюватись новими даними інструментальних метеорологічних спостережень та оновлюватись банки кліматичної інформації.

Середня температура повітря є важливою характеристикою температурного режиму і одним із показників стану кліматичної системи та її змін. Особливого значення, дослідження температури повітря набуває саме натеper, зважаючи на зміни, що тривають у світовій кліматичній системі завдяки потеплінню, що триває. Загалом підвищення температури повітря має декілька аспектів, які так чи інакше впливають на виникнення та розвиток низки

процесів та виникнення сприятливих та несприятливих погодних умов, які впливають на господарську діяльність. Так, для низки галузей господарської діяльності, у першу чергу сільськогосподарського виробництва це є сприятливим чинником. Поперше це розширює можливості агропромислового комплексу у виробництві продукції рослинництва із розширенням посівів культур, які на окремих територіях раніше не поширювались, можливість проводити раніше посівну кампанію тощо. Подруге для енергетичного комплексу виникає можливість економії паливно-мастильних матеріалів та електроенергії в опалювальний сезон. Проте це має і негативні наслідки – зростає необхідність у забезпеченні зволоження сільськогосподарських угідь, збільшується потреба у водопостачанні, виникає необхідність в адаптуванні рослин для нових умов та захисту рослин від шкідників. Виникає низка небезпек у лісовому та водному господарствах, транспорті, комунальній сфері. Підвищення температури повітря у вегетаційному періоді при низькій вологості повітря, малих та нерегулярних опадах, особливо при тривалому бездощів'ї призводить до сильних посух на значній території із псуванням або навіть втраті врожаю (запал зерна, недостатність розвинення коренеплодів). Особливо загрозливою є посуха у повітрі та у ґрунті. Визначення регіонів країни на території яких виникають найбільші зміни температури повітря та її показників від середніх до максимальних є надзвичайно актуальним завданням, враховуючи сучасні зміни клімату.

Не дивлячись на те, що дослідженню просторово-часового розподілу температури повітря, у тому числі і середньої місячної, на території України було присвячено чимало наукових робіт, але на тепер для вирішення існує одне з головних питань – сучасний стан розподілу середньої місячної температури повітря та її тенденції для окремих регіонів на сучасному етапі зміни клімату в Україні.

Метою дослідження було встановити стан поля середньої місячної температури повітря на сучасному етапі зміни клімату в Україні та визначити

регіони, які знаходяться під найбільшим впливом цих змін. *Об'єктом дослідження* була середня місячна температура повітря на території України, а *предметом* тенденції її просторово-часового розповсюдження на території України протягом окремих місяців в умовах сучасної зміни клімату.

Для розв'язання проблеми вирішувалось декілька питань, а саме:

- визначення аномалій (розміру та знаку) середньої місячної температури повітря протягом усіх місяців останнього тридцятирічного періоду 1991-2020 рр. відносно кліматологічної норми 1961-1990 рр.;
- виділення регіонів, які знаходяться під впливом найбільших змін середньої місячної температури на території України на сучасному етапі зміни клімату.

Використані матеріали та методи дослідження. Для дослідження використано данні середньої місячної температури повітря по усіх місяцях року протягом двох кліматологічних норм – 1961-1990 рр. та 1991-2020 рр. на 55 станціях України. Дані містяться у Метеорологічних щомісячниках (Вип. 10. Ч.ІІ. Україна) які надано Центральною геофізичною обсерваторією імені Бориса Срезневського, м. Київ. Основним методом дослідження був фізико-статистичний, за допомогою якого було розраховано нормовані значення середньої місячної температури повітря для місяців обох тридцятирічних періодів та визначено її аномалії для сучасного періоду 1991-2020 рр. відносно періоду 1961-1990 рр. Для візуалізації отриманих результатів розрахунків був застосований картографічний метод за допомогою якого для кожного з досліджуваних місяців створені карти просторово-часового розповсюдження відхилень середньої місячної температури повітря останнього тридцятиріччя 1991-2020 рр. від попередньої кліматологічної норми 1961-1990 рр. Представлена стаття складається із вступу, постановки завдання, характеристики використаного матеріалу, огляду попередніх досліджень, обговорення отриманих результатів та висновків. Матеріал проведеного дослідження подано відповідно у двох розділах. У першому розділі подано аналіз аномалій (відхилень) поля середньої місячної температури повітря для

місяців холодного та окремих місяців перехідних сезонів року, а у другому відповідна інформація щодо місяців теплого періоду.

Зв'язок із науково-дослідницькими завданнями. Представлене дослідження пов'язане із виконанням низки науково-дослідних робіт державного замовлення які присвячені дослідженню особливостей сучасних змін клімату в Україні та виявленню кліматовразливих районів на її території, а саме 2012-2014 рр. – «Фізико-статистичний аналіз та прогноз зміни клімату регіонів України для підтримання сталого розвитку економіки країни» (номер держреєстрації 0112U004651), 2015-2017 рр. – «Розроблення комплексного методу виявлення кліматовразливих районів на території України в умовах глобальної зміни клімату» (номер держреєстрації 0115U002775), 2018-2020 рр. – «Прогнозування мінливості кліматовразливих районів на території України в найближчі десятиріччя» (номер держреєстрації 0118U000554) та 2021-2022 рр. – «Прогноз посух в Україні на найближчі 10 років (до 2030 року)» (номер держреєстрації 0121U109573).

Стан дослідження проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження температури повітря на території України вже тривалий час проводиться низкою вчених-кліматологів зокрема дослідниками Українського гідрометеорологічного інституту (УкрГМІ). З найбільш значних попередніх робіт, де викладено окремі результати досліджень із цього питання є монографія «Климат Украины» (1967), де комплексно розглянуто усі складові клімату країни, зокрема і просторово-часовий розподіл температури повітря. Доповнена та оновлена інформація щодо сучасного на той час стану кліматичної системи в Україні подано у монографії «Природа Украинской ССР. Климат» (1984). Проте більш фундаментально питання особливостей та динаміки розподілу температури повітря на території України, як одного з головних елементів клімату є монографія «Температура воздуха на Украине» за

редакцією В. М. Бабіченко (1987), в якій ґрунтовно проаналізовано матеріали спостережень з початку роботи метеорологічних станцій (остання чверть XIX сторіччя) і до початку 80-х років XX сторіччя та дано характеристику усіх показників температури повітря від її середніх місячних значень до екстремумів на території різних фізико-географічних регіонів країни та визначено дат стійкого переходу температури повітря через окремі межі. Також було встановлено, що найбільші відхилення від норми спостерігаються у зимові місяці, причому осередки найбільшого зниження або підвищення температури в окремих випадках можуть знаходитись у різних районах країни. Зважаючи на те, що зміни у кліматичній системі тривають протягом низки років було виконано роботи по визначенню особливостей та динаміки змін у кліматичній системі країни. Спираючись на роботи Барабаш, Гейко та Гребенюк (1986), а також Логвінова та Барабаш (1986, 1987) які виконані на емпіричному матеріалі тривалістю 80 років (1900-1980 рр.), встановлено, що найбільші зміни температури повітря виявились південніше 49° пвн. ш., особливо якщо розглядати температуру повітря за рік. Із зменшенням широти потепління клімату послаблюється. На той період потепління над північною півкулею, для більшості території України встановлено певне зниження температури взимку та влітку і зростання її навесні та восени. Як свідчать результати роботи Логвинова та Барабаш (1986) виконані на основі розробки емпіричної моделі сучасних змін клімату Винникова та Гройсман (1979) зміни температури повітря треба очікувати у зимовий сезон, за рахунок чого зміниться і річна температура повітря. Згідно до Логвинова та Барабаш (1987) на основі автокореляційного аналізу та методу селективних перетворень існують декілька періодів змін річної температури повітря 9, 13-14, 18, 21, 26-27 років. Результати подальших досліджень викладено у роботі Гребенюк, Корж та Яценко (2002). З комплексних монографій, які висвітлюють стан кліматичної системи на території України можна назвати монографію «Клімат України» (2003) за редакцією В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко.

Окреме питання полягає у дослідженні механізму зміни клімату, який базується на багаторічних основних кліматоутворюючих чинниках, одними з яких є парникові гази вектор кутової швидкості обертання Землі. На основі аналізу достовірних емпіричних даних про приземну температуру повітря протягом останніх 150 років та її динаміку по окремих часових інтервалах часу за даними Дзюби та Паніна (2007) існує глобальний та спрямований у часі тривалий вплив на кліматичну систему двох чинників – збільшення еманції парникових газів (Израэль, Груза, Катцов & Мелешко, 2001) та зміна вектору кутової швидкості обертання Землі, що підтверджується певними змінами у розташуванні полюсів та результатами досліджень сценарій зміни клімату для України на тлі загального підвищення температури зроблено Волощуком (1993) та Волощуком і Бойченко (1997). Як свідчить дослідження Волощука (1993) на основі математичного моделювання та матеріалів палеокліматичної реконструкції минулих теплих епох побудовано напівемпіричну модель широтного потепління у Північній півкулі, яка свідчить про більш інтенсивне зростання середньорічної температури відносно глобального потепління. Ефект полярного підсилення глобального потепління виявляється, як прояв загальної тенденції просторово-часового вирівнювання кліматичного поля приземних температур при загальному нагріванні Землі. Тобто слід очікувати зменшення амплітуди приземних температур, або ще більше потепління у зимовий сезон. Про це свідчать матеріали наведені у Climate change 1994 (1995). Модельні розрахунки і аналіз кліматичних палеорекоконструкцій та статистичний аналіз наведений у Винникова, Гройсмана, Лугиної & Голубева (1987) це підтверджують.

Важливим питанням у дослідженні змін у кліматичній системі належить перетворенню атмосферної циркуляції. Це питання висвітлено у низці робіт Мартазинової та Свердлик (1998), Мартазинової і Сологуб (2003), а також Martazinova & Ivanova (2011). Було доведено зміни у розташуванні центрів дії атмосфери (ЦДА) протягом різних часових інтервалів, а саме переміщення

Сибірського антициклону на схід від його положення, із наступним його переміщенням у зворотньому напрямку (Мартазінова та Сverdлик, 1998). Було встановлено, що формування найбільш загрозливих посух у середині ХХ сторіччя визначались Азорським та Арктичним максимумами за умови їх одночасної активності, протягом останніх десятиріч атмосферна циркуляція змінилась у бік зменшення її часової стійкості та різкої трансформації за якої посушливому атмосферному процесу та високими температурами повітря може передувати вологий процес. Серед еталонів баричних полів, які відповідальні за утворення посушливих умов виділяються наступні – при різкому вторгненні холодного повітря із півночі (північного заходу, північного сходу) з осередків високого тиску; потрапляння на територію України аномально теплого повітря із заходу, півдня та сходу; вторгнення теплого континентального повітря з Уралу. Проте найбільш небезпечним процесом є південний, який є найбільш руйнівним за своїми наслідками. На тепер зміни клімату є глобальними географічними проблемами, які суттєво впливають на сталий розвиток України та згідно дослідженням Волощука, Гродзинського та Шищенко (1998) повинні враховуватись для обґрунтування схем районування території України в контексті сталого розвитку, про що свідчить доповідь «Проблеми і стратегія виконання Україною Рамкової Конвенції ООН про зміну клімату (2001).

До останніх публікацій зі змін клімату, і в першу чергу зміни, які відбуваються у просторово-часовому розподілі середньої місячної температури повітря можна віднести дослідження зі зміни температури повітря на території України наприкінці ХХ та на початку ХХІ сторіччя (Бабіченко, Ніколаєва та Гущина, 2007) де для кожного місяця проведено порівняння норми за 45 років (1961-2005) із стандартною кліматологічною нормою 1961-1990 рр. та визначено розташування ізотерм на території України. Встановлено, що у зв'язку із глобальними змінами клімату і в першу чергу потепління, що триває за 15 років (1991-2005 рр.) середня місячна температура зазнала значних змін. Вона стала вищою для більшості місяців за винятком вересня, листопада та

грудня. На основі отриманих результатів було проведено більш ґрунтовне дослідження стосовно змін поля температури повітря у монографіях «Дати переходу температури повітря в Україні за сучасних умов клімату» за редакцією В. І. Осадчого та В. М. Бабіченко (2010) та «Динаміка температури повітря в Україні за період інструментальних метеорологічних спостережень» (2013) за редакцією В. І. Осадчого, В. М. Бабіченко та інш.

Таким чином, спираючись на раніше отримані результати з дослідження поля середньої місячної температури повітря, натеper постає необхідність продовжити розпочаті дослідження, використовуючи дещо інший підхід, а саме дослідити аномалії (відхилення) середньої місячної температури повітря на території України на вже оновленому матеріалі (30-річчя, як незалежний матеріал) відносно стандартної кліматологічної норми 1961-1990 рр.

Обговорення результатів дослідження

Треба зазначити, що у цілому порівнюючи обидві незалежні кліматологічні норми протягом усіх місяців року виявлено додатні аномалії середньої температури повітря у сучасному тридцятирічному періоді 1991-2020 рр. здебільшого на усій території України. Проте існують певні відмінності у їх розподілі від місяця до місяця протягом року. Просторово-часове розповсюдження аномалій середньої місячної температури повітря двох кліматологічних норм по окремих місяцях представлено на рис. 1. (холодний період року) та на рис. 2 (теплий період року). Дослідження має практичний інтерес, враховуючи те, що на тлі зміни температурних умов можуть проявлятися низка несприятливих погодних умов, а саме у холодний період року при дефіциті опадів виникає зимова посуха яка перешкоджає розвитку кореневої системи озимини та входження у зиму ослаблених посівів. Крім того при частих відлигах на поверхні снігового покриву утворюється льодяна кірка, яка перешкоджає диханню посівів та надходженню повітря, що і спричиняє випрівання посівів. У теплий період року створюються перешкоди для посівної

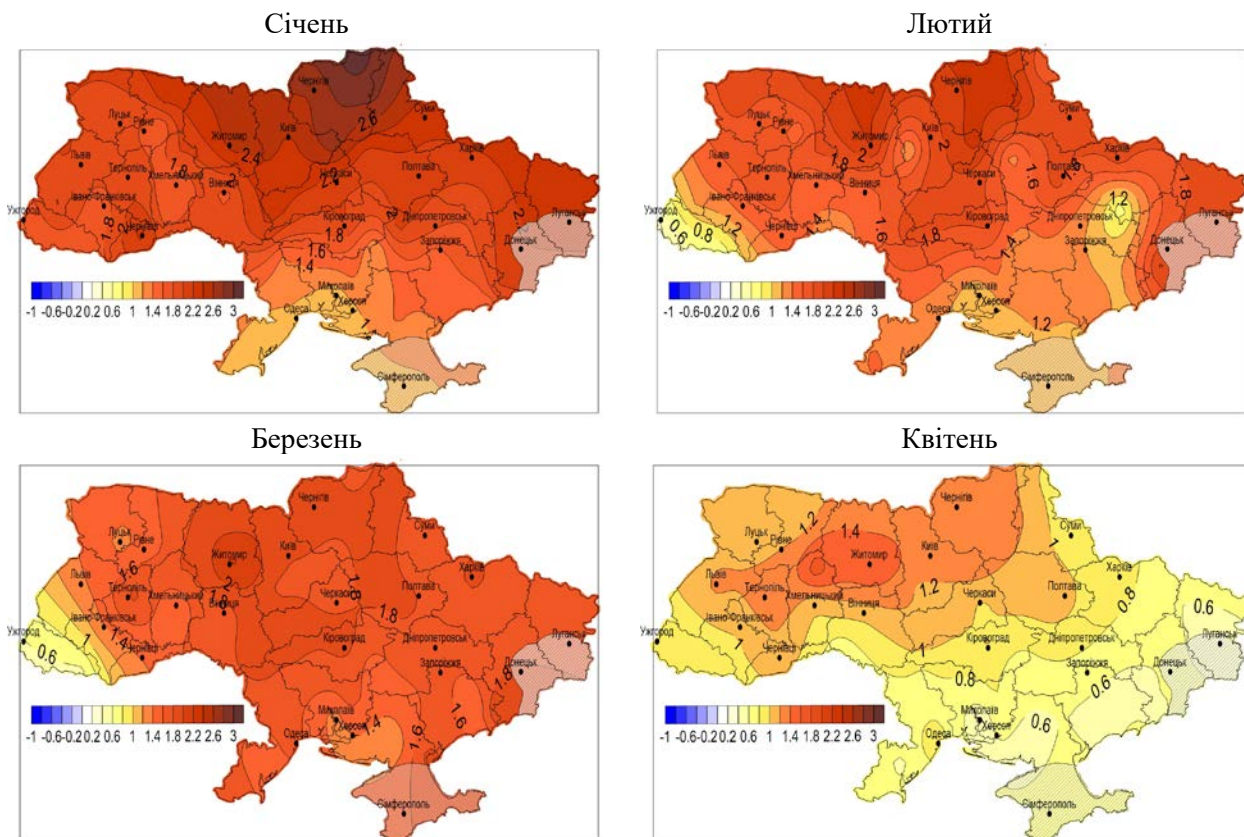
кампанії та вирощування сільськогосподарської продукції, втрачається врожай через високий температурний фон, низьку вологість повітря та недостатність зволоження внаслідок малої кількості опадів, або тривалих періодів бездощів'я. Для зернових культур це проявляється у недорозвинутості зерна та його запалі, а у технічних формування низької якості коренеплодів у цукровому або кормовому буряку та насіння у соняшнику і в кукурудзи.

1. Холодний період року та окремі місяці перехідних сезонів

До холодного періоду року належать місяці із листопада по березень. Квітень та жовтень відносять до теплого періоду, проте вони мають ознаки як холодного так і теплого періодів, тобто у певній мірі їх можна віднести до перехідних. У середині квітня, здебільшого у його другій декаді, коли температура повітря в середньому за декаду становить 5 °C відбувається посівна кампанія для більшості сільськогосподарських культур як зернових так і пропашних (цукровий буряк), за винятком тих, які потребують для початку вегетації та вирощування більш високих температур (кукурудза, рицина, сонях). У жовтні здебільшого вже завершується збирання продукції рослинництва і закладаються передумови перезимівлі озимини. Проте треба наголосити, що погодні умови холодного періоду року також суттєво впливають на закладання умов вирощування рослинницької продукції, особливо на сучасному етапі зміни клімату, коли спостерігається підвищення температури повітря у всі сезони року із різкими її коливаннями та відбуваються зміни у режимі зволоження із імовірними тривалими періодами посухи на тлі високих температур, або навпаки рясними дощами, що також є несприятливим для визрівання сільськогосподарської продукції. Крім того, відсутність снігового покриву, нестійкість залягання або його незначна висота, суттєво впливають на перезимівлю озимини та закладають передумови зимової посухи у ґрунті, яка спостерігалась у 1972 та 1975 рр. і переросла у жорстоку

посуху (посух у ґрунті та повітрі) у вегетаційному періоді на усій території України.

Встановлено, що у **січні** на спостерігається підвищення середньої місячної температури повітря на усій території України, причому достатньо істотні. Проте по окремих регіонах їх розподіл мав свої особливі риси розповсюдження (рис. 1). Так, на значній частині північних, північно-західних та північно-східних областях України спостерігаються найбільше підвищення середньої місячної температури повітря на 2,5...2,8 °С (північна частина Чернігівщини, Сумщини, Рівненщини, Житомирщини, південь Київщини), а максимальне значення аномалії становить 3,1 °С у Семенівці (крайня північ Чернігівщини).



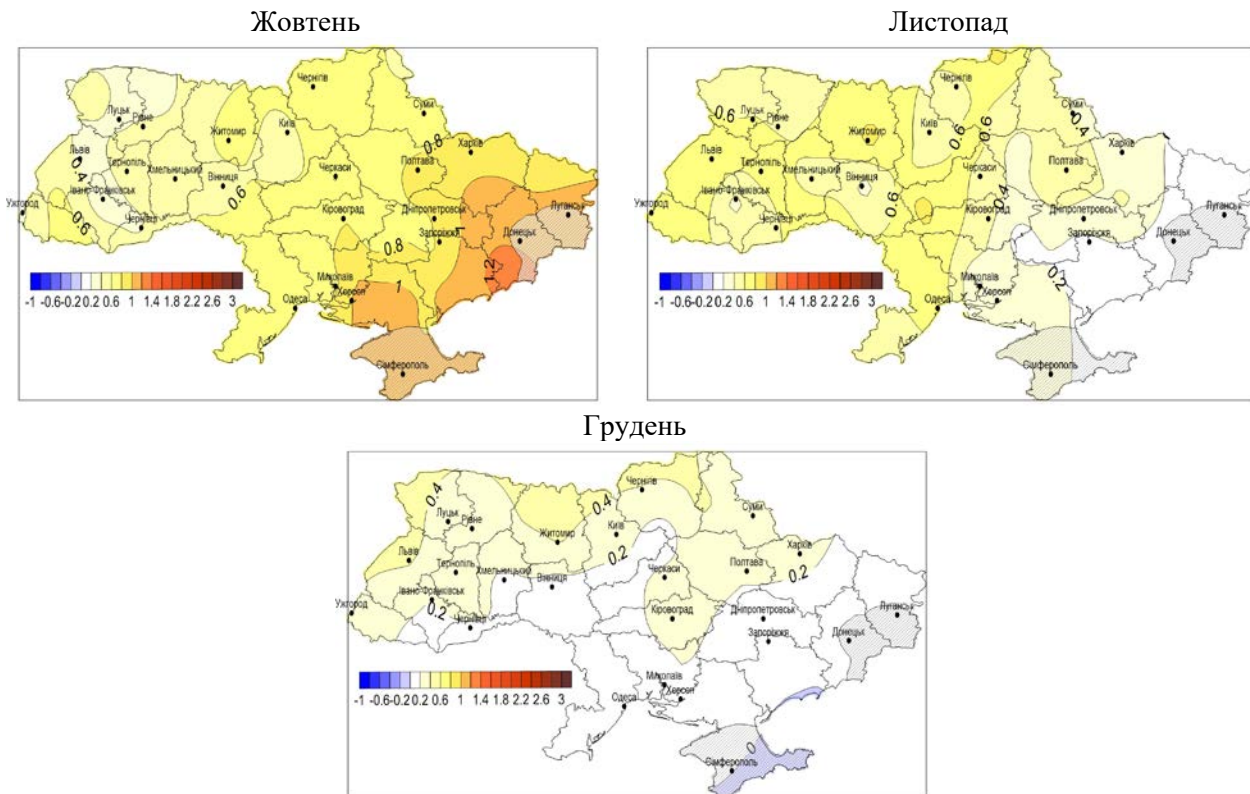


Рис. 1. Аномалії середньої місячної температури повітря за період 1991-2020 рр. відносно періоду 1961-1990 рр. у місяці холодного періоду року (листопад-березень) та окремі місяці перехідних сезонів (квітень-жовтень)

Територія де підвищення середньої місячної температури повітря було дещо меншим, розташовувалась південніше вищезначеного регіону, та охоплювала значну територію України у широтному напрямку. Здебільшого значення таких аномалій знаходились у межах від 1,5...+1,9 °С до 2,0...2,3(2,4) °С. При цьому встановлено тенденцію, що при просуванні на південь підвищення середньої місячної температури повітря зменшується. Тому, розповсюдження найбільших з них (2,0...2,3 °С) спостерігаються у напрямку з півночі на південь від Волині та Львівщини на заході до Вінничини, Черкащини, Кіровоградщини, Полтавщини та Дніпропетровщини у центрі та Харківщини і Донецького регіону на сході. Південніше, зміни у середній місячній температурі були меншими, відповідно її підвищення становило 1,5...1,9 °С. До цього регіону увійшли північ території Одещини, Миколаївщини, північний схід Херсонщини та більша частина Запоріжжя.

Також аналогічні зміни спостерігались на Прикарпатті та у Карпатському регіоні. Підвищення середньої місячної температури на $+1,0...+1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ спостерігаються на території більшої частини Одещини, півдня Миколаївщини та Херсонщини (рис. 1). Таким чином, підвищення середньої місячної температури повітря відбувалось на усій території України, проте найбільших змін її поле зазнало на території північно-західних, північних, північно-східних областей.

У лютому спостерігається дещо схожа ситуація по відношенню до розподілу додатних аномалій середньої місячної температури повітря протягом 1991-2020 рр. порівняно із 1961-1990 рр. у північних, центральних та східних областях. Проте виявлено певні відмінності. Так, найбільші з них становлять $2,0...2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ та спостерігаються на півночі Волинської, Рівненської, Житомирської та Чернігівської областей та на південному сході Київщини (Яготин) і Донеччини (Волноваха). На більшій території України підвищення середньої місячної температури знаходилось у межах $1,4...1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Крім того було встановлено, що на загальному тлі в ряді регіонів таких як Прикарпаття та Закрпаття, а також на території від півдня Харківщини субмеридіонально у напрямку на Запоріжжя існують осередки додатних аномалій інтенсивністю $1,5...1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в окремих випадках $1,2...1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (частина Дніпропетровщини, Запоріжжя). Проте існують осередки із значно меншими додатними аномаліями середньої місячної температури повітря, а саме $0,4...0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (район Ужгорода – Рахова та Лозової на півдні Харківщини) На більшій частині території Одещини, Херсонщини, півночі Миколаївщини, заходу і південного заходу Дніпропетровщини та Запоріжжя підвищення середньої місячної температури повітря становило $1,3...1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. На півдні Миколаївщини та Херсонщини додатні аномалії середньої місячної температури становлять $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отже, найбільшого зростання середня місячна температура повітря набула на території північно-західних та північних областей. Найменшого зростання вона сягала на території Карпатського регіону та на півдні Харківщини.

Протягом **березня** у сучасному 30-річчі 1991-2020 рр. найбільші зміни у середній місячній температурі повітря у бік її підвищення також спостерігались на усій території України, але з різною інтенсивністю. Так, здебільшого на території України було виявлено, що спостерігалось підвищення середньої місячної температури повітря та переважали додатні аномалії інтенсивністю $1,6(1,7\text{ }^{\circ}\text{C})\dots 1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Проте у окремих регіонах на низці станцій спостерігались дещо більші їх значення, а саме у Житомирі ($2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), Фастові, Умані, Гайвороні, Маріуполі ($2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Аналогічно до лютого, виявлено декілька районів де значення додатних аномалій середньої місячної температури повітря дещо відрізнялась від решти території. Так, в районі Передкарпаття та Карпатського регіону величина додатних аномалій становила $1,3\dots 1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ на території Львівщини, Івано-Франківщини, Чернівецьки та до $0,5(0,6)\dots 0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ на території Закарпаття. Також виділено регіон, який охоплює південь Миколаївщини та південний захід Херсонщини, де підвищення середньої місячної температури повітря знаходились у межах $1,3\dots 1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 1). Таким чином виявлено, що найбільш помітне збільшення середньої місячної температури повітря відбулось на більшій частині України за винятком Карпатського регіону.

У **квітні** найбільші зміни у середній температурі повітря відбулись на території областей від Львівщини на північний схід через Хмельниччину, Житомирщину, Київщину та Чернігівщину. Підвищення середньої місячної температури повітря у центрі цього осередку (північ Хмельниччини та центральна частина Житомирщини) становила здебільшого $1,3\dots 1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а іноді $1,6\dots 1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Шепетівка, Житомир). Осередок з дещо меншими значеннями таких аномалій ($1,0\dots 1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), який охоплює вищезгаданий центр розповсюджується на територію Волині, частину Прикарпаття, північ Вінничини, південь Київщини, більшу частину Черкащини та Полтавщини, північ та захід Сумщини. На території Прикарпаття та Карпатського регіону значення додатних аномалій менші та становлять $0,6\dots 0,8(0,9)\text{ }^{\circ}\text{C}$. На решті території підвищення середньої місячної температури повітря становило від

0,4...0,6 °C до 0,7...0,8 °C. Причому найменше зростання середньої місячної температури повітря виявлено у центральній та південній частинах Херсонщини, а також на більшій частині Запоріжжя та південно-західній частині Донеччини. Тобто доведено, що найбільше підвищення середньої місячної температури повітря відбулось на території від Прикарпаття на північний схід та схід до Сумської та Полтавської областей.

У **жовтні** виявлено ситуацію, за якою на більшій частині території України середня місячна температура повітря змінилась незначно. Здебільшого додатні аномалії становили від 0,3...0,4 °C (частина території Волині та Передкарпаття) до 0,6...0,8 °C на решті окрім частини півдня, сходу і південного сходу країни. Саме там зміни у середній місячній температурі повітря у бік її підвищення виявились більш помітними. Так, найбільш помітне її підвищення виявилось на півдні Донеччини у Маріуполі (1,3 °C), а також на території від півдня Херсонщини на схід до Запоріжжя (південь, південний схід) та до Донецького регіону. У цьому осередку значення додатних аномалій становило 1,0...1,2 °C. Таким чином, найбільші зміни у підвищенні середньої місячної температури повітря протягом останніх 30 років відбулись на південному сході та півдні країни.

Наприкінці осені у **листопаді**, зміни у середній температурі повітря у теперішньому 30-річчі порівняно із минулим аналогічним періодом відбулись незначні. Вони здебільшого спостерігались на території західних, північно-західних, окремих центральних (Вінничина, Черкащина, більша частина Кіровоградщини, північ Дніпропетровщини) та південно-західних областей (Одещина, північний захід та захід Миколаївщини). Найбільше підвищення середньої місячної температури повітря становило 0,6...0,7 °C (0,9 °C Умань). На решті із вище згаданої території її підвищення становило щонайбільше 0,4...0,5 °C, але здебільшого 0,2...0,3 °C. У східній частині України середня місячна температура повітря підвищилась лише на 0,1...0,2 °C. Тобто можна сказати, що зростання середньої місячної температури повітря здебільшого

спостерігались на території західних областей України від північного заходу на південний захід та на території прилеглих до регіону областей. У східній частині України середня місячна температура повітря майже не змінилась.

На початку зими, у **грудні**, з усіх вищезгаданих місяців спостерігається найменша зміна у середній місячній температурі повітря. Встановлено, що здебільшого певні зміни (підвищення середньої місячної температури повітря) відбулись на крайньому заході, північному заході та півночі країни (від заходу Львівщини, північного заходу Волині, півночі Рівненщини, Житомирщини, Київщини та Чернігівщини). Найбільші значення додатних аномалій становили 0,4...0,5 °С, але здебільшого 0,2...0,3 °С. На решті території України підвищення середньої місячної температури повітря становило 0,1...0,2 °С. Крім того встановлено, що на окремих станціях, здебільшого розташованих на півдні та південному заході (Одещина, Запоріжжя, Миколаївщина, Херсонщина) виявлено її сталість та незмінність (рис. 1). Таким чином підвищення середньої місячної температури повітря протягом останнього тридцятиріччя 1991-2020 рр. спостерігається на території північно-західних та північних областей.

2. Теплий період року

Місяці теплого періоду року збігаються із періодом вегетації та вирощуванням рослинницької сільськогосподарської продукції. У травні найбільш активно йде вегетація рослин, а у інші місяці проходять певні фізіологічні цикли розвитку рослин та формування майбутнього врожаю. Для озимих культур у червні-липні врожай вже сформовано, а для ярих та пропашних культур він тільки формується, це стосується не тільки зернових, а й технічних культур. Для останніх остаточне формування врожаю відбувається у серпні-вересні. Крім того у вересні розпочинається збирання їх врожаю та відбувається підготовка ланів до нової посівної кампанії для озимини. Поле просторово-часового розповсюдження середньої місячної температури повітря

протягом місяців теплого сезону року 1991-2020 рр. відносно 1961-1990 рр. представлено на рис. 2.

З настанням активного вегетаційного періоду, у **травні** на території України на теперішній час спостерігається підвищення середньої місячної температури повітря однак ці зміни не настільки значні як у місяці на початку зими. Більш помітні зміни відбулись на території окремих частин західних областей – Львівщини, Хмельниччини, Тернопільщини, Чернівецьчини, Закарпаття), північно-західних (Волинської, Рівненської, Житомирської), півдня Київщини. Переважно підвищення середньої місячної температури повітря становило 0,6...0,8 °С, проте на Житомирщині (Житомир) та на Тернопіллі (Тернопіль) її підвищення було дещо більшим і становило 0,9 °С. Здебільшого на решті цієї території додатні аномалії становлять 0,4...0,5 °С. На території центральних, північно-східних та східних областей підвищення середньої місячної температури повітря було незначним, додатні аномалії здебільшого знаходились у межах щонайменше 0,3...0,4 °С, проте могли становити 0,5...0,8 °С. Так, на заході Черкащини в Умані середня місячна температура повітря підвищилась на 0,8 °С, а у цей час на Кіровоградщині у Гайвороні та на Донеччині у Маріуполі її підвищення відповідно становили 0,7 та 0,9 °С. На півдні та південному сході найменші значення додатних аномалій середньої місячної температури повітря становили 0,3...0,4 °С (відповідно Миколаїв та Запоріжжя). Проте частіше середня місячна температура повітря підвищилась на 0,7...0,8 °С.

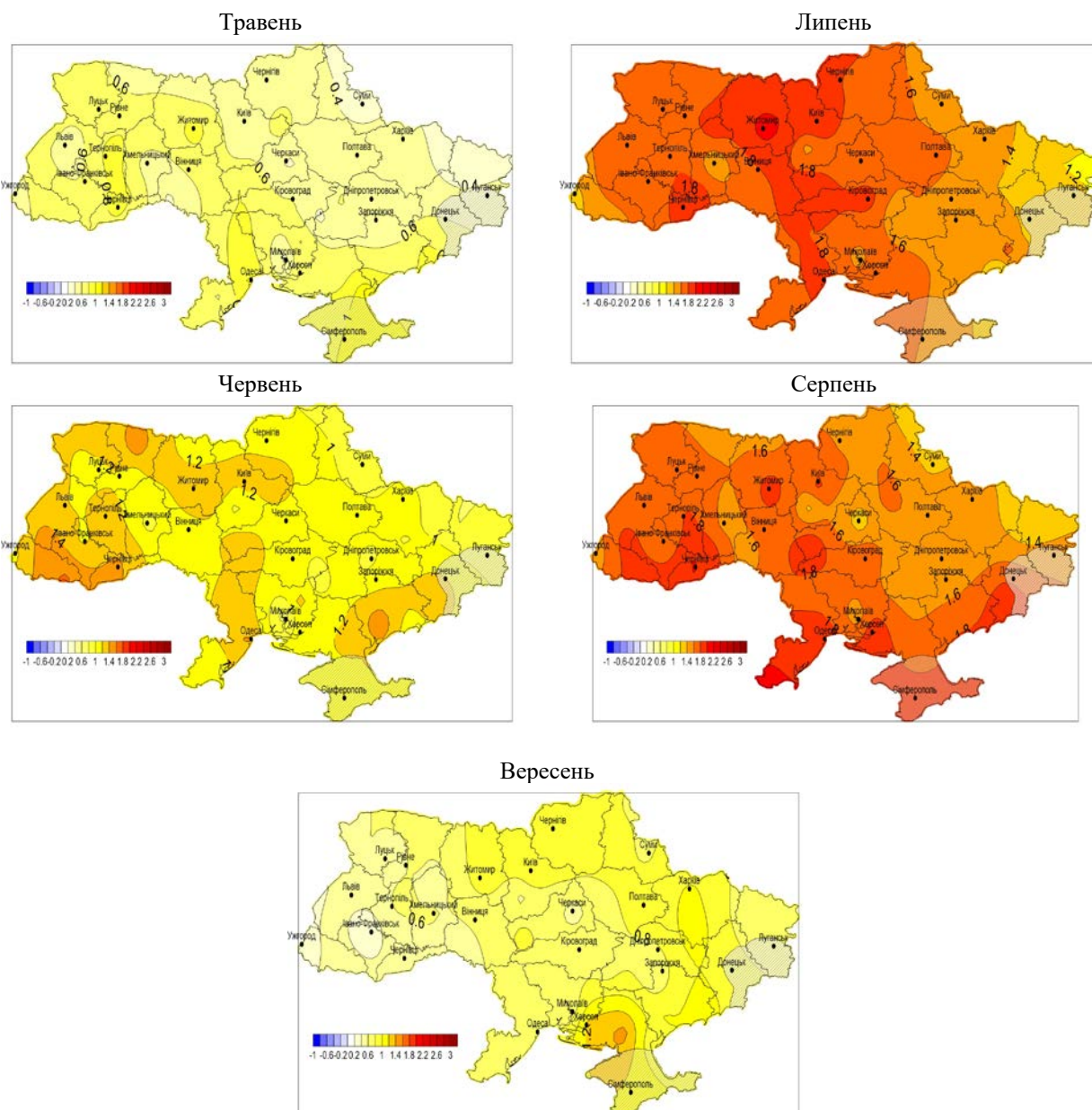


Рис. 2. Аномалії середньої місячної температури повітря за період 1991-2020 рр. відносно періоду 1961-1990 рр. у місяці теплого періоду року (травень - вересень).

Крім того на окремих станціях регіону спостерігалось ще більш значне підвищення середньої місячної температури повітря. Так, на Одещині у Любашівці та Одесі додатні аномалії становили 0,9 та 1,0 °C відповідно, а на Херсонщині у Генічеську 1,1 °C (рис. 2).

Влітку, протягом **червня** на усій території України спостерігались виключно додатні відхилення середньої місячної температури повітря. У

цілому більшій території України спостерігались відхилення середньої температури повітря у межах $1,0...1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Проте в окремих областях спостерігались як менші значення таких відхилень, так і більші. Так, менші з них значення відхилень становили $0,7...0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ і спостерігались у Хмельницькій (Хмельницький) Сумській (Дружба, Суми), Київській (Біла Церква), Луганській (Сватове), Дніпропетровській (Кривий Ріг), Запорізькій (Бердянськ), Миколаївській (Миколаїв) областях. Додатні відхилення із значеннями $1,4...1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ спостерігались на станціях в областях – Рівненській (Сарни), Житомирській (Житомир), Львівській (Славське), Закарпатті (Рахів), Чекрнівецькій (Чернівці), Черкаській (Умань) Одеській (Одеса) та на Запоріжжі (Мелітопіль). Тобто здебільшого такі осередки траплялись на території областей західного регіону і подекуди у центрі та півдні країни.

В період активного формування врожаю, у **липні** зростання середньої місячної температури повітря відбувалось по усій території України здебільшого на $1,5...1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$. На окремих станціях її підвищення було ще більшим на $2,0...2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Житомир, Київ, Умань). Найменше зростання середньої місячної температури повітря становило $1,2...1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Один із найбільших осередків зростання середньої місячної температури повітря на $1,5...1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ спостерігався на території північно-західних, північних та низки західних областей, окрім Закарпаття, а також у центральних областях від Вінничини до Черкащини, Кіровоградщини Полтавщини та частини Дніпропетровщини. На півдні аналогічний осередок знаходиться у межах Одещини, Миколаївщини та Херсонщини. На сході та південному сході на окремих територіях зростання середньої місячної температури у тридцятиріччі 1991-2020 рр. відбулось дещо повільніше на $1,2...1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2).

У **серпні** у періоді 1991-2020 рр. порівняно із періодом 1961-1990 рр. на території України спостерігаються виключно додатні аномалії середньої місячної температури повітря. Здебільшого підвищення середньої місячної температури повітря знаходяться у межах від $1,2...1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1,5...1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Крім

того на території ряду областей в окремих осередках виявлено ще більше підвищення середньої місячної температури повітря на $1,9...2,1$ °С. Так, саме такі осередки найбільшого зростання середньої місячної температури повітря було встановлено в регіонах на північному заході (Житомирщина) та півночі (Київщина), у західному регіоні на Львівщині (Славське), Чернівеччині (Чернівці), півдні Хмельниччини (Кам'янець-Подільський), південному заході Черкащини (Умань), Кіровоградщині (Гайворон), південного сходу Донеччини (Волноваха, Маріуполь), півдні Одещини (Одеса, Сарата, Ізмаїл), Запоріжжі (Бердянськ) та Херсонщині (Херсон). Найменше підвищення середньої місячної температури повітря становило $1,2...1,4$ °С та спостерігаються на північному сході Сумщини, півдні Київщини та Харківщини, у Черкасах, Дніпропетровщині (Дніпро, Комісарівка). На решті території України середня місячна температура повітря підвищилась на $1,5...1,8$ °С. Таким чином найбільше зростання середньої місячної температури повітря відбувалось здебільшого на території низки областей заходу, північного заходу, півночі, окремих центральних областях та на південному заході.

З початку настання осені у **вересні** середня місячна температура повітря протягом 1991-2020 рр. також зазнала змін у напрямку до її певного підвищення. Однак здебільшого це підвищення було не таке значне як у попередні місяці. Найбільш значне підвищення середньої місячної температури повітря знаходились у межах від $0,9...1,1$ °С до $1,3...1,5$ °С. Найменше її зростання становило $0,3...0,5(0,6)$ °С. Встановлено, що осередки найбільшого підвищення середньої місячної температури повітря здебільшого спостерігаються на Житомирщині, Чернігівщині, Сумщині, Харківщині переважно на півночі вищезгаданих областей, а також на території південної частині країни, яка охоплює більшу частину Запоріжжя, Херсонщину та північний схід Миколаївщини. На решті території переважають додатні аномалії інтенсивністю $0,5...0,7(0,8)$ °С. Крім того в окремих областях було визначено дещо менші значення таких відхилень. Так, додатні аномалії середньої місячної

температури повітря $0,3...0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ розповсюджені на території Львівщини, Закарпаття та Івано-Франківщини (рис. 2). Отже, найбільше підвищення середньої місячної температури повітря у грудні 1991-2020 рр. спостерігалось здебільшого на території низки південних областей (південь Донеччини, Запоріжжя, Херсонщина), а також на території окремих північних, північно-західних та північно-східних областей.

Висновки

У цілому на теперішній час відбулось зростання середньої місячної температури повітря на території України протягом усіх досліджуваних місяців. Проте у кожному з них виявились свої окремі особливості у розповсюдженні поля середньої місячної температури повітря.

Серед місяців холодного періоду року найбільших змін середня місячна температура повітря зазнала саме у січні, лютому та березні. Доведено, що у січні, регіонально більше за все підвищення середньої місячної температури повітря проявилось на території північно-західних, північних та північно-східних областей. Найбільше підвищення середньої місячної температури повітря періоду 1991-2020 рр. сягали $2,5...3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ від норми 1961-1990 рр., що свідчить про значну додатну аномалію температури повітря. На решті території подібні аномалії середньої місячної температури повітря були дещо менші $1,7...2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ проте вони спостерігались на більш значній території від заходу до сходу. У цей час у південному регіоні від заходу на схід середня місячна температура повітря зазнала менших змін, проте також зросла. Зростання здебільшого становило $1,0...1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, проте на Запоріжжі воно було дещо більшим $1,5...1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

У лютому відбулась зміна у розподілі середньої місячної температури повітря із певним зменшенням зростання температури повітря на Прикарпатті та особливо на Закарпатті, а також на півдні Харківщини та північному сході

Дніпропетровщини. На решті території спостерігається схожа ситуація із січнем.

Протягом березня найбільша зміна середньої місячної температури повітря у бік її зростання спостерігалось на території північно-західних, північних, північно-східних областях (1,7...2,3 °C) та в центрі країни (1,6...1,9 °C). На решті території підвищення середньої місячної температури повітря становило 1,3...1,4 °C. Тільки на більшій частині території Прикарпаття (західна та південно-західна частина) та особливо Закарпаття зростання середньої місячної температури повітря становило відповідно від 0,6...1,0 до 0,8...1,3 °C.

У квітні достатньо інтенсивне підвищення середньої місячної температури повітря спостерігається саме на території північно-західного регіону (особливо на Житомирщині та півночі Хмельниччини (1,6...1,7 °C)), півночі (1,3...1,4 °C) та крайньої півночі північного сходу країни (1,2...1,3 °C). На території центру країни підвищення середньої температури повітря становило здебільшого 1,0...1,1(1,2) °C. На решті території підвищення температури повітря становило 0,5...0,7 (0,8) °C, щонайбільше 0,9 °C.

У жовтні, на відміну від попередньо розглянутих місяців зими та початку весни, найбільш помітні зміни у регіональному розподілі середньої місячної температури повітря відбулись на південному сході та півдні України, а саме на території південного заходу Херсонщини та у Донецькому регіоні, де її підвищення становило 1,2...1,3 °C. На північ та захід від вищезгаданих осередків підвищення середньої місячної температури повітря було повільнішим і становило щонайбільше 1,0...1,2 °C, проте здебільшого не перевищувало 0,8 °C. Серед цих територій виділяється північ Луганщини, більша частина Харківщини, схід Дніпропетровщини, південний схід Полтавщини, північ та захід Запоріжжя, схід Миколаївщини, північ, північний захід та захід Херсонщини, а також крайня південно-східна частина Кіровоградщини. На решті території зростання середньої місячної температури

повітря здебільшого становило $0,4...0,5^{\circ}\text{C}$, а у окремих регіонах здебільшого на Прикарпатті, навіть до $0,3^{\circ}\text{C}$.

У листопаді на відміну від жовтня спостерігається майже протилежна картина у змінах температурного режиму повітря. Певне зростання середньої місячної температури повітря відбувається на території областей від північного заходу та заходу до центру країни. Найбільші дратні аномалії становлять $0,6...0,9^{\circ}\text{C}$ та переважно спостерігаються в окремих районах Прикарпаття (здебільшого на Львівщині), на північному заході та півночі (Волинь, Житомирщина, Київщина), у західній та південно-західній частині окремих центральних областей, південно-західному регіоні (Одещина). В областях які розташовані східніше, підвищення середньої місячної температури повітря майже не відбулось, додатні аномалії становили здебільшого $0,1...0,3^{\circ}\text{C}$, а щонайбільше $0,5^{\circ}\text{C}$.

У грудні незначне підвищення середньої місячної температури повітря спостерігалось на території північного-заходу Львівщини, Волині, півночі Житомирщини, Київщини, Чернігівщини ($0,4...0,5^{\circ}\text{C}$). На решті території зростання середньої місячної температури повітря становило $0,1...0,3^{\circ}\text{C}$. На окремих станціях середня місячна температура повітря навіть не зазнала змін.

Для місяців теплого періоду року встановлено, що для них так само натеper властиве підвищення середньої місячної температури повітря, проте її зростання мало дещо інші риси порівняно із місяцями холодного періоду року.

У травні більш помітне підвищення середньої місячної температури повітря на території західних областей від Львівщини до Закарпаття, північно-західних та південної частини Київщини. Переважно найбільше підвищення середньої місячної температкри повітря становило $0,6...0,8^{\circ}\text{C}$, подекуди $0,9^{\circ}\text{C}$ у Житомирі та Тернополі.

У червні на більшій території України спостерігались підвищення середньої температури повітря у межах $1,0...1,3^{\circ}\text{C}$, проте на території західного регіону, частини північного заходу та півночі (Київщина), а також на

заході Черкащини, Кіровоградщини, більшої частини Одещини та на південному сході її зростання було більшим на $1,4...1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

У липні спостерігались істотні зміни у зростанні середньої місячної температури повітря на території північно-західних, західних та північних областей ($1,5...1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), а також в окремих областях центру та півдня країни. На сході та південному сході зростання середньої місячної температура повітря виявилось повільнішим.

У серпні на території України зростання середньої місячної температури повітря здебільшого знаходиться у межах від $1,2...1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1,5...1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, проте на окремих ділянках західного та південно-західного регіону її підвищення сягнуло $1,9...2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (здебільшого південь Закарпаття, Чернівеччина, Одещина).

У вересні тридцятиріччя 1991-2020 рр. найбільш значне підвищення середньої місячної температури повітря знаходились у межах від $0,9...1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1,3...1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ при найменших значеннях $0,3...0,5(0,6)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Осередки найбільшого підвищення середньої місячної температури повітря спостерігаються у північних частинах областей північного заходу, півночі та північного сходу, а також у південній частині країни, яка охоплює більшу частину Запоріжжя, Херсонщину та північний схід Миколаївщини.

Практична значимість отриманих результатів полягає у встановленні сучасних тенденцій поля середньої місячної температури повітря на сучасному етапі зміни клімату в Україні та можливості надання рекомендацій для планування роботи різних ланок аграрного сектору у першу чергу рослинництва.

Отримані результати є оригінальним матеріалом, який натеper виконано для території України вперше. У подальшому планується дослідити які зміни у величині та просторово-часовому розповсюдженні середньої місячної температури повітря відбулись, а також з'ясувати за рахунок якого саме періоду це сталось. Також доречним є встановлення тенденцій у просторово-

часовому розподілі поля середньої місячної температури повітря у тридцятиріччі 1991-2020 рр.

Список літератури

- Martazinova, V. F., & Ivanova, Ye. K. (2011). *Peculiarities of Synoptic Processes of Various Probability Categories in the End of XX – the Beginning of XXI Centuries*. Global and Regional Climate change. K.: Nika-Centre, 80-89.
- Бабиченко, В. Н. (Eds). (1987). *Температура воздуха на Украине*. Л.: Гидрометеиздат.
- Бабіченко, В. М., Ніколаєва, Н. В., & Гущина, Л. М. (2007). Зміни температури повітря на території України наприкінці ХХ та на початку ХХІ століття. *Український географічний журнал*, 4, 3-12.
- Барабаш, М. Б., Гейко, Л. А., & Гребенюк, Н. П. (1986). Современные изменения температуры воздуха и осадков на Украине. *Труды УкрНИГМИ*, 209, 108-114.
- Винников, К. Я., & Гройсман, П. Я. (1979). Эмпирическая модель современных изменений климата. *Метеорология и гидрология*, 3, 25-36.
- Винников, К. Я., Гройсман, П. Я., Лугина, К. М., & Голубев, А. А. (1987). Изменения средней температуры воздуха Северного полушария за 1881-1985 гг. *Метеорология и гидрология*, 1, 45-55.
- Гребенюк, Н. П., Корж, Т. В., & Яценко, О. О. (2002). Нове про зміни глобального та регіонального клімату в Україні на початку ХХІ ст. *Водне господарство України*, 5-6, (рр. 34).
- Дзюба, А. В., & Панин, Г. Н. (2007). Механизмы формирования многолетних направленных изменений климата в прошедшем и текущем столетиях. *Метеорология и гидрология*, 5, 5-27.
- Израэль, Ю. А., Груза, В. Г., Катцов, В. М., & Мелешко, В. П. (2001). Изменения глобального климата. Роль антропогенных воздействий. *Метеорология*, 5, 5-21.

- Ліпінський, В. М., Дячук, В. А., & Бабіченко, В. М. (Eds). (2003). Клімат України. [Монографія]. К.: Вид-во. Раєвського.
- Логвинов, К. Т., & Барабаш, М. Б. (1986). О возможных изменениях климата. *Труды УкрНИГМИ*, 209, 114-117.
- Логвинов, К. Т., & Барабаш, М. Б. (1987). Исследование периодических изменений температуры воздуха и осадков на Украине. *Труды УкрНИГМИ*, 224, 71-76.
- Логвинов, К. Т., & Щербань, М. И. (Eds). (1984). *Природа Украинской ССР. Климат*. [Монография]. К.: Наукова думка.
- Мартазинова, В. Ф., & Свердлик, Т. А. (1998). Крупномасштабная атмосферная циркуляция XX столетия, ее изменения и современное состояние. *Труды УкрНИГМИ*, 246, 21-27.
- Мартазинова, В. Ф., & Сологуб, Т. А. (2003). Атмосферная циркуляция, формирующая засушливые условия на территории Украины в конце XX столетия. *Труды УкрНИГМИ*, 248, 36-47.
- Осадчий, В. І., & Бабіченко, В. М. (Eds). (2010). *Дати переходу температури повітря в Україні за сучасних умов клімату*. [Монографія]. К.: Вид-во Ніка-Центр.
- Осадчий, В. І., Бабіченко, В. М., Набиванець, Ю. Б., & Скринник, О. Я. (Eds). (2013). *Динаміка температури повітря в Україні за період інструментальних метеорологічних спостережень*. [Монографія]. К.: Вид-во Ніка-Центр.
- Прихотько, Г. Ф., Ткаченко, А. В., & Бабіченко, В. Н. (Eds). (1967). *Климат Украины*. [Монография]. Л.: Гидрометеиздат.
- Шевчук, В. Я. (Eds). (2001). *Проблеми і стратегія виконання Україною Рамкової Конвенції ООН про зміну клімату*. Рада Національної Безпеки і Оборони України. Київ.

- Волощук, В. М., Гродзинський, М. Д., & Шищенко, П. Г. (1998). Географічні проблеми сталого розвитку України. *Український географічний журнал*, 1, 13-18.
- Волощук, В. М. (1993). Про можливі зміни середньорічного температурного режиму України в першій половині ХХІ століття. *Доклади Академії наук України*, 12, 105-111.
- Волощук, В. М., & Бойченко, С. Г. (1997) Реакція ходу приземної температури України на глобальне потепління клімату. *Доповіді НАН України*, 9, 113-118.

ОГЛЯД РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ І СВІТІ

Попович О.Р., Національний університет «Львівська політехніка», к.т.н., доц., доцент кафедри екології та збалансованого природокористування, Львів, Україна

Вронська Н.Ю., Національний університет «Львівська політехніка», к.т.н., доц., доцент кафедри екології та збалансованого природокористування, Львів, Україна

Мальований М.С., Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., проф., завідувач кафедри екології та збалансованого природокористування, Львів, Україна

Тимчук І.С., Національний університет «Львівська політехніка», к.с.-г.н., доц., доцент кафедри екології та збалансованого природокористування, Львів, Україна

Abstract

Alternative energy is the energy of natural phenomena, which is transformed into thermal or electrical energy by means of conversion in special installations. Alternative sources of energy include: energy from the sun, wind, waves (ebb and flow), water, biomass, biogas, geothermal (thermal waters). Wind energy is one of the most promising and cheap types of alternative energy.

Вступ

Зараз, як ніколи раніше, гостро постало питання: що чекає на людство – енергетичне голодування чи енергетичний достаток? Адже науково-технічний прогрес неможливий без розвитку енергетики, електрифікації. Для підвищення продуктивності праці головне значення має механізація і автоматизація виробничих процесів. Але переважна більшість технічних засобів механізації і

автоматизації має електричну основу. Для того, щоб попередити перше, тобто енергетичне голодування, і домогтися другого – енергетичного достатку – слід використовувати, такі джерела електроенергії, які чинять мізерний негативний вплив на навколишнє середовище, відносно використання інших джерел, та мають здатність відновлюватись і ніколи не закінчуватись. Це так звані альтернативні джерела енергії. Альтернативна енергетика – це енергія природних явищ, яка шляхом перетворення в спеціальних установках перетворюються в теплову або електричну енергію. До альтернативних джерел енергії належать: енергія сонця, вітру, хвиль (відпливів та припливів), води, біомаси, біогазу, геотермальна (термальні води).

Основний матеріал

Вітроенергетика – один з найбільш перспективних та дешевих видів альтернативної енергетики. Адже за вітер не потрібно платити – він є повсюди: від легкого вітерцю до могутніх ураганів. Ці вітри могли б, при правильному використанні, повністю задовольнити потреби людства. За підрахунками вчених, загальний вітроенергетичний потенціал Землі в 30 разів перевищує річне споживання електроенергії у всьому світі. Енергія повітряних мас, що постійно рухаються, у сотні разів перевищує запаси гідроенергії усіх річок планети.

Роблячи висновки з досвіду світу, завдяки державній підтримці вітроенергетика отримала потужний поштовх для розвитку і цим вийшла на лідерські позиції в економіках розвинених країн.

В Європейському Союзі найкраще поєднується енергетична та екологічна політика та механізми її реалізації. Згідно з Директивою 2009/28/ЄС:

- місцевим енергетичним компаніям надаються квоти в розмірі 2-15 % від загального обсягу продажу електроенергії, виробленої на ВЕУ;
- власнику вітроенергетичного генератора надається грант в розмірі 40-75 % від вартості генератора на його купівлю та встановлення;

- приватному власнику для купівлі, встановлення та експлуатації ВЕУ дозвіл не потрібний.

Наприклад, у Німеччині, Іспанії, Данії довела свою ефективність у розвитку вітроенергетики система фіксованих пільгових тарифів. Виробники отримують фіксовану плату за кожну кіловат-годину електроенергії, вироблену і відправлену з вітроенергетичних станцій.

Система торгівлі «зеленими» сертифікатами передбачає, що за кожну кВт*год, вироблену на основі ВЕС, видаються «зелені» сертифікати, які можна використати на вільному ринку. Виручка від їх продажу є надбавкою до основного тарифу. Така система прийнята у декількох штатах США, Італії, Швеції та Великобританії.

В Німеччині правові норми у сфері відновлювальних джерел енергії, зокрема у сфері вітроенергетики, регулюються Законом «Про нове регулювання законодавства відновлювальних джерел енергії в системі енергопостачання» (Das ErneuerbareEnergien-Gesetz – EEG). Закон вимагає мережних операторів закупляти електроенергію, вироблену на основі альтернативних джерел. Виробникам «чистої» електроенергії з боку держави надається підтримка у вигляді компенсацій.

Зокрема, для вітроенергетики в Законі передбачено:

- тариф для вітроенергетичних об'єктів у розмірі 9,2 євроцентів/кВт*год електроенергії;
- для проектів модернізації ВЕУ, які вже працюють, якщо вік турбін, які потребують заміну, буде становити більше 10 років і потужність нових турбін збільшиться вдвічі, спеціальну премію в розмірі 0,5 євроцентів/кВт*год електроенергії.

У США правові аспекти у сфері вітроенергетики регулює закон «Про енергетичну політику». В ньому, як і в інших державах, передбачаються відповідні пільги за підвищення виробництва електроенергії на основі ВЕС. Держава допомагає у фінансуванні виробництва обладнання та проведення

науково-дослідних робіт для вітроенергетики. Американські фермери отримують щорічно 3000-5000 доларів США орендних платежів за одну ВЕС, яку побудували на їх ділянці. Опитування показали, що деякі фермери отримують більші доходи від здавання землі в оренду під вітроенергетичні установки, ніж від основної діяльності.

У Китаї законом «Про просування розвитку та використання ПДЕ» (2006р) було визначено низку фінансових стимулів для розвитку вітроенергетики, а саме пільгові «зелені» тарифи, податкові знижки, позики під низькі відсотки. Згідно з цим законом, державні енергопостачальні компанії повинні закуповувати електроенергію, вироблену на ВЕС. Для виробництв, які працюють за імпортною технологією, завдання полягає в тому, щоб 60 % виробництва та вітроагрегатів перевести на національні технології. В результаті, майже всі ВЕС оснащені вітровими установками китайського виробництва (Звіт відділу інформаційно-аналітичного забезпечення..., б.д.).

В Україні початком розвитку вітроенергетики вважається 1996 рік, коли був прийнятий Указ Президента «Про будівництво вітряних електростанцій», яким передбачалося розвиток вітроенергетики та початок будівництва ВЕС.

На сьогодні в Україні правове регулювання вітроенергетики здійснюється за допомогою таких законів: «Про альтернативні джерела енергії», «Про землі енергетики та правовий режим спеціальних зон енергетичних об'єктів». В законодавчу базу, що стосується вітроенергетики входять нормативно-правові акти, такі як «Про встановлення «зеленого тарифу» для окремих об'єктів альтернативної енергетики на певний період часу», «Про затвердження примірних договорів, які укладаються із суб'єктами господарювання, що виробляють електричну енергію з використанням альтернативних джерел енергії». Також правове регулювання ВЕС виконується завдяки ряду державних стандартів України (ДСТУ): ДСТУ 4037-2001 Установки електричні вітрові. Загальні технічні вимоги; ДСТУ 4051-2001 Станції електричні вітрові. Загальні

технічні умови; ДСТУ 8292:2015 Вітроенергетика. Вітрові електричні станції. Приєднання до електроенергетичної системи.

Для стимулювання виробництва електроенергії з альтернативних джерел встановлюється, відповідно до ЗУ «Про альтернативні джерела енергії», «зелений» тариф – це спеціальний тариф, за яким закуповується електрична енергія, вироблена на об'єктах електроенергетики, зокрема на введених в експлуатацію чергах будівництва електричних станцій, з альтернативних джерел енергії. Тариф встановлюється Національною комісією з питань державного регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг.

«Зелений» тариф актуальний для кожного суб'єкта господарювання, який виробляє електроенергію з відновлювальних джерел. Наприклад, коефіцієнт «зеленого» тарифу для електроенергії, виробленої на ВЕС, потужністю не більше 600 кВт та потужністю від 600 кВт до 2000 кВт станом на 01.01.2017-31.12.2019 рр. був 1,08 та 1,26 відповідно; станом на 2020-2024 рр. запланований коефіцієнт – 0,96 та 1,12 відповідно.

Коефіцієнт «зеленого» тарифу електроенергії, виробленої генеруючими установками приватних домогосподарств, потужність яких не перевищує 50 кВт станом на 2017-2019 рр. становив 2,16; станом на 2020-2024 рр. запланований коефіцієнт – 1,94 (Закон України «Про альтернативні джерела енергії», б.д.).

Потужність вітроенергетики в 2019 році стрімко зросла, якщо порівнювати її з іншими роками. За даними Всесвітньої ради вітроенергетики (The Global Wind Energy Council, GWEC) загальна потужність вітроенергетики становила 651 ГВт у всьому світі, що на 10 % більше ніж у 2018 році. У 2019 р. було встановлено нові вітроенергетичні станції потужністю 60,4 ГВт, що на 19 % більше порівняно з 2018 роком. Китай, США, Велика Британія, Індія та Іспанія – п'ять найбільших країн-виробників вітрових установок на 2019 р., які розробили 70 % всіх нових вітроенергетичних станцій в цьому році (рис. 1).

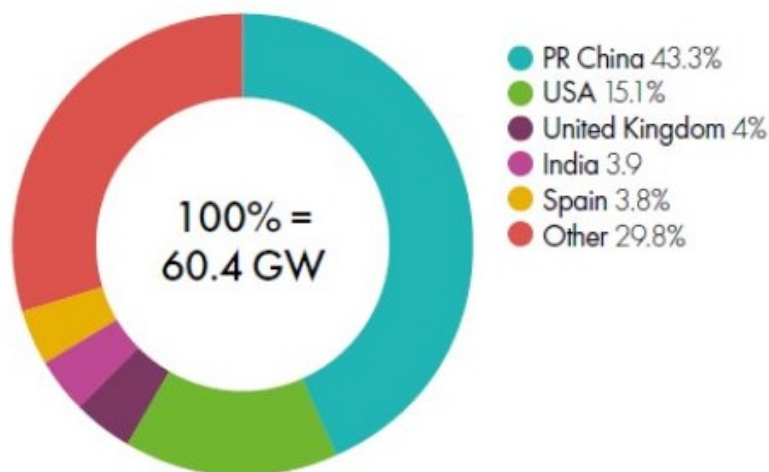


Рис.1. Нова потужність вітроенергетики в 2019 р

Нові установки на морському вітровому ринку досягли 54,2 ГВт, тоді як ринок вітрових морських островів перейшов рубіж у 6,1 ГВт, що становить 10 % нових установок у 2019 році – це найвищий рівень дотепер. Китай залишається загальним лідером у нових установках для морського вітру, додаючи потужність понад 2,3 ГВт у 2019 році, Великобританія та Німеччина на другому та третьому місці, встановивши 1,8 ГВт та 1,1 ГВт відповідно (рис. 2).

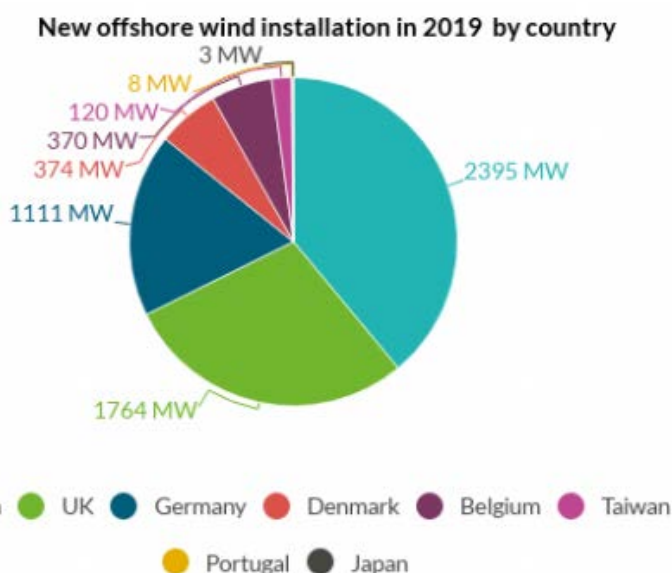


Рис. 2. Нові морські вітрові установки у 2019 по країнах

Для того, щоб різко збільшити частку вітроенергетики на енергетичних ринках та прискорити глобальний енергетичний перехід, необхідно здійснити ряд крокових змін. До них належать: постійний фокус на рішеннях, що підтримують інтеграцію вітру та інших відновлюваних джерел енергії у мережу; рішення для більш ефективного транспортування великої кількості відновлюваної енергії на більші відстані; робота з іншими технологіями – такими як водень – для декарбонізації секторів, де пряма електрифікація є викликом; і підвищення нашої здатності зберігати електроенергію у періоди надмірного постачання.

Найбільшими світовими виробниками вітроенергетики є Китай і США, які виробляють понад 60 % енергії у світі.

Однак через спалах пандемії прогнозувати точний розвиток вітроенергетичного сектору не можливо. Повний вплив COVID-19 на виробництво вітроенергетики досі невідомий. Спалах вірусу може уповільнити будівництво енергетичних проектів відповідно до загального економічного сповільнення виробництва та розвитку інфраструктури.

За даними Української вітроенергетичної асоціації, сумарна потужність вітроенергетичного сектору України на кінець 2019 року становила 533 МВт. З них 12 вітроелектростанцій із загальною потужністю 395 МВт надавали екологічно чисту електроенергію Україні за «зеленим» тарифом. Обсяг вітроенергетики, виробленої в 2019 році, може забезпечити більше 246 000 українських домогосподарств, за умови, що вони будуть споживати в середньому 400 кВт*год за місяць.

Завдяки ВЕС було скорочено викидів вуглекислого газу в атмосферу на 835 млн т; а також зекономлено близько 170 т вугілля та 110 м³ природного газу.

Лідером за встановленою вітроенергетичною потужністю є Запорізька область (рис. 3), адже тут встановлені найбільші в Україні та одна з найбільших в Європі Ботієвська ВЕС та Приморська ВЕС з потужністю 200 МВт кожна.

Потужність кожної ВЕС дозволяє окремо забезпечити електроенергетикою південну частину Запорізької області. За допомогою ВЕС було зменшено на 730 тис т CO₂ викидів в атмосферу. Ботієвська ВЕС складається з 65 вітротурбін, які будували у дві черги. У Приморській ВЕС працює 52 вітротурбіни (Українська вітроенергетична асоціація..., б.д.).

В Донецькій області знаходиться Новоазовська ВЕС із потужністю 107,5 МВт, яка була описана вище як перша ВЕС за часів незалежної України. Зараз тут функціонує 23 вітротурбіни Fuhrlander FL. ТОВ «Фурлендер Віндтехнолоджі» (Краматорськ, Донецька обл.) у 2019 році запропонував українському ринку найпотужнішу ВЕС наземного базування, проектна потужність якої становить 4,5 МВт. Нова ВЕС розроблена відповідно до європейських стандартів і відповідає нормам ІЕС 61400-1 та класу вітру ІЕС 3а. В 2019 році почалось будівництво компанією «АтомВінд-Краматорськ» трьох нових ВЕУ на Краматорській ВЕС, потужністю 4,5 МВт.

В Херсонській області було введено 12 вітротурбін Новотроїцької ВЕС з потужністю 3,65 МВт кожна, а також 8 вітротурбін потужністю 28,8 МВт. На півдні Херсонської області експлуатується вітротурбіна з V136 одиничною потужністю 3,65 МВт. Ця сучасна вітротурбіна данського виробництва має найбільший діаметр ротора серед вітрових турбін, встановлених на сьогоднішній день в Україні – 136 м, в той час як довжина кожної лопаті становить 66,7 м.

За минулий рік в Миколаївській області в Причорноморському вітряному парку були введені в експлуатацію 7 вітротурбін із загальною потужністю 21,7 МВт. Також тут знаходиться друга за потужністю (35 МВт) ВЕС в Україні – Дмитрівська. ВЕС складається з 14 вітротурбін.

Продовжує розвиватись вітроенергетика в Львівській та Івано-Франківській областях. У Львівській області знаходяться 3 та 4 за потужністю вітроелектростанції в Україні – це ВЕС «Старий Самбір-2» та ВЕС «Старий

Самбір-1» відповідно. Потужність ВЕС «Старий Самбір-2» складає 20,7МВт, а ВЕС «Старий Самбір-1» – 13,2 МВт.

Були введені в експлуатацію у 2018 році перші 2 вітротурбіни компанії ENERCON в Тернопільській області. Потужність кожної вітротурбіни становить 2 МВт (Вітрова енергетика в Україні..., б.д.).

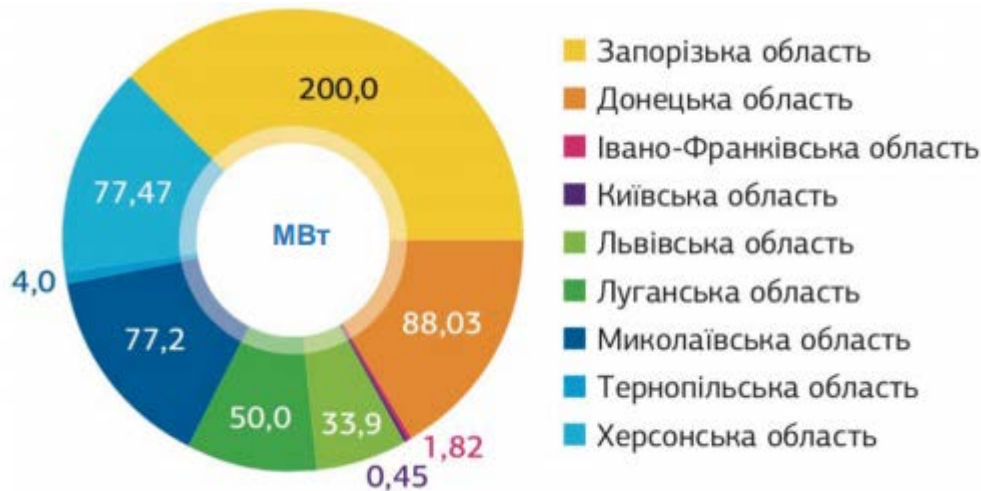


Рис. 3. Розвиток вітроенергетики по областях, у МВт

Моніторинг проведено до грудня 2021 року. Війна внесла зміни і в розвиток вітроенергетичного сектору.

Вітроенергетичний сектор України також розвивається з кожним роком все краще. Лідером серед областей за встановленою потужністю є Запорізька, в якій розташовані 2 найбільші ВЕС країни. За допомогою вітроелектростанцій Україні вдалось істотно скоротити викиди вуглекислого газу та зекономити використання викопного палива.

Розвитку вітроенергетики істотно сприяють системи «стимулювання» від уряду країн, такі як квоти, «зелені» тарифи, пільги, премії, «зелені» сертифікати.

Як показує світовий досвід поширення вітроенергетики – це один з кращих видів альтернативної енергетики. До основних переваг використання вітроенергетичних установок належать:

- екологічно-чиста енергія. Сила вітру – це «чисте», не забруднююче джерело з якого виробляється електроенергія. На відміну від інших типів електростанцій, ВЕУ не виділяє у повітря токсичних речовин або забруднювачів, які можуть завдати великої шкоди навколишньому середовищу та людині. Наприклад, під час спалювання рідкого чи твердого палива при експлуатації ТЕС виділяється чадний (CO) та вуглекислий (CO₂) гази, сажа, пил, оксиди нітрогену (NO_x) і сірки (SO_x). Зміни або інколи руйнування природних ландшафтів відбувається внаслідок видобутку торфу чи вугілля відкритим способом. Під час виробництва і транспортування нафти є великий ризик її розливу, який може знищити на великих територіях все живе. Під час роботи АЕС в атмосферу потрапляє чимало радіоактивних ізотопів, які пізніше з їжею чи водою потрапляють в організми тварин та людей і спричиняють різного роду захворювання.

Понад 1500 тонн викидів вуглекислого газу на рік можна усунути, використовуючи турбіну із потужністю як мінімум 1 МВт замість одного мегавата енергії з викопного палива. Вітрові турбіни Vestas нешкідливо виробляють електроенергію від вітру, що проходить повз. Енергія вітру не утворює відходів або забруднює воду, адже це надзвичайно важливий фактор, враховуючи дефіцит води. На відміну від викопного палива та атомних електростанцій, енергія вітру має один з найнижчих показників споживання води, що робить її ключовою для збереження гідрологічних ресурсів. Наприклад, в Україні під час роботи АЕС витрачається близько 3000 км³ прісної води в рік, після очищення цієї води повертається близько 40 % і внаслідок застарілих технологій в її складі можна виявити радіоактивні речовини або важкі метали.

Виробництво, транспортування та встановлення вітрогенератора незначно сприяє глобальному потеплінню, але саме виробництво електроенергії не передбачає жодних викидів в атмосферу;

- зменшення споживання викопного палива. Виробництво електроенергії з енергії вітру зменшує потребу у використанні викопного палива. Це не тільки зменшує викиди вуглецю, але й допомагає зберегти запаси природних ресурсів Землі. Як результат, запаси викопного палива, як вугілля, нафта та природний газ, збережуться надовго.

- відновлювальна енергія. Вітер – безкоштовний невичерпний відновлювальний ресурс, на відміну від викопного палива. На відміну від запасів викопного палива вітер ніколи не закінчиться. Поки Сонце продовжує світити ми зможемо використовувати енергію вітру на землі.

Кілька незалежних дослідницьких груп дійшли одних і тих же висновків: світовий потенціал вітроенергетики становить понад 400 ТВт (тераватт). Це робить вітрові установки життєздатним варіантом, який допомагає задовольнити наші майбутні потреби в енергії;

- вітроустановки Vestas повністю автономні, тому для виробництва електроенергії їм не потрібні інші джерела енергії. Також для постійного контролю працівникам не потрібно бути безпосередньо на території ВЕС, адже система працює комп'ютеризовано. Технічний стан турбін перевіряються 1 раз на квартал безпосередньо на ВЕС. Тому турбіни розміщено у малолюдних та віддалених місцях для того, щоб не завдавати небажаних, для людей навколишніх територій, змін у повсякденне життя;

Згідно з повідомленням Міжнародного агентства з відновлювальної енергетики (IRENA), у 2019 році в галузі відновлювальної енергетики працювало понад 10 млн людей по всьому світу, з цих робочих місць близько 2 млн були у вітроенергетиці. Китай є лідером у забезпеченні понад 500 000 таких робочих місць, Німеччина посідає друге місце з приблизно 150 000 робочих місць, а США – на третьому місці з близько 100 000 робочих місць у вітроенергетиці.

Вітрогенератори виробляють електроенергію від двох до шести центів за кіловат-годину, що є одним з найнижчих джерел відновлюваних джерел енергії.

Оскільки технології, необхідні для вітрогенераторів, продовжували вдосконалюватися, ціни також знизилися. Крім того, зараз немає конкурентоспроможного ринку вітроенергетики, оскільки вітер – це вільно доступний природний ресурс, більша частина якого не використовується. Основна вартість малих вітрогенераторів – це процес придбання та встановлення, який в середньому становить від 48 000 до 65 000 доларів за установку. Енергія, що забирається з турбіни, компенсує витрати на установку, а також забезпечить практично безкоштовну енергію протягом років.

Попри чималу кількість переваг, вітроелектростанції чинять незначний негативний вплив на стан навколишнього середовища.

Одним із найбільш негативних впливів вітроелектростанцій є загроза птахам та рукокрилим. Небезпеку для живих організмів становлять обертові елементи турбіни, які перешкоджають міграційним шляхам птахів. Будівництво ВЕС порушило середовище проживання птахів. Зіткнення птахів чи кажанів із лопатями під час обертання, з повітряним потоком за турбіною чи лініями електропередач може завдати їм травм чи призвести до смерті.

Досліджено, що шумове забруднення призводить до психічних розладів у птахів. Шум впливає на їхнє самопочуття та зменшує їх чисельність. Вчені виявили, популяція птахів може скоротитись близько на 90 % при підвищенні природного рівня шуму на 10 Дб.

Однак, зараз дослідники вважають, що ВЕУ представляють меншу загрозу дикій природі, ніж інші антропогенні дії. Наприклад, установки, такі як щогли стільникового телефону та радіовежі, набагато небезпечніші для птахів та кажанів, ніж віротурбіни. Тим не менш, вітроенергетичні установки сприяють смертності популяцій птахів та кажанів.

Спостерігається також незначний вплив вітроелектростанцій на рослини і тварини. Внаслідок шумового забруднення рослини повільніше ростуть, інколи рослини можуть надмірно втрачати вологу і як наслідок – в'яне листя та обсихають квіти. За схожою схемою шум діє і на тварин. Наприклад, у бджіл

зменшується здатність орієнтуватись, а самі личинки бджіл при надмірному шумовому забрудненні гинуть. Якщо гнізда тварин чи птахів розташовані досить близько до ВЕС, то можливі тріщини в шкарлупах яєць.

Для людей основним недоліком вітроелектростанцій також є шумове забруднення. Шум від ВЕС поділяється на механічний (акустичний) та аеродинамічний.

Акустичний шум зазвичай виникає під час роботи генератора, підшипника, редуктора. Під час вимірювань рівня шумового забруднення окремих частин вітротурбіни V112-3.3 було виявлено, що від гондоли шум становив 60 дБ, ротора – 53 дБ, вежі – 35 дБ. Шумове випромінювання вітротурбіни відносно невелике, адже вітротурбіни Vestas виготовляють із армованого бетону (будматеріал, основою якого є цемент з додаванням металу для кращої міцності).

Небезпеку життя людині становлять різні аварійні ситуації, які можуть виникнути на вітроелектростанції через технічний стан окремих деталей турбіни або внаслідок поганих погодних умов. Наприклад, причиною відриву лопатей може стати як перевищення швидкості повітряного потоку, що сприяє перевищенню швидкості ротора, так і зношення чи пошкодження матеріалу ротора або лопаті.

Проте дослідники підраховали, що лопать або її деталь, яка прикріплена на висоті 115-150 м, не може відлетіти далше 300 м. Інша відірвана деталь може відлетіти з тієї самої висоти на відстань в межах від 100 м до 200 м. Відірвані деталі не становлять ризик для місцевих будинків, адже вони розташовані далше ніж 300 м. Однак ці деталі становлять небезпеку для персоналу ВЕС, який міг в цей час знаходитись на території вітроелектростанції або жителів прилеглих територій, які могли займатись сільськогосподарською роботою на своїх полях, розташованих поруч із вітротурбінами чи сторонніх людей при несанкціонованому доступі на охоронні території ВЕС.

У багатьох людей вид на вітротурбіни викликає незадоволення – ВЕС спричиняє так зване візуальне «забруднення». Це твердження для одних людей може бути як недолік, а для інших – перевагою. Адже, коли багатьом людям подобається вигляд вітрових електростанцій, іншим це не подобається, багато хто вважає їх як плямою на пейзажі. Прихильники дикої природи не схвалюють порушення природного ландшафту вітроустановками. Однак, це твердження зводиться до особистої думки.

ВЕС викликає у населення дискомфорт, який спричинений миготінням тіней обертових частин турбіни після сходу сонця та перед його заходом, а протягом дня – мерехтінням (відблиски) сонячних променів.

Говорячи про негативний вплив вітроелектростанцій на довкілля чи стан здоров'я людей основними проблемами є загроза птахам та рукокрилим, шумове забруднення як тварин і рослин, так і для людини та візуальне забруднення. Проте, кожен з цих впливів можна тим чи іншим способом зменшити або взагалі ліквідувати.

Для запобігання травм обслуговуючого персоналу та інших людей, які опинилися неподалік ВЕС варто налаштувати системою сигналізації, яка буде спрацьовувати під час будь-яких аварійних ситуацій.

Висновки

ВЕС мають ряд переваг: екологічно-чиста енергія, зменшення споживання викопного палива, відновлювальна енергія вітру, автоматизоване управління, підвищення зайнятості населення.

При утворенні електроенергії за допомогою ВЕС не виділяється у повітря токсичні речовини або забруднювачі, які можуть завдати великої шкоди навколишньому середовищу та людині. Завдяки вітроелектростанціям було зменшено використання традиційних джерел палива, таких як вугілля, нафта, природний газ. На відміну від запасів викопного палива вітер відновлюється і не закінчиться, поки сонце буде світити.

Список використаних джерел

- Вітрова енергетика в Україні: 7 найпотужніших станцій. (б.д.). Режим доступу:
<https://shotam.info/vitrova-enerhetyka-v-ukraini-7-naypotuzhnishykh-stantsiy/>
- Закон України «Про альтернативні джерела енергії». (б.д.). Режим доступу:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15>
- Звіт відділу інформаційно-аналітичного забезпечення зарубіжною інформацією
НТЦЕ НЕК «Укренерго». (б.д.). Зарубіжна практика стимулювання
розвитку поновлюваних джерел енергії та їх приєднання до
електромереж енергосистем.
- Українська вітроенергетична асоціація. Офіційний сайт. (б.д.). Режим доступу:
<http://www.uwea.com.ua/>

ОЦІНКА СОНЯЧНИХ РЕСУРСІВ ТА ГЕЛІОПОТЕНЦІАЛУ УКРАЇНИ У СВІТІ СУЧАСНИХ ЗМІН КЛІМАТУ

Тимофєєв В.Є., д-р геогр. н., Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, відділ кліматичних досліджень та довгострокових прогнозів погоди

Кихтенко Я.В., аспірант, Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, відділ кліматичних досліджень та довгострокових прогнозів погоди

Савчук С.В., наук. співроб., Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, відділ кліматичних досліджень та довгострокових прогнозів погоди

Татарчук О.Г., мол. н.с., Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, відділ кліматичних досліджень та довгострокових прогнозів погоди

Abstract

The article highlights the assessment of the potential of the solar resources of Ukraine through the analysis of the modern mode of solar radiation, its components with spatial and temporal distribution and the connections with climate variability, the analysis of the factors that make up the modern mode and determine future changes.

The analysis of the most significant characteristics of solar energy showed their sufficiency for the use of their energy capacity in a significant part of Ukraine. The obtained results indicate the possibility of using satellite data of radiation characteristics for the large areas. In recent decades, there has been a certain change in radiation indicators, which indicates the growth of the potential of solar energy resources in and increases the prospects for the use of solar radiation in solar energy in most of the country. Changes in the components of the radiation regime are

accompanied by fluctuations during the growing season with a tendency to increasing aridity; which significantly affects the conditions of cultivation of agricultural crops.

The description of the main climate-forming factors, geophysical (external) and internal (atmospheric circulation) in the light of modern climate changes, with a view to the diagnosis and prediction of certain extreme phenomena, is given. A general forecast of the development of the climate system by 2100 is provided.

Along with the near-surface temperature growth in all seasons of the year, the degree of climate extremeness has increased in the last decade, as well as the climate-related vulnerability of most regions of Ukraine. During the summer season, the regions of the south, east, and center of Ukraine are singled out as the most vulnerable.

The frequency of droughts during the warm season has been increased, which must be taken into account when making long-term forecasts for the future and planning the economy. Based on a set of solar and meteorological parameters, a table of thresholds of diagnostic predictors for forecasting drought phenomena was obtained.

In the synoptic plan, climatic changes are caused by the strengthening of the influence of high barometric pressure over Europe. Modern changes in the atmospheric circulation in the Atlantic-European sector include the eastward movement of the main centers of atmospheric action, with the strengthening of the influence of the subtropical anticyclone, which directly affects Ukraine. The type of atmospheric circulation that forms the favorable conditions for the arid phenomena in the modern climatic period has been revealed, it is an anticyclonic ridge of a blocking nature over Eastern Europe, with significant stability in time.

Вступ. Визначення предмета

Енергія – одна з основних потреб для виживання людства, та є суттєвим чинником економічного розвитку. Сонячне випромінювання, що надходить до поверхні Землі, є основним джерелом енергії для життя на планеті, є основним

кліматотворчим фактором, що значною мірою визначає умови середовища нашого існування (Wild, 2012). Кількість сонячної енергії, що досягає поверхні, є компонентом енергетичного балансу та керує великою кількістю різноманітних процесів, таких як випаровування та пов'язані з ним, танення снігу та льодовиків та інші гідрологічні компоненти, фотосинтез рослин та пов'язане з цим поглинання вуглецю на землі, в цілому клімат приземного шару життєдіяльності людини.

Зміна кількості сонячної енергії, що досягає поверхні Землі, може мати серйозні екологічні, соціальні та економічні наслідки, в першу чергу продуктивності сільського господарства. Це тим більш важливо, що з'являється все більше доказів того, що кількість сонячного випромінювання, що надходить на поверхню Землі, не є стабільною, а зазнає значних багаторічних змін, враховуючи те, що Сонце є змінною зіркою у великих часових масштабах (Eddy, 1976).

Крім того, потрібно враховувати явище, яке майже не помічали протягом десятиліть, а саме змінну прозорість атмосфери, що зумовлює зменшення або збільшення інтенсивності сонячної радіації (Gilgen, Wild & Ohmura, 1998).

Крім зовнішніх геофізичних, важливим фактором для формування регіонального клімату є внутрішній фактор океанської та Атмосферної циркуляції. Крім того, також в останні десятиліття кліматотворчим фактором виступає антропогенний. Його вплив на клімат відбувається через зміну радіаційного балансу Землі шляхом зміни кількості парникових газів і аерозолів в атмосфері.

Таким чином, потрібні подальші дослідження, тим більше що у останнє десятиліття набуває практичної актуальності питання використання відновлюваної енергії, або “зеленої” енергетики через впровадження альтернативних джерел енергії. Відновлювана енергія отримується з таких джерел, як сонце, вітер, геотермальне тепло, енергія припливу тощо. Використання відновлюваної енергії заохочується як альтернатива сталої

енергії, яка може зменшити викиди антропогенних парникових газів (Возняк та Янів, 2010).

Використання сонячної енергії займає провідне місце серед усіх альтернативних джерел енергії. Це пов'язано з головними перевагами цього виду енергії: загальна доступність, екологічність, практична невичерпність, можливість безпосереднього перетворення сонячної енергії у теплову або електричну енергію (Кудря та ін., 2001).

Особливо велике значення це має для України, де існують достатньо сприятливі умови для використання сонячної енергії: річний технічно-досяжний енергетичний потенціал сонячної енергії в Україні еквівалентний 6 млрд. тон умовного палива, його використання дозволило б замінити біля 5 млрд. кубометрів природного газу (Возняк та Янів, 2010; Дробишева, Токар та Федоренко, 2014).

Кліматичні умови та географічне положення України також сприятливі для розвитку сонячної енергетики і будівництва сонячних електростанцій. Навіть північні області країни мають значний потенціал для розвитку даної галузі енергетики, який не поступається більшості європейських регіонів (Хаустова, Котляров та Лелюк, 2018).

У цій статті висвітлено сучасний режим сонячної радіації – головного кліматотворчого чинника, через аналіз її складових з просторово-часовим розподілом, визначення факторів, що впливають на геліопотенціал України з обговоренням сучасного стану та можливих майбутніх змін, зв'язків з мінливістю клімату.

Матеріали та методи дослідження

В даному дослідженні використовуються матеріали супутникових даних (реаналізу) з Європейського центру середньострокових прогнозів (ECMWF) (Hersbach et al., 2018). Зазначимо, що реаналіз – повторний аналіз наземних даних вимірювань, з урахуванням дистанційних методів, перевага яких –

охоплення значних територій з рівномірним географічним розділенням, але дані дещо згладжені.

Для вище вказаних вузлів отримані такі дані реаналізу за період календарного літа 1958-2020 рр.: прямої сонячної радіації, що надходить на підстильну поверхню, розсіяної та сумарної сонячної радіації, тривалості сонячного саява (ТСС), кількості атмосферних опадів, загальної кількості хмарного покриву.

Наземні дані метеостанцій України використовуються з архіву Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського, їх розташування показані на рис. 1. Метеостанції розміщені нерівномірно із скупченням на крайньому Півдні, Центрі та Півночі. Також практично відсутні дані метеостанцій на північному заході України на території Полісся, на південному заході та сході країни, тобто в районах з різною підстильною поверхнею.

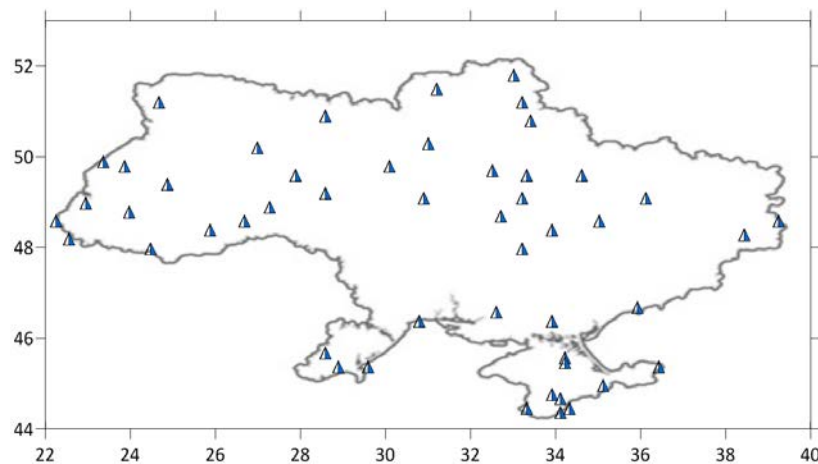


Рис. 1. Розміщення метеостанцій ▲ на карті України

Для проведення розрахунків використовуються фізико – математичні методи дослідження. Ці методи включають в себе розрахунок показників багаторічної мінливості, варіації, коефіцієнтів кореляцій. При цьому, як надійний вважається ступінь зв'язності, що відповідає 95%-му рівню статистичної значущості. Для розрахунків та ілюстрацій використовувались пакети Excel, Surferta Statistica. Для побудови карт аномалій геїпотенціалу та

температури повітря використовувався онлайн-ресурс Реаналізу NCEP-NCAR, <https://psl.noaa.gov/cgi-bin/data/composites>.

Погодні умови, які зафіксовані на наземних даних метеостанцій, вважаються “золотим стандартом: для метеорологічних даних, оскільки вони вважаються найбільш точними, але при цьому мають різні обмеження (Настанова гідрометеорологічним станціям..., 2011). Метеостанції часто розташовуються в великих населених пунктах або в місцях, ключових для їх основного використання (в авіації, морських портах), тому деякі можуть бути більш географічно репрезентативними, ніж інші.

Крім цього, значні похибки наземних даних метеостанцій деяких величин пояснюються й можливою їх відсутністю у певний період, а процес відновлення пропущених даних дає лише приблизну інформацію. Крім того, можливо, слід враховувати можливі «ефекти урбанізації» в даних про сонячне випромінювання для кращого кількісного визначення (Alpert, Kishcha, Kaufman & Schwarzbard, 2005). Виникає необхідність пошуку можливості використання супутникових даних шляхом їх порівняння з даними наземних спостережень, що й виконується у цій роботі на прикладі ТСС.

Тривалість сонячного саява означає час, протягом якого Сонце освітлює поверхню Землі, або визначається як сума періодів часу, впродовж якого пряме сонячне випромінювання осяє підстильну поверхню або перевищує поріг 120 Вт/м^2 . Це не тільки важливий показник інтенсивності сонячної радіації, а також вхідний параметр у багатьох додатках, моделях енергетичного балансу атмосфери, теплового навантаження на будівлі, планування врожайності в сільському господарстві, моделей екосистемних процесів, біофізичних моделей та визначення здоров'я людей (Рибченко та Савчук, 2022; Дмитренко та Барандіч, 2007). Отже, оцінка тривалості сонячного саява має велике практичне значення, а в кліматологічних додатках та в нашій роботі є показник кліматичних ресурсів.

Для порівняння супутникових та наземних даних тривалості сонячного сьйва на території України обираються вузли в області між 45° та 52° пн.ш. та між 22° та 40° сх.д. з кроком 2° по довготі та широті, всього – 57 вузлів.

Порівняння супутникових та наземних даних тривалості сонячного сьйва на території України проводилось за допомогою розрахунку Коефіцієнтів кореляції за кожен місяць і у середньому за календарне літо, між даними ТСС у вузлах географічної сітки реаналізу, та найближчою до даного вузла метеостанцією.

Треба зазначити, що подібне порівняння супутникових та наземних даних тривалості сонячного сьйва для України проводиться вперше. більшість коефіцієнтів кореляції статистично значущі на 95 % рівні, але в окремі місяці вони дещо менш значущі, як у червні 2011 р., або у всі літні місяці 2015, 2019 рр. (табл. 1). Причиною цьому є певні аномалії атмосферних умов, які описані нижче.

Таблиця 1

Коефіцієнти кореляції супутникових та наземних даних тривалості
сонячного сьйва на території України за місяці літнього сезону
(Кихтенко та Тимофеев, 2022)

Рік	Коефіцієнт кореляції			
	Червень	Липень	Серпень	Середній
2011	0.54	0.88	0.68	0.70
2012	0.81	0.73	0.85	0.80
2013	0.84	0.59	0.74	0.72
2014	0.62	0.81	0.84	0.76
2015	0.51	0.41	0.54	0.49
2016	0.66	0.59	0.62	0.62
2017	0.52	0.47	0.62	0.53
2018	0.80	0.70	0.83	0.78
2019	0.53	0.57	0.59	0.56

Примітка. Коефіцієнти кореляції, статистично значущі на 95% рівні, дано Жирним

Тісна кореляція з супутниковими даними дає можливість проводити кліматично важливі дослідження для значних територій за допомогою наборів

просторових і часових однорідних даних, для доповнення даних стандартної метеорологічної мережі.

Іншою важливою розрахунковою величиною є фотосинтетично активна радіація (ФАР) – випромінювання Сонця в діапазоні довжин хвиль 380...750 нм і є основою життєдіяльності рослин, що зумовлює їх фотосинтез. Пряму, розсіяну, сумарну ФАР обчислюють за вимірюваннями та коефіцієнтами переходу від інтегральної сонячної радіації, одержаними за спектральними експериментальними дослідженнями в Українському гідрометеорологічному інституті (Рибченко та Савчук, 2022, 2019); сумарну ФАР за тривалістю сонячного саява – за непрямим методом, отриманим у МО МДУ (Гойса та Перелет, 2003). З 80-х рр. XX ст. дослідження ФАР за супутниковими вимірами стають мейнстрімом, і проводять у багатьох країнах, зокрема у США, Іспанії, Китаї, Канаді, Німеччині, Росії тощо (Журавлева, Рублев, Удалова та Чеснокова, 2006; Pinker & Laszlo, 1992; Slomka, 1983).

Моніторинг радіаційних потоків, що надходять до поверхні, розпочався на початку двадцятого століття на вибраних ділянках, в основному вимірюючи спадну сонячну складову (також відому як «глобальна радіація»). Безперервні вимірювання почалися в Стокгольмській обсерваторії в 1923 р., а в Потсдамі – з 1937 р.

Більшість з цих історичних вимірювань зібрано в Архіві глобального енергетичного балансу (GEBA) ETH Zürich (Dutton et al., 2006; Shi et al., 2008) і у Всесвітньому радіаційному центрі даних (WRDC) Головної геофізичної обсерваторії в м. С.-Петербург. Дані GEBA пройшли різні перевірки якості, щоб забезпечити статистичну однорідність записів. Умова Однорідності кліматологічних рядів важлива для отримання достовірних висновків, за умови, що будь-які варіації в даних спричинені природними явищами і не є артефактом щоб уникнути помилкових тенденцій (Shi et al., 2008).

Наприкінці 1980-х років була визнана необхідність створення еталонної мережі вимірювань поверхневого випромінювання з підвищеною та

визначеною точністю. У результаті була створена базова мережа поверхневого випромінювання (BSRN), і перші прилади максимальної точності, почали працювати на початку 1990-х років (Ohmura et al., 1998).

Мета публікації – оцінка сучасного потенціалу сонячних ресурсів України шляхом визначення сучасного режиму сонячної радіації, на основі порівняння вимірювальних та розрахункових показників, з пошуком зв'язків із станом кліматичної системи. Більш детальний аналіз проводиться для теплого періоду року двох останніх десятиліть, хоча для аналізу багаторічної зміни метеорологічних параметрів використовуються дані з 1951 р.

Іншою важливою метою даної статті є порівняння супутникових та наземних даних сонячних характеристик на території України для виявлення можливостей розширення можливостей представлення просторових даних.

Результати дослідження

1. Стан регіональної кліматичної системи

1.1. Сонячна активність

Основним чинником, що формує клімат і життя на нашій планеті, є сонячне випромінювання, що надходить на поверхню Землі. Будь-які зміни в цьому дорогоцінному джерелі енергії суттєво впливають на середовище нашого існування. Оскільки наша цивілізація все більше залежить від космічних засобів, руйнівної та вразливої наземної інфраструктури, сонячна енергія та її потенційний вплив становиться все більш важливим та актуальним.

До недавнього часу, за відсутності необхідних даних, кількість сонячного випромінювання, що надходить на поверхні Землі, вважалось практично незмінною. Проте все більше доказів свідчить про те, що ця величина зазнає значних коливань протягом десятиліть, разом з змінною прозорістю атмосфери, що необхідно враховувати під час оцінки зміни клімату та стратегій врахування наслідків (Foukal & Eddy, 2007).

Головним показником Сонячної активності є кількість сонячних спалахів або плям, які формують відомі квазі-11-річні цикли активності. Багаторічна мінливість сонячної активності з головними циклами впродовж сучасного кліматичного періоду, з прогнозом до 2050 р. показано на рис. 2 (Абдусаматов, 2010; Aguirre, Letellier & Maguet, 2008). Головним висновком є поступове зменшення сонячної активності до середини 21 століття.



Рис. 2. Варіації сонячної активності – відносна кількість сонячних плям, факт 1980-2010рр., прогноз до 2050 рр. (Абдусаматов, 2010)

Як видно з рис. 2 підвищена сонячна активність спостерігалась впродовж 21 - 23го циклів 1980х та 1990х рр., потім значно знизилась у 24-му циклі у 2000-х рр. Поточний 25-й цикл сонячної активності розпочався у грудні 2019 р. зі згладженим мінімальним числом 1,8 сонячних плям і очікується, що він триватиме приблизно до 2030 р. Поточний рік 2022 відзначається мінімумом 25-го циклу прогнозне значення кількості сонячних плям характеризується зростанням із максимумом на початку 2026 року.

Далі у прогнозі, очікується незначне зростання кількості сонячних плям, а з ними й сонячної активності в другій половині 2030-х років, але він ще менший, ніж максимум, що очікується на початку 2026 року. А в кінці 2030-х та протягом 2040-х років продовжується зменшення кількості сонячних плям, а з ними й сонячної активності і може досягти ще нижчого показника ніж раніше.

Таким чином, наразі відбувається зменшення сонячної активності, в подальшому очікується ще більше зменшення кількості сонячних плям, а з ними й сонячної активності в цілому (Лозицький та Єфіменко, 2013; Aguirre et

al., 2008). У деяких роботах з цим пов'язують початок похолодання на планеті до середини 21 ст. (Абдусаматов, 2010; Дмитриев та Беязо, 2006).

Важливим показником, що формує кліматичну мінливість, і не завжди згадується, є ступінь прозорості атмосфери. Це, наприклад, задокументовано в нещодавньому спеціальному випуску в *Journal of Geophysical Research*, присвяченому темі глобального затемнення та освітлення (Stott, 2003).

У всесвітніх мережах спостережень були виявлені когерентні періоди та регіони з переважаючим зниженням («затемнення») і зростанням («освітленням») поверхневого сонячного випромінювання, часто відповідно до моделей антропогенного забруднення повітря (Wild, 2012; Gilgen et al., 1998).

Глобальне затемнення – це зменшення кількості глобального прямого опромінення на поверхні Землі, яке спостерігається з початку систематичних вимірювань у 1950-х роках. Ефект залежить від місця розташування, але в усьому світі він оцінюється приблизно на 4-20 %. Однак, якщо не враховувати аномалію, спричинену виверженням вулканів Ель-Чічон в 1982 р. та Пінатубо в 1991 р., не було помічено значної зміни багаторічної тенденції (Angell, 1997). Вважається, що глобальне затемнення є основною причиною голоду в Ефіопії 1984 року через зниження температури в тропіках, що спричиняє щорічні мусони, або вологий сезон.

Головні періоди освітлення/затемнення показані за допомогою мінливості середньорічної поверхневої сонячної радіації за спостереженнями в Потсдамі (рис. 3). Можна побачити чіткі фази підйому (1930-1940-ті роки, «раннє освітлення»), спаду (1950-1980-ті роки, «потемніння») та поновлення зростання («освітлення» з 1980-х років).

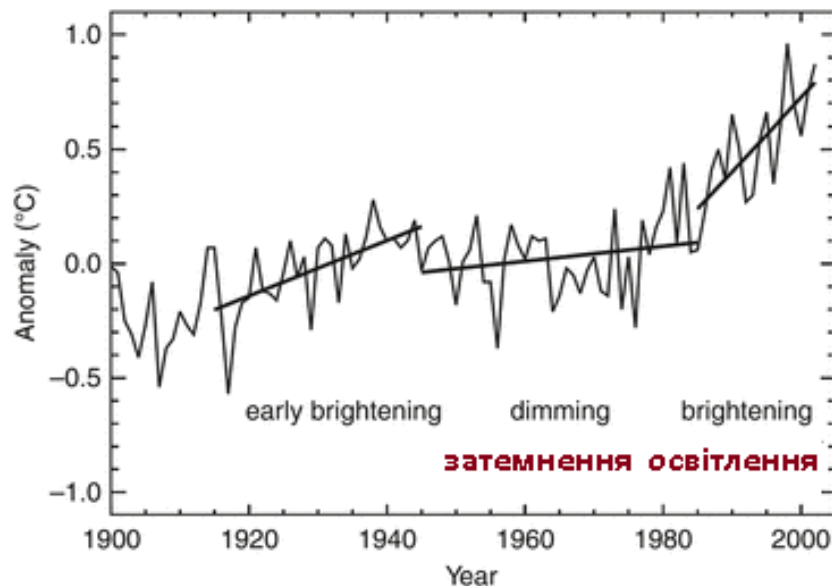


Рис. 3. Багаторічна зміна середньої річної поверхневої сонячної радіації на основі спостережень в Потсдамі, Німеччина, 1901-2006 рік (Вт м^{-2}) (Wild, Ohmura & Makowski, 2007)

1.2. Регіональний клімат у світі глобальних змін

Сучасний стан кліматичної системи характеризується продовженням фази глобального потепління, зменшенням Сонячної активності, зміни швидкості обертання землі, на фоні підвищеної активності Ель-Ніньйо, зміни типів атмосферної циркуляції (Parineau, 2001; Полонский, 2001; Newman, Compo & Michael, 2003; Sidorenkov & Wilson, 2017; Luo, Young-Min and Jian, 2019). Водночас, в Арктиці, більшості Європейських країні та Україні воно продовжується, з деяким перерозподілом сезонних характеристик, з іншого боку, потепління призупинилось в районі Західної Антарктики, а також півночі Канади та Алясці (Pörtner et al., 2022; Bindoff et al., 2013; Мартазинова та Свердлик, 1998; Мартазинова, Тимофеев та Иванова 2010; Ліпінський та Бабіченко, 2006; Rigor, Colony and Martin, 2000).

Глобальне потепління – це фактичне явище, що в першу чергу ілюструється багаторічною зміною середньої річної температури планети, Впродовж останніх ста років, відзначено дві фази підвищення приземної температури повітря – на початку 20-го століття та з 1980-х рр. (рис. 4). Сучасна тенденція пов'язана з активізацією теплої фази явища Ель-Ніньйо у

Тихому океані, аномалії останніх років – з супер-Ель-Ніньйо 2016 р., після якого глобальна температура дещо стабілізувалася.

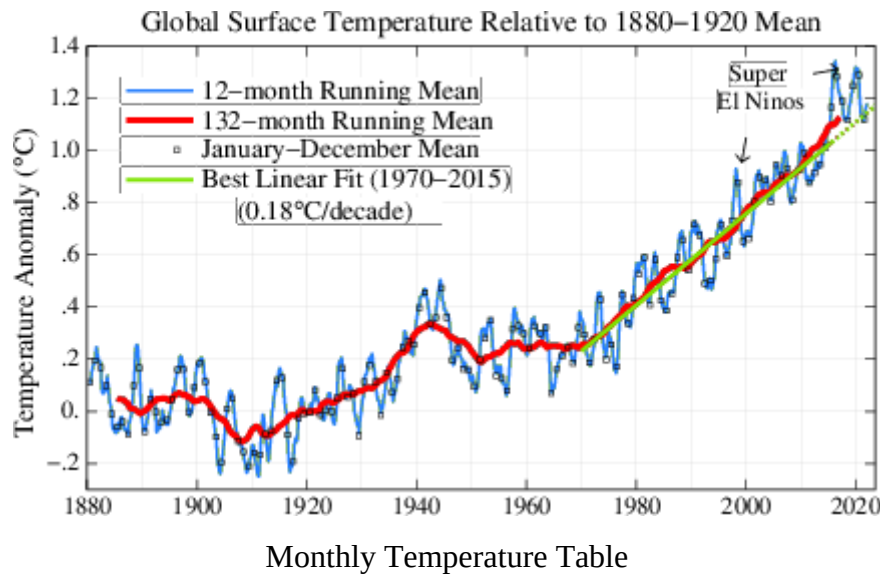


Рис. 4. Багаторічна зміна аномалії середньої глобальної річної температури повітря за даними Інституту космічних досліджень Годдарда, 1880-2021 рр. В якості кліматологічної норми прийнятий період 1951-1980 рр. (<http://www.columbia.edu/~mhs119/Temperature/>)

Аналогічне потепління спостерігається у багатьох районах помірних шрот, включаючи Україну (Ліпінський, Дячук та Бабіченко, 2003; Ліпінський та Бабіченко, 2006; Полонский, 2001). У регіональному плані, важлива інтерпретація даних про зміну клімату, включаючи місцеві просторово-часові (сезонні) особливості, а також наслідки, як почастищення небезпечних явищ, з заходами адаптації до нового кліматичного режиму (Bindoff et al., 2013; Przybylak, Majorowicz, Brázdil & Kejna, 2009; Zwiers & Zhang, 2003).

Згідно звітам Міжурядової комісії зі змін клімату (IPCC), в 1991-2010 рр. кількість значних природних аномалій відносно попередніх десятиліть збільшилась у 2,6 рази, що призвело до зростання економічних збитків у розвинених країнах у 7,3 рази (Pörtner et al., 2022).

Клімат України у цілому є сприятливим для розвитку різних галузей економіки, зокрема землеробства та тваринництва, використання сонячної енергії, завдяки сприятливому рівню інсоляції, кількості тепла, вологи. Крім того, вивчення режиму сонячної радіації допомагає в дослідженні проявів

глобального потепління (Рибченко та Савчук, 2022; Дмитренко та Барандіч, 2007).

Але певні сполучення агрокліматичних умов можуть зумовлювати несприятливі явища, перш за все це посушливі явища у літній сезон, що завдають шкоди сільськогосподарському виробництву, енергетиці, транспорту й іншим галузям економіки (Щербань, 1991; Тараріко, Ільєнко та Кучма, 2016).

Багаторічна зміна середньої річної температури повітря за даними Об'єднаної гідрометеорологічної станції (ОГМС) Київ показана на рис. 5, з якого видно початок сучасного прискореного потепління з 1990-х рр. Особливо значне потепління відзначено центральному місяці літнього сезону (липні) (рис. 5Б).

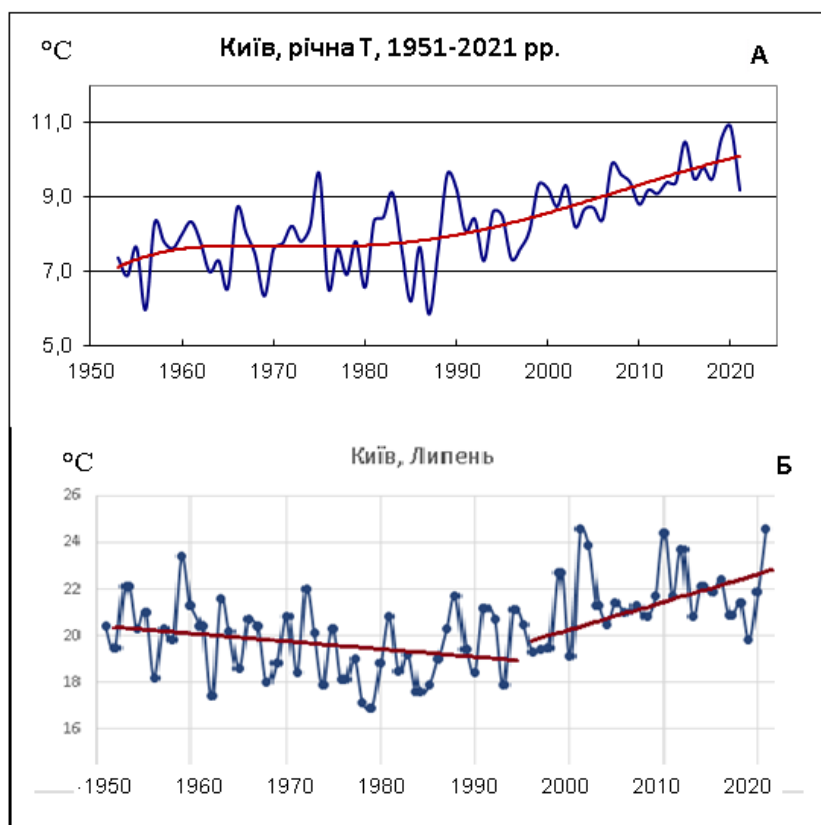


Рис. 5. Багаторічна зміна середньої річної температури повітря, річна (А) та за липень (Б), ОГМС Київ, 1951-2021 рр.

У цілому відзначена значна кореляція з трендом глобального потепління, хоча в окремі сезони і місяці підвищення температури значно менше, на фоні значної міжрічної мінливості.

Разом з тим є певна тенденція до зниження кількості атмосферних опадів, що впродовж теплого півріччя може призвести до почастищення періодів спекотливої погоди, разом з посилення посушливих явищ у приземному шарі атмосфери (ПША) – головному Шарі життєдіяльності.

Значне зростання потенціалу посушливості зафіксовано з початку 2000-х рр., з максимумом повторюваності 2010-2020 рр., коли посухи почали фіксуватись протягом кількох суміжних місяців або сезонів. Потенціал посушливості розраховувався з урахуванням сумісної аномалії температури та кількості атмосферних опадів, для кожного місяця максимальне значення = 2 означає сприятливі умови, при додатній аномалії температури повітря та від'ємній аномалії кількості опадів, і мінімальне значення = -2, при від'ємній аномалії температури повітря та додатній аномалії кількості опадів. Багаторічна зміна потенціалу посушливості за тепле півріччя 1981-2021 рр. за даними ОГМС Київ показана на рис. 6.



Рис. 6. Багаторічна зміна потенціалу посушливості за даними ОГМС Київ, тепле півріччя 1981-2021 рр.

З огляду на соціальні, політичні, економічні проблеми сьогодення, ймовірна висока гідрометеорологічна вразливість населення України та її економіки вимагає комплексної оцінки впливу небезпечних та стихійних гідрометеорологічних явищ (НЯ, СГЯ). Крім середньої температури повітря, важливими показниками є явища, які пов'язані з її екстремальними значеннями

– потепління (“хвилі тепла”) та похолодання, засухи, суховії, пилові бурі, а також лісові пожежі (Ліпінський та Бабіченко, 2006; Ліпінський, Дячук та Бабіченко, 2003; Meehl and Tebaldi, 2004).

Підвищення температури не тільки збільшує ймовірність виникнення пожежі, воно також подовжує загальний час протягом року, протягом якого сприятливі умови для лісових пожеж (Batista dos Santos, Bento-Gonçalves & Vieira, 2021).

Загальне зростання частоти комплексу небезпечних явищ зумовлює ступінь екстремальності клімату, яка загалом посилюється. Внаслідок потепління практично у всі сезони року. Разом з нею, підвищується кліматична вразливість більшості областей – вона зростає з заходу на схід. Впродовж теплої періоду за розподілом комплексної характеристики екстремальності максимальної температури повітря вище порогу СГЯ (рис. 7).

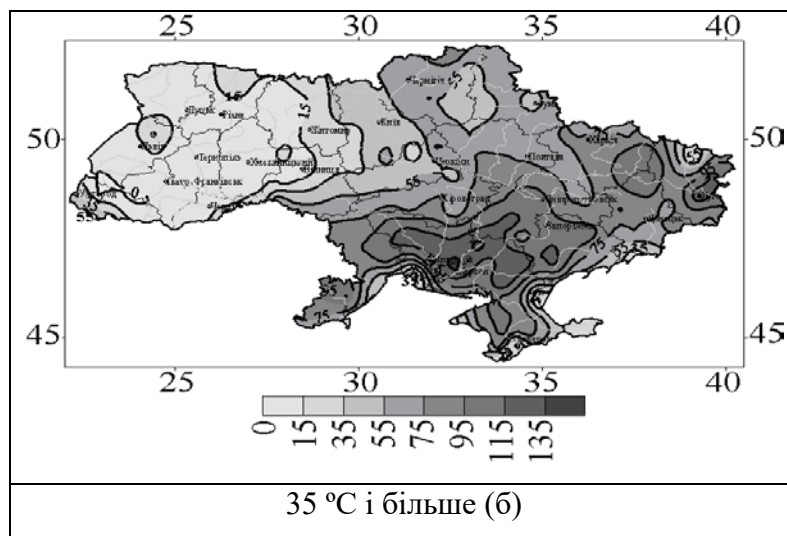


Рис. 7. Середня за теплий період року максимальна повторюваність (P , %) максимальної температури повітря (T , °C) у межах категорії екстремальних значень вище порогу СГЯ (35°C і більше), 1991-2014 рр. теплий період (Савчук, Тимофєєв та Ювченко, 2018).

На тлі зростаючого дефіциту атмосферних опадів, найбільш вразливими є області півдня і південного сходу України (Причорномор'я, АР Крим, осередки сходу, центру, що найчастіше перебувають під впливом комплексу екстремальних умов. Цей вплив посилюється у останні роки, що необхідно враховувати при складанні довгострокових прогнозів та плануванні економіки

на майбутнє (Савчук, Тимофєєв та Ювченко, 2018; Дробишев та ін., 2014).

Водночас, зазначимо, що південні області також відчують Кліматичну вразливість не тільки через посилення посушливості, так і літніх конвективних явищ, через значну міжрічну та межсезонну мінливість значних опадів, і також підвищеною частотою небезпечних зимових явищ (Пясецька та Щеглов, 2017).

1.3. Режим сонячної радіації в Україні

Для визначення геліоенергетичних ресурсів використовуються наступні актинометричні та метеорологічні параметри: кількості прямої та сумарної радіації, їх мінливість в умовах ясного та хмарного неба; тривалість сонячного саява (багаторічні показники, просторово-часовий розподіл); безперервна ТСС вище вказаного рівня; кількість днів без сонця; повторюваність хмарності різних градацій та ін. (Дмитренко та Барандіч, 2007)

За характеристикою геліоенергетичних ресурсів Україна відноситься до регіонів із середньою інтенсивністю сонячної радіації. Кількість сонячної енергії, що надходить на одиницю площі протягом року, складає 1000-1350 кВт·год/м² (Рибченко та Савчук, 2019; Ліпінський, Дячук та Бабіченко, 2003).

Аналіз найбільш значущих характеристик геліоенергетики впродовж сучасного кліматичного періоду виявився достатнім для розвитку їх енергетичної спроможності на значній частині території України (табл. 4). За період 1991-2014 рр. відбувається зміна радіаційних показників відносно 1961-1990 рр., з підвищенням більшості показників.

Показники геліоенергетичних ресурсів України.
1991-2014 рр. (Кихтенко та Тимофеев, 2022)

Станція	Річна сума сумарної радіації на горизонтальну поверхню, МДж/м ²	Річна сума прямої радіації на горизонтальну поверхню, МДж/м ²	Річна тривалість сонячного сяйва, год	Внесок сумарної радіації за радіаційно-теплий період у річну суму, %
Покошичі	3903	1987	1899	80
Конотоп	3839	2083	1928	80
Ковель	3593	1549	1865	78
Бориспіль	3659	1824	2026	79
Нова Ушиця	3626	1768	1944	77
Полтава	4121	2188	2017	79
Міжгір'я	3114	1390	1605	75
Берегове	3717	1842	1993	76
Одеса	4556	2665	2310	77
Болград	4615	2620	2329	75
Херсон	4507	2533	-	77
Асканія Нова	4124	2293	2265	76
Карадаг	4821	2848	-	76
Нікітський Сад	4729	2831	2300	75

Річна кількість прямої радіації змінюється від 1554 МДж/м² на північному заході (Ковель) до 2300 МДж/м² на Південному березі АР Крим (Нікітський Сад).

Річна кількість сумарної сонячної радіації змінюються від 3540 МДж/м² на північному заході (Ковель) до 4780 МДж/м² на Південному березі Криму (Карадаг). Внесок сумарної радіації у річну кількість за радіаційно-теплий період становить від 73 % на північно-західних схилах Українських Карпат (Міжгір'я) до 79 % на північному сході (Покошичі, Конотоп).

За даними розподілу річної кількості сумарної радіації перспективною для геліоенергетики можна вважати значну частину території країни, де показники сумарної радіації перевищують 4000 МДж/м², а на півдні та в Криму – наближаються до оптимальних значень щодо сонячних ресурсів (рис. 7).

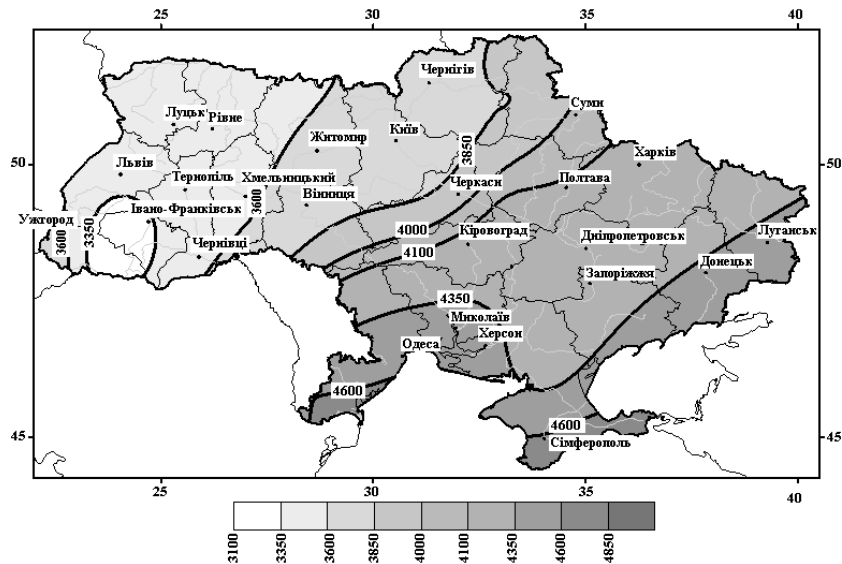


Рис. 7. Річна кількість сумарної сонячної радіації (МДж/м²).
2001-2014 рр. (Рибченко та Савчук, 2019, 2022)

Таким чином, територія України, крім гірських районів Українських Карпат і заходу, є сприятливою для запровадження геліоенергетичних систем. Моніторинг сонячної радіації на початку ХХІ ст. засвідчує зростання потенціалу геліоенергетичних ресурсів в Україні, з найкращими перспективами для використання сонячної радіації у геліоенергетиці на півдні – території Степу, на сході Лісостепу, АР Крим.

Як вже згадувалось, Тривалість сонячного сьйва – важлива характеристика радіаційного режиму і критерій кліматичних ресурсів окремих територій. Розподіл ТСС на території України за рік досягає максимуму у південному напрямку до 2 300 год у АР Крим, і 1 800 год на північному заході, рис. 8. Сучасна Тривалість сонячного сьйва зросла по всій території, найбільше на півдні, де вона перевищила більш ніж на 10 % річну кількість попереднього десятиліття. Також річна кількість ТСС підвищилась на заході (Ужгород – 2 102 год), у центрі (Світловодськ – 2 199 год) та на сході: (Велико-Анадоцьк – 2 078 год, Луганськ – 2 035 год, Дебальцеве – 2 046 год).

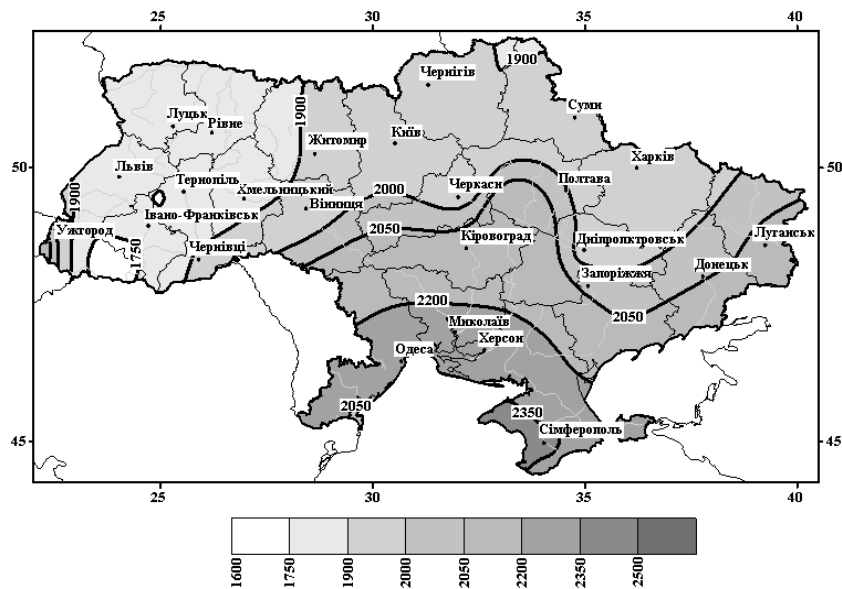


Рис. 8. Річна тривалість сонячного саява (год). 2001-2013 рр. (Рибченко та Савчук, 2013)

Безперервна тривалість сонячного саява, що забезпечує найменші витрати енергії для розігрівання геліоустановки, за Б. Н. Ванбергом становить понад 6 год за добу. За цим показником майже на всій території це значення перевищене за теплий період і становить від 6,5 год у квітні та вересні на північному заході й північному сході. Найбільші її значення спостерігаються влітку, коли ТСС за день з Сонцем збільшується від 9-10 год, на півночі, і до 11 год в АР Крим.

У багаторічному ході, за даними ОГМС Київ виявлений важливий факт зміни знаку багаторічного тренду річної кількості ТСС на зростання з початку 1980х гг (рис. 9). Явним є вплив глобальних змін клімату, на загальному тлі підвищення приземної температури повітря в той же період.

Аналогічні багаторічної зміна ТСС відзначаються у центральній і східній Європі. Так, у статті (Marsz, Matuszko & Styszyńska, 2021) показано зміну знаку багаторічного тренду цієї величини на станціях Східної та центральної Європи, від зменшення з середини 1980-х рр. до наступного зростання (рис. 10).

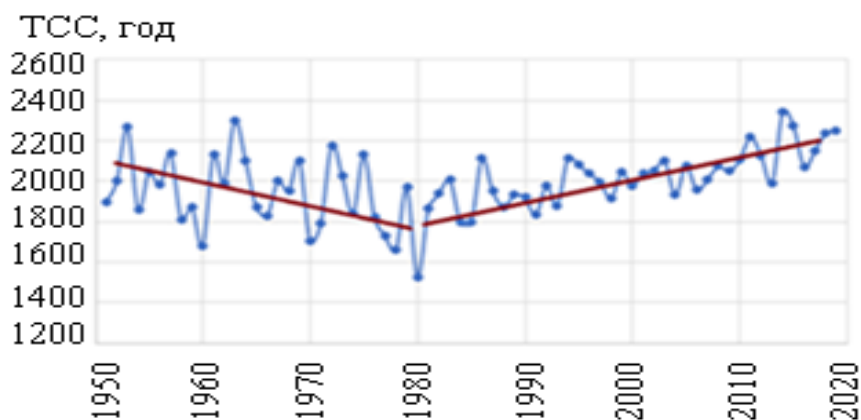


Рис. 9. Багаторічна зміна річної кількості тривалості сонячного сяйва (год.),
ОГМС Київ, 1951-2019 рр.

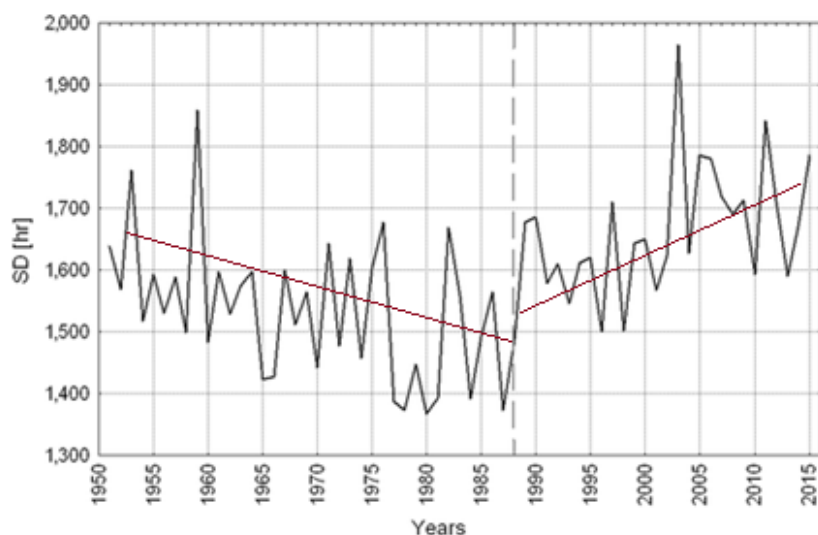


Рис.10. Багаторічна зміна середньорічної сумарної тривалості сонячного сяйва станцій
Східної та центральної Європи 1951-2015 рр., червоним показано зміна напрямку тренду
(Marsz, Matuszko & Styszyńska, 2021)

Для пояснення зміни тренду середньорічної сумарної тривалості сонячного сяйва наприкінці 1980-х рр., були проаналізовані часові послідовності річної частоти макротипів атмосферної циркуляції, і зміни інтенсивності термохалінної циркуляції в Північній Атлантиці, детальніше – далі в п. Атмосферна циркуляція.

За результатами порівняння прямої, розсіяної та сумарної радіації за 1986-2015 рр. для отримано розрахунки фотосинтетично активної радіації

впродовж місяців вегетаційного періоду в Україні. У зв'язку з ходом складових радіаційного балансу послідовно впродовж обраного періоду збільшується пряма ФАР; зменшується розсіяна; сумарна ФАР при цьому незначно збільшується.

За просторовим розподілом кількість прямої ФАР впродовж теплого періоду року зростала в 1986-2015 рр. з північного заходу на південь, а в деяких регіонах – знизилась, зокрема в Українських Карпатах (рис. 11).

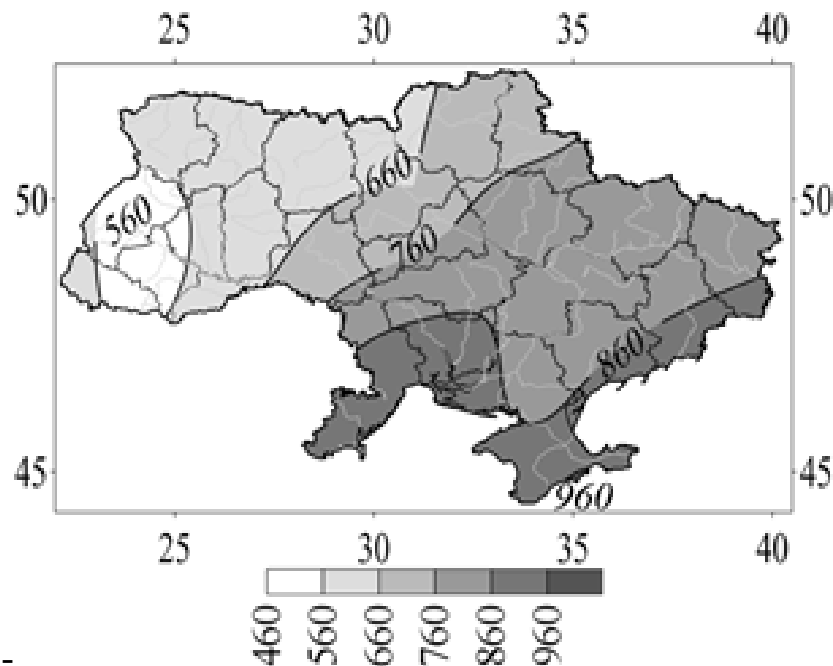


Рис. 11. Розподіл Кількості прямої фотосинтетично активної радіації (МДж/м²)
за теплий період в 1986 -2015 рр. Савчук, 2018)

Крім того, відзначено особливості альbedo підстильної поверхні – відзначено стійке поступове зростання у теплому сезоні внаслідок зменшення хмарності, зростання ТСС, підвищення температури повітря, дефіциту опадів, що у свою чергу, змінює стан поверхні (Ліпінський, Дячук та Бабіченко, 2003). Тобто, альbedo має тенденцію до зрастання, особливо в південних та східних областях, що є зворотним зв'язком почастішання посушливих явищ (Рибченко та Савчук, 2013).

1.3. Особливості циркуляції атмосфери в Східній Європі та Україні та її стан в останні десятиліття

Згідно з висновками IPCC, західно-східне перенесення в помірних широтах посилюється в обох півкулях з 1970-х рр., особливо взимку. Активність циклонів в обох півкулях зазнала зміни протягом другої половини XX століття: зсув до полюсу їх траєкторій супроводжується їх поглибленням і одночасним зменшенням їх загального числа.

Аналіз циркуляції атмосфери за десятиліття сучасного потепління дозволив виділити деякі її характерні особливості в Атлантико-Європейському секторі: переміщення зони дії головних центрів дії атмосфери (ЦДА) на північний схід, зокрема Ісландської депресії (Pinto & Joaquim, 2012). Внаслідок перебудови баричного поля кінця 20-го – початку 21-го століття, відзначається посилення впливу субтропічних антициклонів, зокрема гребеня Азорського (або африканського) антициклону, зона дії поширюється не тільки на північ, але і далеко на схід, з безпосереднім впливом на Україну. З одного боку, це проява більшої стійкості атмосферних процесів у часі, а з іншого – поява значної нестійкості процесів під час їх трансформації, наприклад, від антициклону до циклону. Це в свою чергу, призводить до збільшення інтенсивності стихійних метеорологічних явищ.

Водночас, в останні роки відзначена значна міжсезонна мінливість південних процесів, зі збільшеною частотою чорноморських циклонів, та появою рідких (північно-західних) траєкторій із значними опадами (Тимофєєв та Татарчук, 2017; Мартазінова та Щеглов, 2017). В умовах прогнозованого підвищення ступеню посушливості це добрий знак, що не дозволить степам півдня України перетворитись на пустелю.

Встановлено вплив сонячної активності на інтенсивність ЦДА, які визначають регіональні особливості циркуляції. Наприклад, при підвищенні сонячної активності посилюється Сибірський максимум, що призводить до

формування суворої зими у помірних широтах Європи, в тому числі й на території України (Мартазінова та Щеглов, 2017).

Згідно класифікації проф. В.Ф. Мартазінової, проведеної на основі даних до 2010 р., посилюється переважання еталонного типу процесу підвищеного тиску з центром у східній Європі, який характеризується значною стійкістю у часі. За нашими даними 2001-2021 рр., ситуація практично не змінилась для літнього сезону, з посиленням області додатної аномалії поля геопотенціалу АТ-500 гПа безпосередньо над Україною та загалом над східною Європою (рис. 12А). Одночасно, посилюється область від'ємних аномалій над південною Європою, басейнами Середземного і Чорного морів. Зокрема, посилюється циклогенез над Чорним морем, у тому числі через орографічні чинники.

Розподіл Аномалії поля температури повітря у низькій тропосфері також показує наявність області додатної аномалії над країною, де підвищення сягає 2°C ніж обраними періодами (рис. 12Б). Таким чином, тенденція до підвищення температури повітря триває, причому посилюється на півдні України.

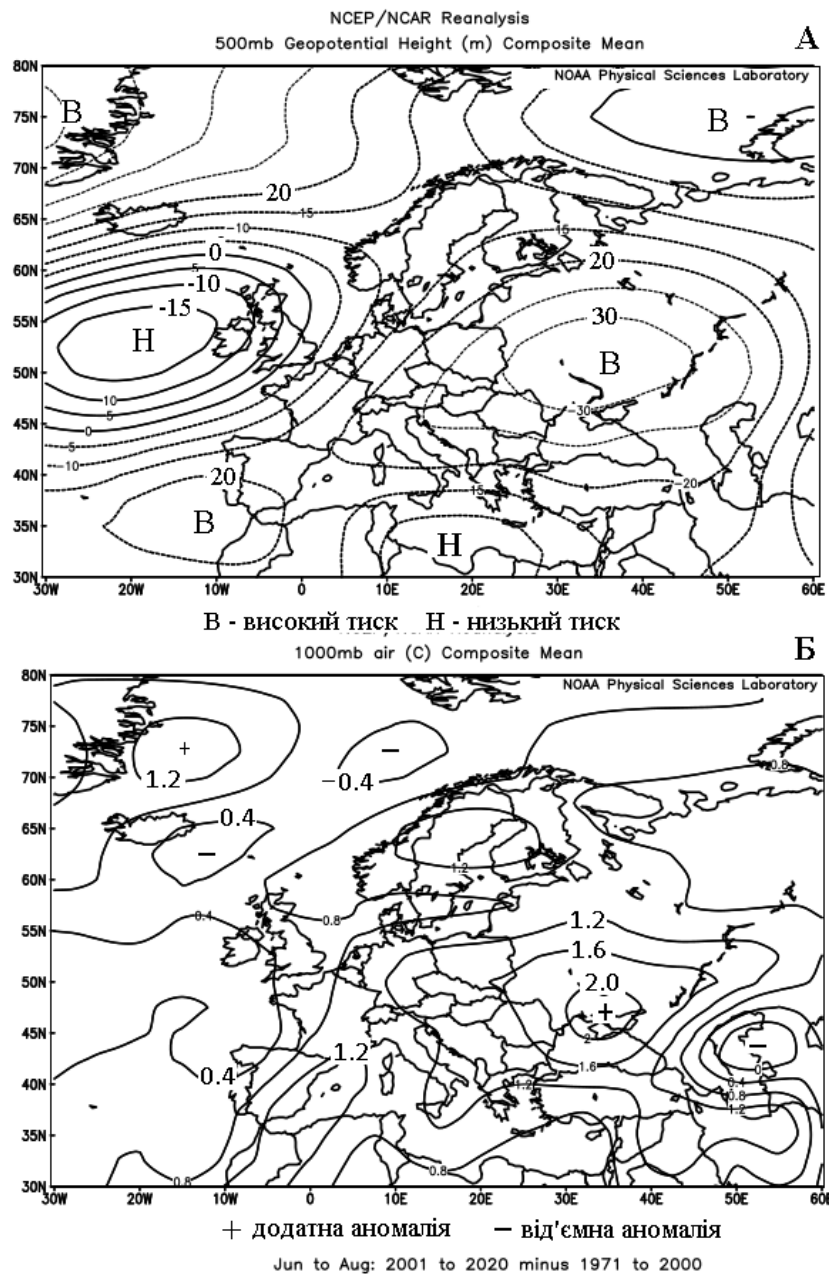


Рис. 12. Аномалія поля геопотенціалу АТ-500 гПа (А) та Аномалія поля температури повітря (Б) АТ-1000 гПа, між десятиліттями 2001-2021 мінус 1971-2000 рр., липень-серпень.

Реаналіз NCEP-NCAR

Вище вказувалось, що зміна тренду середньорічної тривалості сонячного сйива над Європою була Пояснена особливістю атмосферної циркуляції, зокрема багаторічною послідовністю річної частоти її макротипів – W (західної), E (східної), C (центральної) згідно з класифікацією Вангенгейма-Гірса (Girs, 1981). Але ця типізація, хоч і традиційна, але заснована на досвіді середини 20 століття, в той час як вважається, що циркуляція періоду сучасного

потепління дещо змінилась, що показано в УкрГМІ за допомогою об'єктивних методик (Martazanova, 2005). Важливо також, що було знайдено відповідні часові зміни індексу термохалінної циркуляції в Північній Атлантиці, але цей показник відбиває низькочастотну мінливість кліматичної системи, в той час за режим метеорологічних параметрів відповідають процеси регіонального плану.

Також, зазначається, що Проведені дослідження не враховують можливий внесок мінливості антропогенного впливу. Тому автори вказують, що Пояснення мінливості ТСС природними процесами у системи океан-атмосфера далеке від повного розуміння.

На сучасному рівні, стан регіональної системи оцінюється за допомогою відомих індексів Північно-атлантичного коливання (NAO), Східно-Європейського (EA/WR), Середземноморського коливання, Північно-морського-Каспійського NCP, індексів атмосферного блокування. Індокси відображають як зональні, так і меридіональні градієнти тиску в атмосфері (Viles & Goudie, 2003; Franzke & Feldstein, 2005).

Зокрема, індекс NCP надає можливість ідентифікувати Особливістю циркуляції атмосфери останніх років є посилення гребеня на довготі Уралу-Каспійського моря, який безпосередньо впливає на східну Європу України (перш за все, на її східну частину) і зумовив більшість посушливих явищ з 2010р.

1.4. Синоптичні Умови формування посушливих явищ та прогностичні думки

У 2012 р. опублікований спеціальний звіт IPCC, присвячений небезпечним явищам погоди та методам адаптації до змін клімату. У ньому зокрема зазначається, що тривалість, частота та інтенсивність спекотливих явищ, найбільш ймовірно, зростатиме у найближчі десятиліття в більшості районів Землі (Pörtner et al., 2022).

Як вказувалось вище, період потепління клімату нашої планети супроводжується зростанням частоти посушливих явищ, як одних з найнебезпечніших явищ літнього та вегетаційного періоду (Мартазінова та Сологуб, 2000; Рибченко та Савчук, 2013; Meehl & Tebaldi, 2004). Їх Формування залежить від ряду метеорологічних факторів: збереження високої температури повітря, дефіциту зволоження, ступеню прозорості атмосфери, певної сили вітру та ін. Всі ці фактори в помірних широтах залежать від характеру атмосферної циркуляції, тому при прогнозі виникнення посух необхідно знати еталонні типи циркуляції атмосфери.

Як вже вказувалось, дані останнього десятиліття показують підвищення температури повітря та дефіцит опадів впродовж літнього сезону, із розширенням площі охоплення посушливих явищ в Україні майже щорічно.

Встановлено деякі відмінності просторового охоплення та сезонного ходу посушливих явищ в Україні з середини 20 ст. Якщо у 1970-х рр. посухи починались навесні та тривали до середини літа, і спостерігались не кожного року, то у останні 2 десятиліття частота посух зменшується з квітня по червень, а збільшується – у липні-серпні-вересні, причому часто – кілька років поспіль. В окремі роки посушливі явища реєструються до середини жовтня.

Встановлено, що для України характерні дві синоптичні ситуації, які призводять до утворення посух: основна їх кількість (до 70 %) на Україні виникає в результаті формування синоптичних процесів антициклонічного блокування, тобто через порушення зонального переносу в атмосфері. Решта 30 % посух в Україні спостерігаються тоді, коли переважає зона високого тиску, яка утворена відрогами субтропічних максимумів або малорухомими антициклонами.

На прикладі аналізу розвитку посушливих явищ в Україні у 2018 р. покажемо опрацювання діагностичних та прогностичних предикторів, як метеорологічних, так і радіаційних характеристик. Цей рік був обраний, щоб

вияснити причину похибки наземних даних тривалості сонячного сяйва на території України у 2018 р., порівняно із супутниковими даними.

Цей феномен пояснюється посухою, яка має місце у серпні цього року. За результатами досліджень, проведених у відділі кліматичних досліджень та довгострокових прогнозів погоди УкрГМП, посуха серпня 2018 р. характеризується пороговим значенням ТСС, що становить вище 11,6 годин. Розподіл тривалості сонячного сяйва при наявності визначеного порогового значення цієї величини для посушливого серпня 2018 р. зображено на рис. 8. Найвищі значення спостерігаються на півдні і сході країни, до 12,4 год. і вище.

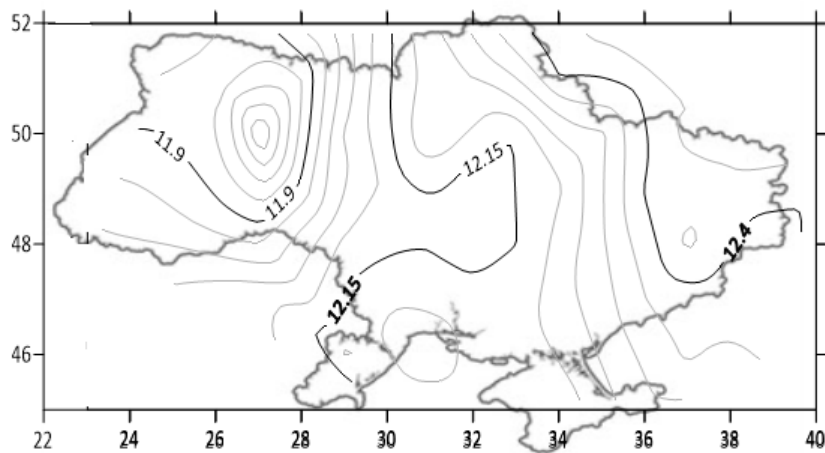


Рис. 13. Розподіл тривалості сонячного сяйва з пороговим значенням вище 11,6 годин на території України в період посухи серпня 2018 р.

Розподіл прямої та сумарної сонячної радіації за серпень 2018 р. при пороговому значенні ТСС, що сягає більше 12 годин, показано на рис. 14. Аналогічно розподілу тривалості сонячного сяйва. Найвищі значення спостерігаються на півдні і сході країни.

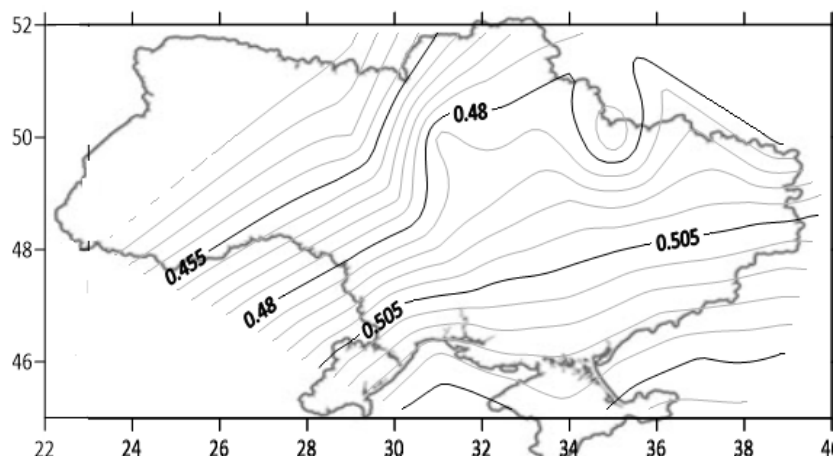


Рис. 14. Розподіл прямої сонячної радіації за серпень 2018 р. при пороговому значенні тривалості сонячного сйва, що сягає більше 12 годин, кВт/м²

Розподіл кількості атмосферних опадів в період посухи серпня 2018 р. показаний на рис. 15. В областях, охоплених посухою, Відзначена кількість опадів значно нижче кліматичної норми, а на ряді станцій Миколаївської, Запорізької, Одеської обл. та АР Крим кількість вони були практично відсутні і становила менше 1мм.

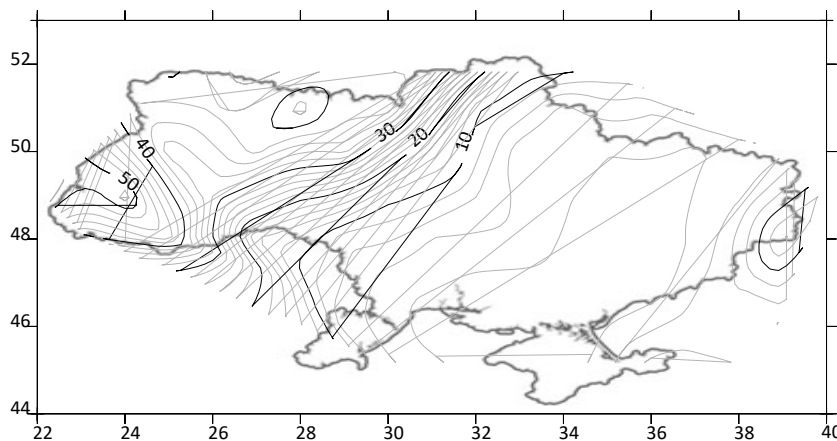


Рис.15. Розподіл кількості атмосферних опадів (мм) в період посухи серпня 2018 р.

Додатково, розподіл загальної хмарності для відповідного епізоду посухи показує найменшу її кількість у серпні 2018 р. В областях, охоплених посухою, кількість хмарності не перевищує 2-3 балів, в той час як на заході країни вона перевищує 4-5 балів.

На основі аналізу представлених даних, отримано таблицю порогів діагностичних предикторів для областей з явищем посухи.

Так, посушливі явища найбільш ймовірні при додатній Аномалії приземної температури повітря 2-3 °C, а також вище порогу 23,5 °C середнього місячного значення (добові або декадні значення можуть бути ще вищими).

Ймовірність посушливих явищ зростає при від'ємній Аномалія кількості атмосферних опадів, менше 50% та особливо 30% від кліматологічної норми.

Крім того, виникненню посушливих явищ сприяє добова Тривалість сонячного саява більше 11,5 год, а також порогова величина Прямой сонячної радіації більше 0,51 кВт/м². Також, посушливі явища супроводжується незначною хмарністю. При прогнозі початку посухи важливу роль відіграють накопичені (добові) значення предикторів, особливо аномалії приземної температури повітря, тривалості бездощового періоду, тривалості сонячного саява.

Дискусія

Важливою проблемою сьогодення є впровадження альтернативних джерел енергії замість традиційних, що значно впливають на зростання концентрації парникових газів. 26-а Конференція Рамочної конвенції ООН про зміни клімату (UKRENERGO, 2020) вказала, що країни використовують саме сонячну енергетику, як різновид альтернативних джерел енергії, для пом'якшення наслідків зміни клімату і водночас підтримки власного енергетичного потенціалу.

Відомо, що антропогенний чинник формує має один з найбільших внесків в зміну клімату на рівні з природними факторами. Згідно даних, представлених на конференції COP26, до 2030 року прогнозується підвищення середньої температури повітря в приземному шарі атмосфери щонайменше на 2,7 °C (Updated Climate Commitments..., 2021).

При цьому конференція COP26 наголошує на підвищенні адаптаційного потенціалу та посиленні стійкості і зменшенні вразливості галузей енергетики до зміни клімату, а також на потребах в адаптації в усіх сферах життєдіяльності людини. До такої адаптації якраз відноситься впровадження альтернативних джерел енергії і конкретно сонячної енергетики. Щороку приріст потужностей сонячної енергетики, які вводяться в експлуатацію, становить приблизно 40-50 %, а вдосконалення технології виготовлення фотоелектричних модулів призводить до істотного зниження собівартості електроенергії.

Найбільш показовий приклад успішності застосування сонячних технологій – острів Тау (Американське Самоа). Раніше острів'яни повністю залежали від поставок дизельного палива, однак після встановлення сонячної електростанції (СЕС) стали повністю незалежними.

Кліматичні умови та географічне положення України сприятливі для розвитку сонячної енергетики і будівництва сонячних електростанцій СЕС. Наші дослідження показують, що Навіть північні області країни мають значний потенціал для розвитку даної галузі енергетики, який не поступається більшості європейських регіонів.

Водночас, подальшого дослідження потребують природні фактори, що впливають на кліматичну систему. Як вказувалося вище, коливання прозорості атмосфери мають значний вплив на клімат, затемнення маскувало парникове потепління, але лише до 1980-х років, коли воно поступово змінилося на освітлення (Wild et al., 2007). Освітлення у першій половині 20 ст. могло сприяти швидкому приземному потеплінню протягом 1930-х і 1940-х років.

З 1980-х рр. “посилений” парниковий ефект зумовлює швидке підвищення температури (+0,38 °C/10р. над сушею). Однак освітлення не має перевищити парниковий ефект як основну причину глобального потепління, оскільки температура суші зросла на 0,8 °C з 1960 року. Це призводить до більшого випаровування та інтенсифікації глобального кругообігу води.

Вважається, поточні кліматичні моделі не здатні адекватно відтворити ці десятилітня варіації в гідрологічному циклі.

У тій мірі, в якій десятилітні коливання сонячної радіації біля поверхні землі спричинені антропогенним забрудненням повітря, ступінь прозорості атмосфери залежатиме від майбутніх антропогенних викидів аерозолів. У західних промислово розвинутих країнах не можна очікувати значного подальшого освітлення, оскільки рівень аерозолів стабілізувався приблизно з 2000 р. Таким чином, не можна виключити повторне загальне затемнення протягом найближчого десятиліття, оскільки потенціал зменшення забруднення повітря наближається до рівня насиченості в багатьох промислово розвинутих країнах.

Перехід до більш прозорої атмосфери позначається також у зменшенні альbedo поверхні і додаткового потепління, в першу чергу через відступання льодовиків і снігового покриву, що стосується України, особливо з 2010 р., коли сніговий покрив на рівнині значно скоротився.

Отримані оцінки мінливості зовнішніх та внутрішніх кліматотворчих чинників дозволяють будувати прогноз кліматичної системи до кінці 21го століття, на основі якісних показників (табл. 5).

Таблиця 5

Можливі зміни головних компонентів кліматичної системи
до кінця 21-го століття, до і після 2050 р.

Показник	До 2050 р.	До 2100 р.
Тихоокеанське десятилітнє коливання, PDO	-	+
Сонячна активність	-	+
Ступінь прозорості атмосфери	-	+
Обертання землі	+	-
Антропогенний чинник	+	++?

Антропогенний чинник у всі періоди призводить до підвищення температури повітря, причому з прискоренням до 2100 р., згідно сценаріїв ІРСС. Але для періоду після 2050 р. – існує значна ступінь невизначеності,

особливо у плані очевидності того що перехід до зеленої енергетики відкладається в сучасних умовах. Крім того, внесок антропогенного чинника буде зростати ніж внески природних чинників, хоча кількісно ї важко оцінити.

Сонячна активність має негативний внесок до 2050 р., і далі поступова буде підвищуватись. Ступінь прозорості атмосфери буде стабілізувати або незначно знижувати приземну температуру до 2050 р., і сприятиме підвищенню – до 2100 р. (оцінка може змінитись).

Аналогічний внесок має Тихоокеанське десятилітнє коливання, як головний чинник низькочастотної мінливості системи океан-атмосфера. Негативний внесок очікується до 2050 р., і додатний – до 2100 р. (Cummins, Lagerloef & Mitchum, 2005; Newman et al., 2003).

Інший геофізичний чинник – швидкість обертання землі – має додатний внесок до 2050 р., і негативний – до 2100 р.

Згідно з нещодавною інформацією про стан клімату, опублікованою Всесвітньою метеорологічною організацією (ВМО), існує приблизно 40-відсоткова ймовірність того, що зростання середньорічної глобальної температури досягне 1,5 °C вище за доіндустріальний рівень у найближче десятиліття. згідно з кліматичним сценарієм глобального потепління, збережеться тенденція збільшення площі небезпечних атмосферних посух на території східної та південної Європи. До кінця століття небезпечна атмосферна посуха може дуже сильно вплинути на важливі для сільського господарства зерновиробничі області.

Відповідно, з пришвидшенням глобального потепління з високою ймовірністю очікується збільшення економічних втрат та збитків, а додаткові людські та природні системи досягнуть меж адаптації (Pörtner et al., 2022).

Оцінка сонячних ресурсів є необхідним кроком у проектуванні фотоелектричних установок, що дозволяє зрозуміти доцільність установки в даному місці. Станом на травень 2021 року в Україні побудовано більше 200 сонячних електростанцій (СЕС). У 2020 році частка СЕС у структурі

виробництва електроенергії зросла вдвічі – до 4,6 % при загальному обсязі виробництва електроенергії 148,9 млрд кВт·год. Встановлена потужність СЕС протягом 2020 року збільшилася на 1,8 ГВт (+50,8 % у порівнянні з 2019 р.) і склала 5,3 ГВт. Підраховано, що наша країна має потенціал, щоб до 2030 р. вдесятеро збільшити використання відновлюваної енергії та на 15 % скоротити споживання природного газу. Метою розвитку сонячної енергетики в Україні є досягнення 25 % виробництва “зеленої” енергії до 2035 р. (UKRENERGO, 2020).

Висновки

У статті визначено оцінка потенціалу сонячних ресурсів України шляхом порівняння супутникових та наземних даних спостережень та розрахункових показників, встановлено зв'язки із станом регіонального клімату та окремих метеорологічних явищ. Отримані результати свідчать про можливість використання супутникових даних сонячних характеристик, що надає можливість оцінювати просторовий розподіл на значних територіях.

Надана характеристика головних кліматотворчих факторів, зовнішніх геофізичних та внутрішніх планетарних у світлі сучасних змін клімату, з виходом на діагноз та прогноз окремих небезпечних явищ. Надано прогноз розвитку кліматичної системи до 2100 р., у якому до середини століття очікується стабілізація приземного потепління, або часткове похолодання, а до 2100 р. – подальше потепління.

Встановлено сучасний режим сонячної радіації на території України. Аналіз найбільш значущих сонячних характеристик показав зростання потенціалу геліоенергетичних ресурсів. За останні десятиліття та їх достатність для використання на значній частині території України.

Визначено важливі зміни у режимі складових радіаційного балансу у теплому періоді року. Для значної частини території країни Період сучасного потепління відзначається зростанням прямої та сумарної сонячної радіації,

тривалості сонячного сяйва, альbedo підстильної поверхні і зниження розсіяної. Зміни складових радіаційного режиму супроводжуються коливаннями за вегетаційний період із тенденцією посилення посушливості; що істотно впливає на умови вирощування сільськогосподарських культур в країні.

У багаторічному плані в Україні зберігається тенденція до підвищення температури повітря та зменшення атмосферних опадів в літній період і зростання ймовірності посушливих явищ. У регіональному плані, це зумовлено посиленням області високого тиску на сході Європи у другій половині літа.

Збільшилась частота посушливих явищ впродовж теплого та вегетаційного періодів, що необхідно враховувати при складанні довгострокових прогнозів на майбутнє та плануванні економіки. В останнє десятиріччя посилюється ступінь екстремальності клімату, і разом з нею, вразливість більшості областей щодо змін клімату. Впродовж літнього сезону, як найбільш вразливі виділяють райони півдня, сходу, осередки центру.

Сучасні зміни атмосферної циркуляції в Атлантико-Європейському секторі включають переміщення зони дії головних центрів дії атмосфери, з посиленням впливу субтропічного антициклону, що безпосередньо досягає України. Виявлено тип атмосферної циркуляції, який формує умови розвитку посушливих явищ, це антициклонічний гребінь блокуючого характеру над Східною Європою, із значною стійкістю у часі синоптичного процесу.

В останні роки відзначена значна міжсезонна мінливість південних процесів, зі збільшеною частотою чорноморських циклонів, та появою рідких (північно-західних) траєкторій із значними опадами. В умовах прогнозованої підвищення ступеню посушливості це добрий знак, що не дозволить степам півдня України перетворитись на пустелю.

Отримані висновки мають наукове та практичне значення, важливі для кліматичного обслуговування галузей економіки.

Список використаних джерел

- Aguirre, L. A., Letellier, C., & Maguet, J. (2008). Forecasting the time series of sunspot Numbers. *Solar Phys.*, 249(1), 103-120.
- Alpert, P, Kishcha, P, Kaufman, YJ, & Schwarzbard, R. (2005). Global dimming or local dimming? Effect of urbanization on sunlight availability. *Geophys Res Lett* 32:L17802. doi:10.1029/2005gl023320
- Angell, J. K. (1997). Estimated impact of Agung, El Chichon and Pinatubo volcanic eruptions on global and regional total ozone after adjustment for the QBO. *Geophysical Research Letters*, 24(6), 647-650.
- Batista dos Santos, S. M., Bento-Gonçalves, A., & Vieira, A. (2021). Research on Wildfires and Remote Sensing in the Last Three Decades: A Bibliometric Analysis. *Forests*, 12(5), 604. <https://doi.org/10.3390/f12050604>
- Bindoff, N. L., Stott, P. A., Achutarao, K. M., Allen, M. R., Gillett, N., Gutzler, D. ... Mokhov, I. I. (2013). Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York.
- Cummins, P., Lagerloef, G. S. E., & Mitchum, G. (2005). A regional index of northeast Pacific variability based on satellite altimeter data. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L17607. doi:10.1029/2005GL023642.
- Dutton, E. G., Nelson, D. W., Stone, R. S., Longenecker, D., Carbaugh, G., Harris, J. M., & Wendell, J. (2006). Decadal variations in surface solar irradiance as observed in a globally remote network. *J Geophys Res Atmos*, N 111:D19101.
- Eddy, J. A. (1976). The Maunder Minimum. *Science*, 192(4245), 1189-2020. DOI:10.1126/science.192.4245.1189.
- Foukal, P. & Eddy, J. (2007). Did the Sun's Prairie Ever Stop Burning? *Solar Physics*, 245(2), 247-249. DOI:10.1007/s11207-007-9057-8

- Franzke, C., & Feldstein, B. (2005). The Continuum and Dynamics of Northern Hemisphere Teleconnection Patterns. *Journal of the Atm. Sciences*, 62(9) : 3250–3267. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAS3536.1>
- Gilgen, H., Wild, M., & Ohmura, A. (1998). Means and trends of shortwave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data. *J Climate* 11, 2042-2061.
- Girs, A. A. (1981). Some forms of atmospheric circulation and their utilisation in forecasts (K voprosu o formakh atmosfernoj cirkulyacii i ikh prognosticheskom ispolzovanii). *Trudy AANII*, 373, 4-13.
- Hersbach, H., de Rosnay, P., Bell, B., Schepers, A., Simmons, C. Soci, S. ... Zuo, H. (2018). *Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP. ECMWF ERA Report Series.*
- Luo, B. W. X, Young-Min, Y., & Jian, L. (2019). Historical change of El Niño properties sheds light on future changes of extreme El Niño. *Earth, atmospheric, and planetary sciences*, 116(45), 22512-22517.
- Marsz, A. A., Matuszko, D., & Styszyńska. (2021). The thermal state of the North Atlantic and macrocirculation conditions in the Atlantic-European sector, and changes in sunshine duration in Central Europe. *International Journal of Climatology*, 42(2), 1-14.
- Martazinova, V. F. (2005). The classification of synoptic Patterns by Method of Analogs. *J. Environ. Sci. Eng.*, 7, 61-65.
- Meehl, G. A., & Tebaldi, C. (2004). More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305(5686), 994-997.
- Newman, M., Compo, G. P., Michael, A. (2003). ENSO-Forced Variability of the Pacific Decadal Oscillation. *Journal of Climate*, 16(23), 3853-3857.
- Ohmura, A., Dutton, E. G., Forgan, B., Frohlich, C., Gilgen, H., Hegner, H. ... Wild, M. (1998). Baseline Surface Radiation Network BSRN/WCRP): new precision radiometry for climate research. *Bull Am Meteorol Soc.*, 79, 2115-2136.

- Papineau, J. (2001). Wintertime temperature anomalies in Alaska correlated with ENSO and PDO. *Int. J. Climatol.*, 21, 1577-1592.
- Pinker, R. T., & Laszlo, I. (1992). Global Distribution of Photosynthetically active radiation as Observed from Satellites. *Journal of Climate*, 5, 56-65.
- Pinto, J., & Joaquim, C. (2012). Past and recent changes in the North Atlantic oscillation. *Climate Change*, 3, 79-90.
- Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Tignor, M. ... Okem, A. (eds.). (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, 3-33.
- Przybylak, R., Majorowicz, J., Brázdil, R., & Kejna, M. (2009). *The Polish Climate in the European Context. An Historical Overview* Springer Science & Business Media.
- Rigor, I., Colony, R., & Martin, S. (2000). Variations in surface air temperature observations in the Arctic, 1979-1997. *J. Climate*, 13, 896-914.
- Shi, G. Y., Hayasaka, T., Ohmura, A., Chen, Z. H., Wang, B., Zhao, J. Q., Che, H. Z., & Xu, L. (2008). Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China. *J. Appl Meteorol Climatol*, 47, 1006-1016. doi:10.1175/2007jamc1493.1
- Sidorenkov, N. S., & Wilson, I. (2017). Influence of solar retrograde motion on terrestrial processes. *Astronomical and Astrophysical Transactions, Cambridge Scientific Publishers (Cambridge)*, 30(2), 249-260. <http://oap.onu.edu.ua/issue/view/6825>
- Slomka, J. (1983). Photosynthetically active insolation. *Publ. Inst. Bioph. Pol. Acad. Sci. D*, 18(169), 105-109.
- Stott, P. A. (2003). Attribution of regional-scale temperature changes to anthropogenic and natural causes. *Geophysical Research Letters*, 30(14), 1724, doi:10.1029/2003GL017324.

- UKRENERGO. (2020). General news. Retrseved from <https://ua.energy/general-news/in-2020-the-installed-capacity-of-wpps-and-spps-increased-by-41-and-their-share-in-the-generation-mix-doubled/>
- Updated Climate Commitments Ahead of COP26 Summit Fall Far Short, but Net-Zero Pledges Provide Hope. (2021). Retrieved from: <https://unfccc.int/news/updated-climate-commitments-ahead-of-cop26-summit-fall-far-short-but-net-zero-pledges-provide-hope>
- Viles, H. A., Goudie, A. S. (2003). Interannual, decadal and multidecadal scale climatic variability and geomorphology. *Earth Science Reviews*, 61(1), 105-131. DOI: 10.1016/S0012-8252(02)00113-7
- Wild, M. (2012). *Solar Radiation Versus Climate Change. Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_448
- Wild, M., Ohmura, A., Makowski, K. (2007). Impact of global dimming and brightening on global warming. *Geophys Res Lett.*, 34. L04702. doi:10.1029/2006gl028031CrossRefGoogle Scholar
- Zwiers, F. W., and Zhang, X. (2003). Towards regional-scale climate change detection. *Journal of Climate*, 16(5), 793-797.
- Абдусаматов, Х. И. (2010). Двухвековое снижение солнечной постоянной ведёт к глубокому похолоданию климата. *Солнечная и солнечно-земная физика*, 14-21.
- Возняк, О. Т., та Янів, М. Є. (2010). Енергетичний потенціал сонячної енергетики та перспективи його використання в Україні. *Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". Теорія і практика буд-ва*, 664, 7-10.
- Гойса, М. І., та Перелет, Н. А. (2003). Фотосинтетично активна радіація. *Клімат України*, 65-68. Київ: Вид-во Раєвського.
- Дмитренко, Л. В., та Барандіч, С. Л. (2007). Оцінка кліматичних ресурсів сонячної енергії в Україні. *Наук. праці УкрНДГМІ*, 256, 72-83.

- Дмитриев, А. А., та Беязо, В. А. (2006). *Космос, планетарная климатическая изменчивость и атмосфера полярных регионов*. Гидрометеиздат.
- Дробишева, В. П., Токар, К. П., та Федоренко, Г. А. (2014). Сучасний стан використання відновлювальних джерел енергії в Україні. *Науковий вісник будівництва*, 1, 165-168. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2014_1_44.
- Журавлева, Т. Б., Рублев, А. Н., Удалова, Т. А., та Чеснокова, Т. Ю. (2006). О вычислении фотосинтетически активной радиации при оценках параметров углеродного баланса наземных экосистем. *Оптика атмосферы и океана*, 1(19), 64-68.
- Кихтенко, Я. В., та Тимофеев, В. Є. (2022). Порівняння супутникових та наземних даних спостережень тривалості сонячного сяйва на прикладі території України. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 3(65), 127-138.
- Кудря, С. О., Яценко, Г. П., Душина, Л. Я., та ін. (2001). *Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії України*. Київ.
- Ліпінський, В. М., Дячук, В. А., та Бабіченко, В. М. (ред.). (2003). *Клімат України*. К.: УкрНДГМІ.
- Ліпінський, М. В., та Бабіченко, В. М. (2006). *Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986-2005 рр.)*. (Монографія).
- Лозицький, В., та Єфіменко, В. (2013). Прогноз сонячної активності у 24-му циклі з врахуванням немонотонності його фази росту. *Вісник КГУ, Сер. Астрономія*, 1(50), 30 -32.
- Мартазинова, В. Ф., та Свердлик, Т. А. (1998). Крупномасштабная атмосферная циркуляция XX столетия, её изменения и современное состояние. *Труды УкрНИГМИ*, 246, 21-27.
- Мартазинова, В. Ф., та Сологуб, Т. Н. (2000). Атмосферная циркуляция, формирующая засушливые условия на территории Украины в конце XX ст. *Тр.УкрНИГМИ*, 248, 36-47.

- Мартазинова, В. Ф., Тимофеев, В. Е., та Иванова, Е. К. (2010). *Атмосферная циркуляция Южной полярной области и климат Антарктического полуострова*. Киев.
- Мартазінова, В. Ф., та Щеглов, О. А. (2017). Характер экстремальных осадков начала XXI столетия на территории Украины. *Укр. гідрометеорологічний журнал*, 22, 36-45. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.04>
- Настанова гідрометеорологічним станціям і постам. (2011). *Метеорологічні спостереження на станціях*, 3(1). Державна гідрометеорологічна служба Київ.
- Полонский, А. Б. (2001). Роль океана в современных изменениях климата. *Мор. гидрофиз. журн.*, 6, 32-58.
- Пясецька, С. В., та Щеглов, О. А. (2017). Тенденції у змінах кількості випадків відкладень ожеледі на території України протягом ожеледного періоду 2001-2015 рр. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 3(46), 95-104.
- Рибченко Л. С., та Савчук С. В. (2013). Радіаційний режим в умовах інтенсивних засух 2001 - 2010 рр. в Україні. *Укр. географічний журнал*, 1, 5-11. <https://doi.org/10.15407/ugz2013.01.005>
- Рибченко, Л. С., та Савчук, С. В. (2019). Геліоенергетичні ресурси України за 1986-2015 рр. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 1(52), 88-97.
- Рибченко, Л. С., та Савчук, С. В. (2022). Потенціал геліоенергетичних кліматичних ресурсів сонячної радіації в Україні. *Укр. географічний журнал*, 1, 16-23.
- Савчук, С. В., Тимофеев, В. Є., та Ювченко, Н. М. (2018). Районування України по впливу екстремальних значень максимальної температури повітря у теплий та холодний періоди року. *Укр. гідрометеорологічний журнал*, 22, 46-56. http://eprints.library.odku.edu.ua/3278/1/uhmj_22_2018_46.pdf

- Тараріко, О. Г., Ільєнко, Т. В., та Кучма, Т. Л. (2016). Вплив змін клімату на продуктивність та валові збори зернових культур: аналіз та прогноз, *Укр. географічний журнал*, 1, 14-22.
<https://doi.org/10.15407/ugz2016.01.014>
- Тимофєєв, В. Є., та Татарчук, О. Г. (2017). Сильні зливи на території України на рубежі XX-XXI століть. *Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка, Сер. Географія*, 1(66), 89-93. URL: <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2017.66.13>
- Хаустова, В. Є., Котляров, Є. І., та Лелюк, О. В. (2018). Аналіз державної політики розвитку електроенергетики України. *БІЗНЕСІНФОРМ*, 12, 182-193.
- Щербань, М. І. (1991). *Клімат і врожай на Україні*. К.: Знання.

КОНЦЕПЦІЯ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ВОЄННО-ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ЗМІНИ БІОТИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ЕКОСИСТЕМ В УМОВАХ ВЕДЕННЯ БОЙОВИХ ДІЙ

Чумаченко С.Н., докт. техн. наук, старш. наук. співр. Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна

Луньова О.В., докт. техн. наук, доцент, Державний університет «Житомирська політехніка» м. Житомир, Україна

Гончаренко І.О., канд. техн. наук, Сумський державний університет, м. Суми, Україна

Луньов А.О., канд. техн. наук, доцент, Державний університет «Житомирська політехніка» м. Житомир, Україна

Abstract

The research suggests to generalize the existing approaches of military-technogenic magnitude due to changes in their biotic component. The transition to environmental regulation of military-technogenic loads during the combat use of troops is a necessary and even a main element of building interaction between the Armed Forces and the natural environment.

The purpose of this study is to develop methodological approaches to the assessment of military-technogenic load due to changes in the biotic components of the ecosystem.

For the integral assessment of the ecological condition of the military natural and man-made geosystem, the approach of ecosystem indication can be applied. In order to make observations, it is necessary to build an observer of the Volterra system. It can be implemented based on the application of a mathematical evaluating apparatus enabling observation of trophic network elements and on the observation results of the biotic components.

Вступ

Постановка завдання у загальному вигляді. Необхідною умовою реалізації природоохоронних принципів, закладених в концепції збалансованого розвитку соціоекологоекономічних систем (СЕС) (Сергієнко, Дзюбенко & Ожго, 2019) є створення науково обґрунтованої системи регламентації воєнно-техногенних навантажень на природну біогу Землі. Така зміна пріоритетів під час ведення бойових дій в Україні на фоні розвиненого санітарно-гігієнічного нормування є ознакою зміни масштабів нашого світосприйняття екологічних проблем військової діяльності.

Перехід до екологічного нормування воєно-техногенних навантажень під час бойового застосування військ являється необхідним якщо не основним елементом побудови взаємодії Збройних Сил і навколишнього природного середовища (НПС) на основі екологічного імперативу сьогодні.

Аналіз останніх публікацій, в яких започатковано розв'язання даного питання. Проблема нормування антропогенних навантажень на екосистеми обговорюється в наукових колах екологів вже більше двох десятиліть (Измалков В. & Измалков А., 1998; Израэль, 1984; Шпак & Табачніков, 2020; Биченок & Трофимчук, 2002; Білявський, Бутченко & Навроцький, 2002; Чумаченко, 2006). Тут накопичено величезний фактотологічний і методологічний матеріал, який сьогодні практично ніяк не використовується для вирішення технічних і технологічних проблем при пошуках підходів до забезпечення екологічної безпеки бойових дій.

У спеціальній нормативній літературі переважає спеціалізована інформація про порушення природного середовища, що в якості міри використовує ступінь концентрації шкідливих речовин в тих або інших складових абіотичного середовища екосистем.

Сьогодні цілком справедливо ставляться проблеми деградації тих або інших частин регіональних екосистем (водно-болотні угіддя, ліси, луки і т. ін.). Для отримання такої інформації широко використовуються найсучасніші методи

спостережень, включаючи космічні (Лялько & Попова, 2006). Саме завдяки цим методам люди оцінили всю масштабність реального руйнування НПС в результаті промислового виробництва та сільськогосподарської діяльності. Були створені методи картографування екосистем з урахуванням антропогенного чинника і складені карти найбільш уражених районів планети (Nellemann, Kullerud & Vistnes, 2001). Усвідомлення глобальності і потенційної безповоротності техногенних змін в навколишньому природному середовищі породило масові «зелені» рухи, політичні партії і висунуло екологічну тематику на перший план в воєнно-наукових дослідженнях. При цьому великі зусилля витрачаються на створення методів об'єктивної оцінки воєнно-техногенного впливу на навколишнє середовище. В літературі описано цілий ряд таких методів, найбільшого поширення з яких набули матричні та картографічні методи (Чумаченко, 2004).

Проте загальноприйнятого універсального метода оцінювання дії антропогенного навантаження військового походження на навколишнє природне середовище поки що немає.

Формулювання цілей статті. Метою цієї статі є розробка методологічних підходів до оцінювання воєнно-техногенного навантаження (ВТН) через зміни біотичних складових екосистеми.

Виклад основних положень

Порівняльний аналіз цілого ряду публікацій з питань оцінювання антропогенних змін різних типів екосистем дозволив сформулювати наступні методологічні принципи для оцінювання ВТН від ведення бойових дій:

- диференційований розгляд реакції різних екосистем на однаковий вплив ВТН;
- у кожній екосистемі, як критерії оцінювання її змін, прийнята техногенна зміна середовищеутворюючих факторів абіотичного середовища військової природно-техногенної геосистеми (ВПТГС), що мають найбільше

індикаційне значення;

- інтегральна оцінка рівня ВТН наземних екосистем у цілому проводиться в умовних показниках за чотирьохбальною шкалою на основі оцінювання кількісних даних змін окремих компонентів екосистем (наприклад через співвідношення уражених і не змінених площ екосистем);

- специфічність ВПТГС визначає розробку методичних прийомів оцінювання їхнього екологічного стану. В основу комплексного екологічного оцінювання стану ВПТГС покладено спільний аналіз біотичних і абіотичних середовищеутворюючих факторів, що характеризують екосистеми в умовах динамічного ВТН під час ведення бойових дій.

Будь-яке біологічне обмеження може виконувати регулюючі функції по відношенню до воєнної техносфери лише тоді, коли воно має кількісну оцінку. Тому в загальному вигляді вимоги, яким повинен задовольняти біологічно значущий критерій, що обмежує рівень воєнно-техногенного навантаження на екосистему, має такий вигляд:

- комплексність – здатність інтегрально характеризувати воєнно-техногенні зміни природної екосистеми;

- об'єктивність – можливість визначення на основі реальних природних параметрів стану ВПТГС;

- конкретність – наявність чисельної величини;

- цілеспрямованість – застосування критерію повинно забезпечувати збереження ВПТГС.

Початок розвитку ідей екологічного нормування на основі оцінювання рівня техногенних змін біоти екосистем пов'язують з роботами акад. С.О. Шварца. Основоположним для розвитку цього напрямку стало його твердження – «якщо в зміненому людиною середовищі біогеоценоз підтримує себе, як систему, в оптимальному стані, це означає, що ступінь антропогенної дії не перевищує його адаптаційних можливостей» (Галченко, 2003).

Найбільш детальне опрацювання концепції екологічного нормування техногенних дій дане в роботах (Галченко, 2003). У найзагальнішому вигляді вирішувана ними задача зводиться до встановлення таких величій техногенних навантажень на екосистему, які не викликають протягом невизначено тривалого періоду, відхилень в їх нормальному функціонуванні, що розташовані біля джерела впливу. При цьому методологія визначення допустимого нормативу дії базується на його визначенні, як критичної відмітки на кривій «доза-ефект» для певних компонентів біоти реальної екосистеми. Такий підхід, безумовно, максимальним чином враховує інтереси біологічної системи і її структуру, але майже не враховує внутрішньої структури техногенної дії, розглядаючи його як інтегральний. Визначення допустимої величини дії шляхом побудови емпіричної залежності «доза-ефект» і використання її як градуовальної кривої, можливо тільки в тому випадку, якщо екосистема вже пройшла стадії техногенного порушення її біоти до та після критичної відмітки. Тому встановлення нормативу дії на екосистему носить характер післядії, а не превентивної міри.

Визначення рівня ВТН базується на існуванні об'єктивної залежності між величиною впливу воєнно-техногенних факторів на об'єкти екосистеми та негативного ефекту від цього впливу, який полягає в зміні видового складу біоценозу та структури екосистеми і порушенні її зв'язків.

Наприклад, задача індикації стану екологічної безпеки під час ведення бойових дій (БД) полягає у виявленні для кожної функціональної зони військової інфраструктури такого набору воєнно-техногенних факторів, вплив яких призводить до незворотних негативних екосистемних ефектів, а також у визначенні індикаторів, за якими можна було б кількісно оцінити ступінь небезпеки такого впливу.

Теоретична й методична основа цього підходу до оцінювання ВТН базується на припущеннях про його кореляцію з екологічним станом абіотичних компонентів ВПТГС та зі станом біоти й екосистеми в цілому.

На екосистемному рівні не існує яких-небудь жорстких внутрішніх механізмів підтримки строго визначеного стану НПС, тому що екосистеми можуть відповідати на зовнішні впливи зміною своїх параметрів у досить широкому діапазоні. При цьому вони не будуть втрачати здатності до стійкого співіснування поряд з техногенною інфраструктурою ВПТГС.

Відомо, що біогеоценоз, екосистема чи біологічне співтовариство, що існують в більш-менш незмінному вигляді тривалий час, мають певну внутрішню здатність протистояти збурюючим природним впливам. Цю здатність екологічної системи біологи часто називають «стійкістю» або «стабільністю».

Слід зауважити, що практично всі з існуючих підходів до оцінювання стійкості екосистем розглядали цю проблему по відношенню до природних екстремальних дій, які на значному проміжку часу є звичними для цих екосистем і рідко носять комплексний характер. Зовсім інакше виглядає проблема стійкості екологічних систем до воєнно-техногенного впливу. Тут ми маємо справу, як правило, з діями, які не властиві природному середовищу, і є складним конгломератом з механічних, фізичних і хімічних чинників, що поєднуються в різних співвідношеннях. Не менш важливою обставиною є те, що при оцінці взаємодії природних і військових природно-техногенних геосистем стійкість екосистеми має двоякий зміст. З одного боку – стійкість екосистеми є її властивістю, що характеризує здатність витримувати зовнішні воєнно-техногенні впливи. Але з іншого, якщо якась екосистема стійка до конкретного воєнно-техногенного фактора, то значить цей фактор безпечний для цієї екосистеми. Таким чином, поняття екологічної безпеки БД є проекцією в військову техносферу поняття стійкості екосистеми. Враховуючи, що цільовою функцією при вивченні взаємодії воєнної техносфери і біосфери є рівень збереження природної біоти районів ведення БД, то обидва зазначених раніше поняття ув'язуються воєдино через досягнення цієї мети, але кожне з них має своє власне призначення. Дослідження стійкості екосистем повинно дати кількісну оцінку допустимого, за умовами збереження екосистеми, рівня воєнно-

техногенного навантаження, а вивчення причинно-наслідкових зв'язків в процесі його формування, повинно визначити технологічні шляхи досягнення біологічно обумовленого порогу для кожного воєнно-техногенного фактора.

Структура співтовариств живих організмів екосистеми (біоценозів) формується потоком енергії, який проходить через екосистему (Рамад, 1981). Склад біоценозів визначається числом і значимістю видів, які до нього входять, а структура – найбільш значимими взаємодіями всередині біоценозів. Таким чином, благополуччя біоценозу з точки зору його структури може бути визначене як благополуччя домінуючого на кожному трофічному рівні виду. В свою чергу, благополуччя домінуючих видів визначається тією долею енергії, яка поступає на відповідний трофічний рівень, і може бути витрачена особинами цих видів на відповідні потреби життєзабезпечення:

$$E_i(n+1) = E_i(n) + \Omega_i(n) - Y_i(n) - R_i(n) + U_i(n) + W_i(n), \quad (1)$$

де $\Omega_i(n)$ – сонячна енергія, що перетворюється у харчовий раціон (продукція фотосинтезу); $Y_i(n) = \alpha_{Y_i} \cdot E_i(n)$ – витрати енергії на перетворення в зручну форму для обраного трофічного рівня; $R_i(n) = \alpha_{R_i} \cdot E_i(n)$ – „поглинання” енергії даного трофічного рівня наступними (вищими) трофічними рівнями; $U_i(n)$ – штучна зовнішня стабілізуюча дія щодо покращення природного середовища; $W_i(n)$ – вплив на енергетичний баланс трофічного рівня із боку бойової підготовки; i – номер трофічного рівня; n – поточний дискретний час.

Остаточно для кожного рівня отримаємо:

$$E_i(n+1) = (1 - \alpha_{Y_i} - \alpha_{R_i}) \cdot E_i(n) + \Omega_i(n) + U_i(n) + W_i(n), \quad (2)$$

де особисте значення рівняння $z_i = 1 - \alpha_{Y_i} - \alpha_{R_i}$ і за його величиною $|z_i|$ можливо робити висновок про стійкість трофічного рівня.

Якщо $|1 - \alpha_{Y_i} - \alpha_{R_i}| \geq 1$, то це означає необмежений доступ енергії на заданий трофічний рівень, що в свою чергу означає порушення енергетичного

балансу між рівнями, а значить втрату можливості до існування багаторівневої системи.

У відповідності з принципом Лібіха-Шелфорда (Данилюк, 2015), ріст і процвітання організмів визначається тим екологічним середовищеутворюючим фактором, значення якого ближче всього до межі діапазону толерантного існування.

Очевидно до кількісних характеристик оцінювання впливу ВТН можна віднести ступінь близькості стану екосистеми до межі її стійкості, де буде втрачена передбачуваність змін параметрів екосистеми у відповідь на зовнішній вплив:

$$ES = \max_{i=1, N_{ES}} (|z_i|), \quad (3)$$

де ES - показник екологічної стійкості. Відповідно, для визначення стану показника стійкості можна встановити межі зміни екологічних станів (табл. 1).

Таблиця 1

Межі зміни станів екосистеми за показником екологічної стійкості

№ пп	Якісна оцінка екологічної стійкості ES	Межі зміни ES
1.	Стан еволюційного розвитку	$ES < 0,25$
2.	Техногенно змінений стан	$0,25 \leq ES \leq 0,5$
3.	Критичний стан	$0,5 \leq ES \leq 0,75$
4.	Закритичний стан	$0,75 \leq ES \leq 1$
5.	Катастрофічний	$ES > 1$

Видове різноманіття екосистем безпосередньо пов'язане з їх стійкістю і в загальному випадку тим вище, чим благополучніше екосистема. Воно формується в результаті пристосування живих організмів до кількості та якості енергії й поживних речовин, що поступають на відповідні трофічні рівні екосистеми. Для характеристики біорізноманіття крім знання числа видів живих організмів, необхідна інформація й про значимість кожного виду (число особин даного виду, біомасу, первинну та вторинну продукцію і т. ін.).

Індикатори відгуку біоти екосистем ВПТГС та операційних зон та районів ведення БД для свого формування використовують дані польових досліджень

біоценозів та результати таксації тваринного та рослинного світу на цій території (Chumachenko, 2005).

Стан живих організмів і вплив на них техногенних факторів оцінюється винятково за реакцією організмів безпосередньо на вплив, а також у період післядії. Практично всяке відхилення від норми в умовах інтенсивного ВТН може викликати небезпеку виникнення негативних наслідків. І чим значніше відхилення, тим вища ймовірність настання цих наслідків і тим вони серйозніші.

У свою чергу, реакція екосистем будь-якого рангу залежить від того, якою мірою екологічний стан ВПТГС адекватний умовам гомеостазу цих систем. Останній допускає збереження стійкості екосистем в умовах впливу цілого ряду факторів ВТН. При цьому вплив кожного фактора чи поєднань деяких факторів може бути оцінений як мінімальний, якщо вони не викликають реакції (збурювання) екосистем, і максимальний, наслідками якого може бути деградація екосистем в цілому або окремих їх компонент, чи навіть загибель екосистем і перехід їх в нову якість. Діапазон між мінімальним і максимальним рівнем впливу факторів ВТН являє собою "межі толерантності" екосистем, тобто той діапазон зміни рівня впливу, у межах якого вони здатні за рахунок своїх адаптаційних можливостей протистояти йому.

Таким чином, оцінка реакції «військової» екосистеми на зміну зовнішніх умов передбачає, що при мінімальних змінах, які не виходять за фоновий рівень, (мінімальний вплив факторів ВТН) можна характеризувати стан екосистеми як здоровий, при максимальному впливі факторів, що змінюють системоутворюючі чинники, цей стан оцінюється як хворобливий (або патологія). Весь проміжок між зазначеними двома станами ділиться на два інтервали, обумовлені як "напруга" і "стомлення".

Напруга характеризує стадію мобілізації регуляторних і гомеостатичних механізмів екосистеми, що забезпечують її існування. Коли мобілізовані, у тому числі й енергетичні, ресурси вже не в змозі забезпечити компенсацію

зовнішніх впливів й існування екосистеми на "заданому" природою рівні, наступає стомлення – оборотний стан екосистеми з виснаженням ресурсів і регуляторних гомеостатичних систем.

Екстраполяція запропонованої схеми на весь широкий спектр природних і природно-техногенних геосистем зі збереженням загального принципу її побудови (Коржнев, Кошляков & Байсарович, 2005) дозволила запропонувати як рівневі оцінювання стану ВПТГС наступний ряд: "екологічна норма – екологічний ризик – екологічна криза – екологічне лихо" (табл. 2).

Таблиця 2

Принципова схема взаємопов'язаної оцінки впливу ВТН, стану абіотичних складових ВПТГС, біоти й екосистеми

Оцінюваний параметр	Категорії (рівні)			
	I	II	III	IV
Екосистема (по Б.В.Виноградову)	Екологічна норма	Екологічний ризик	Екологічна криза	Екологічне лихо
Стан літосфери і її компонентів	Задовільний (сприятливий)	Умовно задовільний (відносно несприятливий)	Незадовільний (досить несприятливий)	Катастрофічний
Умови життєдіяльності людини	Комфортні	Дискомфортні	Сильно дискомфортні	Небезпечні
Стан здоров'я людини	Здоров'я	Напруга	Стомлення	Хвороба
Якість територіального ресурсу	Високе	Середнє (підвищене)	Знижене	Низьке
Умови гомеостазу екосистеми	Не викликають реакції (збурювання екосистеми)	"Межа толерантності" екосистеми, її здатність протистояти зовнішньому впливу		Руйнування, загибель екосистеми
Воєнно-техногенне навантаження (ресурсний, механічний, хімічний, фізичний вплив)	Слабке	Помірне	Сильне	Небезпечне

З точки зору можливостей використання емпіричних даних при вивченні системи взаємодії «воєнно-техногенний вплив – реакція біоти» для

прогнозування стану ВПТГС доцільним представляється ідея регламентації дії на біоту через її «критичну ланку», яка може бути групою видів або навіть одним індикаторним видом.

Висновки

Згідно загальним уявленням класичної екології (Іваненко & Носачова, 2020) стійкість екосистем пов'язують не тільки з самим фактом збереження видового складу, але й здатністю повертатися в первинний рівноважний стан після зовнішніх дій. Таким чином, стосовно специфіки БД, екосистема стійка до воєнно-техногенного навантаження до тих пір, поки її біота зберігає здатність до самовідновлення (тобто до повернення на шлях еволюції за законами циклічної сукцесії після зняття воєнно-техногенного навантаження).

Проектуючи цю умову в воєнну техносферу, можна сформулювати поняття екологічної безпеки під час ведення БД: бойові дії екологічно безпечні, якщо воєнно-техногенне збурення абіотичної складової екосистеми не перевищує рівня, при якому її біота зберігає здатність до самовідновлення (тобто до повернення на шлях еволюції за законами циклічної сукцесії після зняття воєнно-техногенного навантаження).

Таким чином, стійкість екосистеми, як здатність протистояти воєнно-техногенному тиску з лімітованим терміном дії (обмежені строки проведення бойових дій), є не що інше як біологічно обґрунтована міра величини воєнно-техногенного навантаження, яке при застосуванні різних видів і систем зброї і військової техніки робить БД екологічно безпечними.

Для інтегрального оцінювання екологічного стану ВПТГС можна застосувати підхід екосистемної індикації, коли в якості індикатору буде ціла трофічна мережа спостерігаємих на цій території хребетних. Цей інтегральний індикатор утворює так звану вольтеррівську систему (Сви́режев & Логофет, 1978).

Для здійснення спостережень необхідно побудувати спостерігач вольтеррівської системи, який може бути реалізований на основі застосування математичного апарату оцінювання спостерігаємості елементів трофічної мережі за результатами спостережень біотичних компонентів екосистем операційних зон та районів ведення бойових дій. Виходячи з основних положень теорії біоценології, як робочу гіпотезу можна висунути положення про те, що необхідною й достатньою умовою самовідновлення біоти екосистеми операційних зон та районів ведення бойових дій є збереження життєздатності едифікаторної синузії її фітоценозу.

Список літератури

- Chumachenko, S. M. (2005). *Pilot project concerning the implementation of a nature management plan on a Ukrainian military training area*. Final report draft. Kyiv.
- Nellemann, C., Kullerud, L., & Vistnes, I. (2001). *Global Methodology for mapping human impactson the Biosphere*. UNEP/DEWA.
- Биченок, М. М., & Трофимчук, О. М. (2002). *Проблеми природно-техногенної безпеки в Україні*. К.: РНБОУ.
- Білявський, Г. О., Бутченко, Л. І., & Навроцький, В. М. (2002). *Основи екології: теорія та практикум*. Навчальний посібник. К.: Лібра.
- Галченко, Ю. П. (2003). Методические подходы к оценке техногенного воздействия через изменение компонентов экосистем. *Экологические системы и приборы*, 1, 29-37.
- Данилюк, С. Л. (2015). Оцінка розповсюдження забруднень у зонах інтенсивного воєнно-техногенного навантаження військових полігонів Сухопутних військ. *Військово-технічний збірник*, (13), 111-119. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.13.2015.111-119>
- Измалков, В. И., & Измалков, А. В. (1998). *Техногенная и экологическая безопасность и управление риском*. СПб, НИЦЭБ РАН.

- Израэль, Ю. А. (1984). *Экология и контроль состояния природной среды*. М.: Гидрометеиздат.
- Іваненко, О., & Носачова, Ю. (2020). *Екологічна безпека інженерної діяльності*. Київ: Кондор.
- Коржнев, М. М., Кошляков, О. Є., & Байсарович, І. М. (2005). *Екологічна геологія*. Київ: ВПЦ „Київський університет”.
- Лялько, В. І., & Попова, М. О. (2006). *Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування*. (Монографія). К.: Наукова думка.
- Рамад, Ф. (1981). *Основы прикладной экологии. Воздействие человека на биосферу*. Ленинград: Гидрометеиздат.
- Свирижев, Ю. М., & Логофет, Д. О. (1978). *Устойчивость биологических сообществ*. М.: Наука.
- Сергієнко, Л. В., Дзюбенко, О. М., & Ожго, С. В. (2019). Державна екологічна політика України та правовий механізм її формування і реалізації. *Економіка, управління та адміністрування*, 3(89), 191-200. doi.org/10.26642/ema-2019-3(89)-191-200.
- Чумаченко, С. М. (2004). Порівняльний аналіз методів екологічної оцінки та особливості їх застосування для оцінки впливу бойової підготовки на екосистеми військових полігонів. *Збірник наукових праць*, 4(29), 144-157. К.: ЦНДІ МО України.
- Чумаченко, С. М. (2006). Методи ідентифікації складу та структури факторів потоку воєнно-техногенного навантаження. *Збірник наук. праць Харків. ун-ту Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба*, 3(9), 59-163.
- Шпак, В. І., & Табачніков, С. І. (2020). *Національна безпека України у викликах новітньої історії*. (Монографія). К. : ДП «Експрес-об’ява».

РОЗДІЛ 2

**ІННОВАЦІЙНІ ПРИРОДООХОРОННІ ТЕХНОЛОГІЇ.
ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛІВ, ВОДИ ТА ЕНЕРГІЇ.
ЕКОІНОВАЦІЇ В АРХІТЕКТУРІ**

МАКУЛАТУРА – АЛЬТЕРНАТИВНЕ ДЖЕРЕЛО ЦІННИХ МАТЕРІАЛІВ ТА РЕЧОВИН

Павлюк О.В., Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В.П. Кухаря НАН України, к.х.н., мол. наук. співроб. відділу органічного та нафтохімічного синтезу, Україна

Баран М.М., Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В.П. Кухаря НАН України, аспірантка відділу органічного та нафтохімічного синтезу, Україна

Каменських Д.С., Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В.П. Кухаря НАН України, к.х.н., старш. наук. співроб. відділу органічного та нафтохімічного синтезу, Україна

Ткаченко Т.В., Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В.П. Кухаря НАН України, к.х.н., старш. наук. співроб. відділу органічного та нафтохімічного синтезу, Україна

Євдокименко В.О., Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В.П. Кухаря НАН України, к.х.н., завідувач відділу органічного та нафтохімічного синтезу, Україна

Abstract

An effective method of processing one of the anthropogenic wastes – waste paper – into valuable substances and materials is proposed in this paper. The thermolysis of waste paper was studied in a laboratory installation at a temperature of 400-500 °C and atmospheric pressure. According to the obtained laboratory results, a technological scheme of an industrial plant for the thermolysis of waste paper is proposed. As a result, gaseous, liquid and solid substances are formed. It has been established that the yield of liquid products increases with increasing temperature. It is shown that the maximum content of organic substances is 35 % (wt.) at a thermolysis temperature of 500 °C. By fractional distillation of pyrocondensate, it was found that the gasoline fraction is 45 % and its octane number according to the

research method is 82. It was analyzed that the main components of the gas phase are carbon oxides. It was found that the solid residue consists of a small amount (up to 16 % (wt.)) of inorganic components and carbonaceous material. The physicochemical characteristics of the latter were investigated by the following methods: FTIR-ATR, thermogravimetric analysis (TGA), and scanning calorimetry (DSC).

Вступ

Целюлозно-паперові відходи становлять близько 30 % від всіх твердих антропогенних відходів (Paper and Pulp Waste Basics, 2014). Їх можна поділити на відходи целюлозно-паперової промисловості (Furszyfer Del Rio et al., 2022) та макулатуру (Іщенко, 2017). Саме утилізація останніх відходів до сих пір стоїть досить гостро, оскільки вони потрапляють до твердих побутових відходів (ТПВ), більше 90 % яких звозиться на сміттєзвалища та полігони (Шилович, 2018). У подальшому найчастіше їх захоронюють. У той же час, така технологія потребує виведення з обігу значних територій землі, які досить тривалий час не можуть бути використані і будуть забруднені. Тому, останнім часом, набули тенденції сортування ТПВ з подальшою їх утилізацією (Шилович, 2018). Згідно з (Ouadi, Fivga, Jahangiri, Saghi & Hornung, 2019) за рахунок термоконвесії (спалювання, піроліз, газифікація) макулатури можна одночасно досягнути двох цілей – енергетичної та раціонального поводження з відходами. Проте, під час термолізу необхідно враховувати, що макулатура окрім целюлозно-паперових відходів містить і інші домішки (поліетилен, поліпропілен, полістирол, поліетилентерефталат (ПЕТ), фторопласти, полівінілхлорид, поліамід, текстиль та інші речовини) (Іщенко, 2017). Таким чином, метою нашої роботи було пошук ефективного способу утилізації макулатури у максимально можливу кількість цінних речовин та матеріалів з мінімальною кількістю утворених відходів.

Методи та матеріали

Вихідну макулатуру (суміш паперу, скотч стрічки, поліетилену) (фракція 2-8 мм) з вологістю – 31,1 % (мас.), зольністю – 3,5 % (мас. а.с.р.) (табл. 1) перед завантаженням спресовували, для збільшення завантаження у реактор (рис. 1). Насипна густина вихідної сировини 0,070-0,075 г/см³; щільно упакованої – 0,145-0,155 г/см³; після пресування під тиском 6,25 кгс/см² – 0,750-0,760 г/см³. Для зменшення енергозатрат на процес термолізу відходи сушили до повітряно-сухого стану (вологість 6,1 % (мас. а.с.р.)).

Таблиця 1

Склад зольного залишку макулатури

Формула	Вміст, % (мас.)
Al ₂ O ₃	10,945
CaO	57,374
Cl	4,071
Fe ₂ O ₃	3,211
MnO ₂	0,094
SO ₂	2,001
SiO ₂	15,478
TiO ₂	6,533
ZnO	0,253



Рис. 1. Пресована макулатура

Досліджено можливість утилізації макулатури методом термолізу (400-500 °С, 0,1 МПа) на дослідній установці з індукційним нагрівом реактора виробництва німецької фірми Linn High Them (рис. 2).



Рис. 2. Дослідна установка піролізу виробництва німецької фірми Linn High Them

Установка складається з реакторного блоку (рис. 2а), індукційного блоку (рис. 2б), блоку керування (рис. 2в), блоку очищення газів (рис. 2г) та системою охолодження індуктору. Реакторний блок (рис. 2а) містить циліндричний реактор піролізу, дозуючий бункеру, сепаратор для розділення газу та рідких вуглеводнів, які виготовлені з нержавіючої сталі марки 08X17T (корозійно-жаростійка аналог AISI 304), які розміщені на рамі установки. Для зниження тепловтрат реактор футерований алюмокремнієвим волокном та вставлений в кварцовий циліндр. Вимірювання температури та керування процесу забезпечувалося за рахунок інформативних термодатчиків під'єднаних до блоку керування (рис. 2в). Індукційний блок (рис. 2б) забезпечує швидкий, рівномірний нагрів та підтримує задану температуру реактора з високою точністю ($\pm 0,5$ °C) в діапазоні від 400 °C до 1 000 °C.

Реакторний блок містить: шнековий дозатор з кроковим двигуном та ємністю для сировини об'ємом 1,5 дм³ (рис. 3), власне реактор з зовнішнім діаметром 76 мм та товщиною стінки 3 мм та висотою 600 мм. Сепаратор для розділення газу та піролізної рідини, з зовнішнім діаметром 110 мм з товщиною стінки 3 мм та висотою 330 мм.

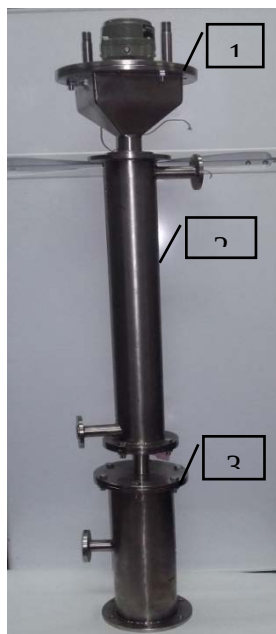


Рис. 3. Елементи реакторного блоку: 1 – шнековий дозатор, 2 – реактор, 3 – сепаратор

Реакційний блок в зібраному стані наведено на рисунку 4. Він закривається захисною сіткою, до якої підключаються комунікації подачі сировини і відводу продуктів реакції – генерованих газів, рідкої фракції та карбонізованого залишку, а також відповідні вузли керування технологічним процесом.



Рис. 4. Реакторний блок змонтований на установці

Принципову схему установки наведено на рисунку 5, яка включає низку елементів таких як: дозуючий бункер сировини (1), реактор піролізу (2),

сепаратор розділення утворених газів та зольного залишку (3), систему очищення газів (4), бункер приймання вуглецевого залишку (5), лінії подачі в реакційну зону повітря чи азоту (6), нагрівальний елемент реактора – індуктор (7), автоматизована система управління установкою (8), система охолодження індуктора (9).

Рис. 5. Принципова схема установки

В бункер дозуючого пристрою (рис. 3 (1)), який розміщений над реактором (рис. 3 (2)) завантажували сировину кількістю 1 дм³, після чого його герметизували і підключали магістраль лінії подачі повітря чи азоту. Залежно від поставленої мети експерименту в реакційну зону подавали повітря для

одержання генераторного газу, а також повного окислення вуглеводневої складової і отримання в золі лише самих оксидів. За умови подачі азоту в реакційну зону, створювалися умови неповного окислення, а власне коксування сировини, при цьому утворюються горючі гази та зольний залишок з високоактивним карбоном – дана фракція є вихідною сировиною для низки процесів. Температуру нагріву реактора індукційними струмами задавали виходячи із умов експерименту, а саме в діапазоні 400-1000°C. Зміна потужності індуктора дозволяє регулювати інтенсивність нагріву реактора, тобто враховується температурний фактор, а регулювання подачі сировини дозуючим пристроєм дозволяє регулювати кількість переробленої сировини за одиницю часу. Після проходження сировиною зони терморозкладу вона попадає на розділення в сепаратор де гази відділяються та спрямовуються на очищення, а рідка фракція в свою чергу збирається знизу сепаратора з наступним відбором. Карбонізований твердий залишок чи зола (якщо проводиться процес газифікації) накопичується бункері з періодичним вивантаженням. Для контролю складу утворюваного газу, через певний проміжок часу, здійснюється відбір проб на газохроматографічний аналіз. По завершенню процесу проводиться розрахунки матеріального балансу. Матеріальний баланс процесу (М) визначали за наступним рівнянням:

$$M = w_{г.ф} + w_{р.ф} + w_{в.ф},$$

де $w_{г.ф}$ – масова частка газової фракції у продуктах реакції, $w_{р.ф}$ – масова частка рідкої фракції у продуктах реакції, $w_{в.ф}$ – масова частка вуглецевого залишку.

Вологість вихідної сировини визначали на вагах вологоаналізаторах AXIS ADGS 50 (AXIS, Польща). Неорганічні компоненти визначали методом XRF на приладі Expert 3L XRF (INAM, Україна). Якісний та кількісний склад утворених газів та рідких продуктів визначався методом газової хроматографії. Газохроматографічний аналіз неорганічних газів (H₂, CO, CO₂) та метану здійснювали на хроматографі “Хром-5” (Чехія) з катарометром. Для аналізу

легких газів використано колонку з нержавіючої сталі довжиною 1,5 м та внутрішнім діаметром 3 мм, заповнену сорбентом: активоване вугілля марки СКТ фракцією 0,25–0,50 мм, просочене 10 %-ним розчином NiSO_4 . Газ-носії – аргон, витрати якого становили 20 мл/хв. Температура термостату колонок і детектора – 100 °С, температура випаровувача – 120 °С, сила струму детектору – 40 мА. Об’єм проби становив 0,25 мл. Аналіз органічних продуктів реакції здійснювався на хроматографі “Agilent Technologies 7890A” (США) з полум’яно-іонізаційним детектором з використанням кварцової капілярної колонки DB-624 UI довжиною 60 м і внутрішнім діаметром 0,32 мм у комбінованому температурному режимі (ізотермічний – 10 хвилин при 40 °С, далі програмування температури від 40 до 250 °С зі швидкістю 5 град/хв. Проби вводились в колонку мікрошприцем місткістю 1,0 мкл. Фракційний склад отриманих вуглеводнів з процесу терморозкладу відходів визначали за ГОСТ 2177. Октанове число бензинової фракції визначали октанометром «ОК-2М» (Україна). Інфрачервоний спектральний аналіз Фур’є із перетворенням (FTIR-ATR) зразків у діапазоні 4000–400 cm^{-1} проводили за допомогою спектрофотометра марки IRAffinity-1S FTIR (Shimadzu, Japan) оснащеного Quest ATR Diamond GS-10800X (Specac, UK) у режимі не повного відбивання. Термогравіметричний аналіз разом зі скануючою калориметрією виконували на приладі PT1600 TG-DTA/DSC (STA Simultaneous Thermal Analysis, LINSEIS Messgeräte GmbH, Німеччина). Досліджувані зразки нагрівали від кімнатної температури до 1000 °С зі швидкістю 5 °С/хв. Вага зразків дорівнювала $10,5 \pm 0,1$ мг. Дослідження здійснювали при одночасному нагріванні двох калориметричних комірок (робочої та порівняльної) в постійному потоці повітря, швидкість якого становила 40 мл/хв. Як еталонні об’єкти використовували зразки чистого алюмінію. Порошки алюмінію та досліджуваних проб компактували у порошкоподібному вигляді й розміщували в платинових тиглях, кожен з яких був встановлений, відповідно, в робочій та порівняльній комірці калориметричного блоку. Для охоплення обраного температурного інтервалу досліджень прилад калібрували за еталонними

речовинами та проводили вимірювання й обробку результатів. Досліджуваний зразок подрібнювали, ретельно перемішували його компоненти та розміщали у робочий, попередньо зважений, тигель. Цей тигель зі зразком встановлювали на стрижень робочої термопари, що з'єднана з аналітичними вагами приладу, після чого починали підйом температури. Всі дослідження виконували тричі.

Результати та обговорення

У результаті проведення термолізу макулатури одержано суміш газів, рідку фракцію та вуглецевий залишок. Залежно від умов утилізації відходів їх співвідношення змінювалося. Температурна залежність розподілу продуктів після термолізу макулатури наведено на рис. 6. Як видно з наведеної залежності з підвищенням температури процесу зростає вміст рідкої фракції у продуктах реакції. Це можна пояснити тим, що з підвищенням температури йде більш глибока конверсія макулатури саме у рідкі компоненти за рахунок вуглеводневих сполук (рис. 7). Про посилення глибини конверсії відходів свідчить подальше зменшення вуглецевого залишку після реакції з підвищенням температури (рис. 6). Це згідно з літературними даними (Shen & Gu, 2009; Changjun, Huamin, Ayman, Junming, Yong, 2014) можна пояснити поглибленою конверсією целюлози та її компонентів до левоглюказану (LG), гідроксиацетатальдегіду (НАА), гідроксиацетону (НА), піровіноградного альдегіду (РА), гліцеральдегіду (GA), 5-гідроксиметилфурфуролу (5-HMF) і фурфуролу (FF) за шляхами наведеними на рис. 8-10. Згідно з Liao, 2003 у рідких продуктах можуть бути присутні навіть фенольні та бензольні похідні. Більшість з цих речовин можуть бути використані або як компоненти моторних палив, або прекурсори для їх отримання (Oasmaa & Meier, 2005; Oasmaa, Peacocke, Gust, Meier, McLellan, 2005; Oasmaa & Peacocke, 2018; Binder & Raines, 2009). Зі зростанням температури глибина перетворень за наведеними схемами реакцій (рис. 8-10) зростатиме (Luo, Wang, Liao, Cen, 2004). Проте конверсія у рідкі продукти йде більш стрімко, ніж у газоподібні (Luo et al., 2004). Оскільки ми проводимо

термоліз вологої оксигеномісної сировини, то у рідких продуктах обов'язково буде присутня вода, що ми і спостерігали у результаті реакції. Саме вона і є основною неорганічною складовою рідкої фракції.

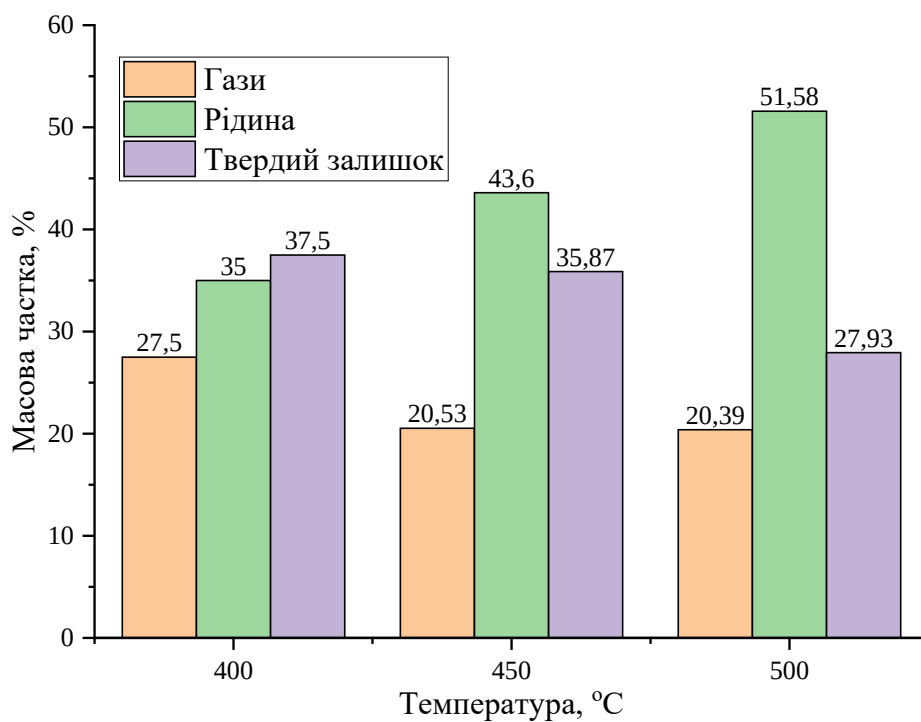


Рис. 6. Розподіл продуктів термолізу від температури

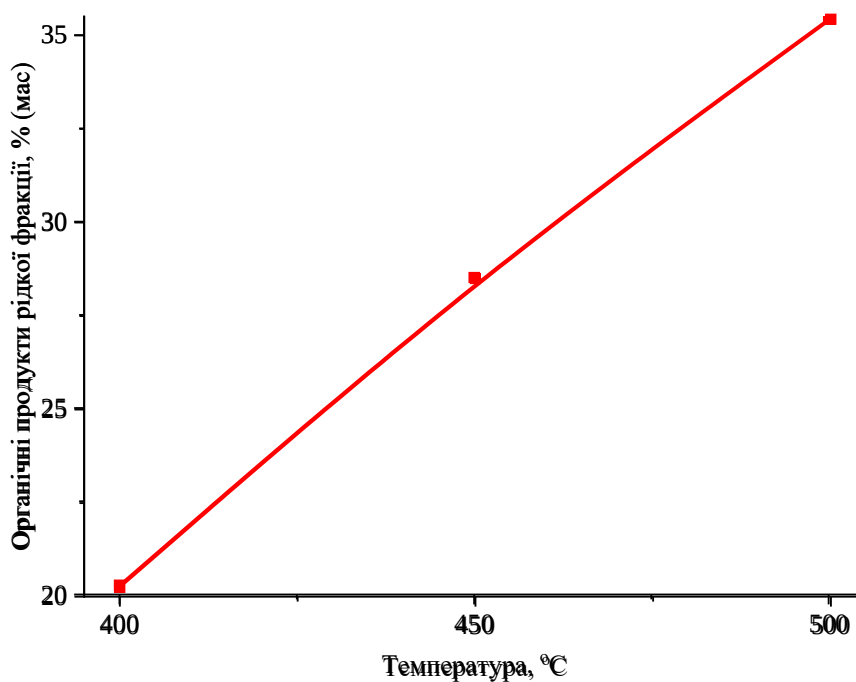


Рис. 7. Зміна органічних продуктів термолізу від температури

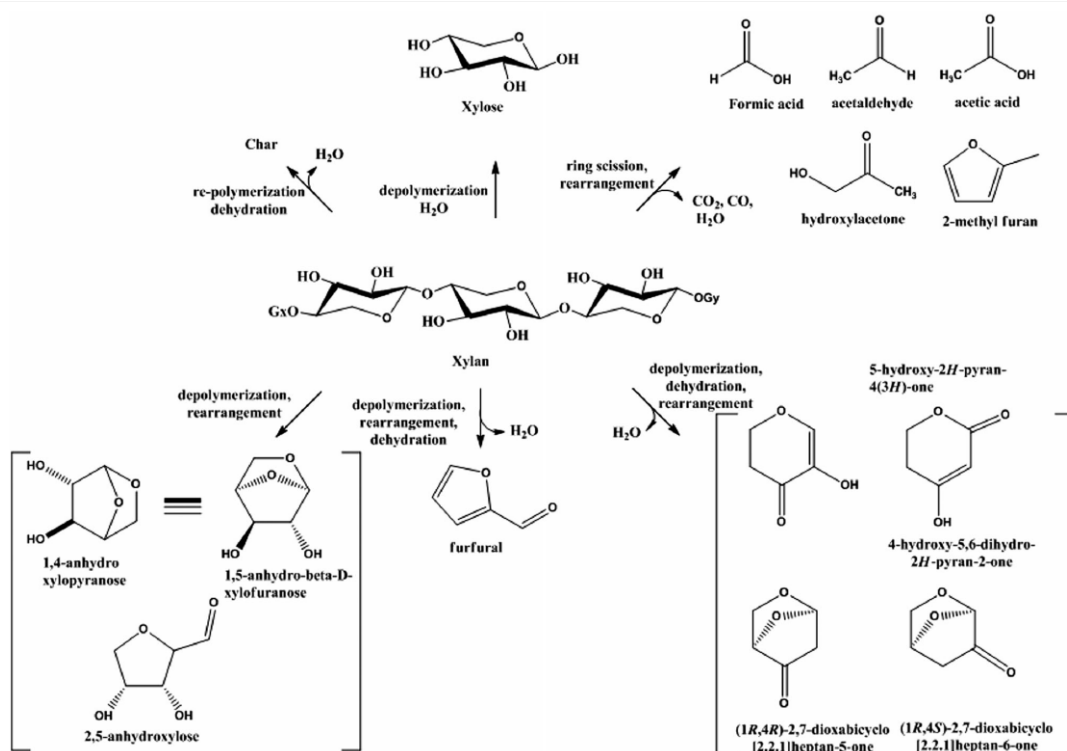


Рис. 10. Можливі хімічні шляхи піролізу геміцелюлоз (Changjun et al., 2014)

Проведено фракційну розгонку безводних рідких продуктів термічної деструкції при 450 °С макулатури до температури 360 °С (табл. 2). Фракційний склад піроконденсату визначено за ГОСТ 2177. Встановлено, що початкова температура перегонки становить 57 °С, а вміст бензинової фракції 45 % (температура кипіння 57-200 °С), в свою отримано майже 40-45 % дизельного компоненту (200-360 °С) і мазутний залишок – 10 %. Встановлено що бензинова фракція має ОЧ за дослідницьким методом – 82, що свідчить про можливість її використання як компонента моторних палив.

Встановлено склад отриманих газів термічного розкладу макулатури при 450 °С методом газової хроматографії (табл. 3). Як видно з наведених у табл. 3 даних основними газами, що утворилися при термолізі є оксиди вуглецю (майже 50 % (мас.)), що узгоджується з вище наведеними механізмами конверсії целюлози та її похідних (рис. 7-10). Оксиди вуглецю у подальшому при додаванні до неї водню можна використати для отримання у реакції гідрування (Баран, Каменських, Ткаченко та Євдокименко, 2022). Крім того, у макулатурі обов'язково присутні скотч стрічка і поліетилен. Основними

складовими яких є вуглеводні. При термічній деструкції останніх можуть відбуватися наступні перетворення (Yong-Seong; Ki-Bum; Joo-Sik, 2020):

термічний і каталітичний крекінг
$$C^nH^m \rightleftharpoons C + C^xH^y + H_2;$$

реакція водяного газу
$$C^nH^m + nH_2O \rightleftharpoons nCO + (n + m/2)H_2;$$

сухий риформінг
$$C^nH^m + nCO_2 \rightleftharpoons 2nCO + (m/2)H_2.$$

Таблиця 2

Фракційний склад отриманої рідкої фракції визначено за ГОСТ 2177

Фракційний склад	Результат аналізу
температура початку перегонки, °C	57±1
10 % переганяється за температури, °C	110
20 % переганяється за температури, °C	134
30 % переганяється за температури, °C	159
40 % переганяється за температури, °C	184
50 % переганяється за температури, °C	213
60 % переганяється за температури, °C	253
70 % переганяється за температури, °C	286
80 % переганяється за температури, °C	330
*87 % переганяється за температури, °C	365
залишок у колбі, (мазут) %	10
втрати, %	3

Саме перебіг реакції за механізмом термокрекінгу і пояснює наявність вуглеводнів C₁-C₅.

Ще одним доказом глибини деструкції макулатури при підвищенні температури є збільшення вмісту неорганічної складової у твердому залишку з одночасним зменшенням його загальної маси (табл. 4), що також узгоджується з відомими літературними даними (Luo et al., 2004). У той же час, склад неорганічного залишку майже не змінюється не залежно від температури термолізу (табл. 5) порівняно з вихідною сировиною (табл. 1).

Таблиця 3

Склад газів при термолізі макулатури при 450 °С

Склад газової фази	Вміст газів, % (мас.)
H ₂	1,598
N ₂ (Повітря)	15,57
CO	15,509
CO ₂	31,005
CH ₄	10,932
C ₂	6,963
C ₃	7,834
C ₄	6,414
C ₅	2,505
Неідентифіковані	1,67

Таблиця 4

Склад твердого залишку макулатури до та після термолізу залежно від температури процесу

Складові твердого залишку	Вміст, % (мас.)			
	вихідний зразок	термоліз при 400 °С	термоліз при 450 °С	термоліз при 500 °С
Органічні	96,53	88,05	87,43	84,52
Неорганічні	3,47	11,95	12,57	15,48

Таблиця 5

Склад неорганічного залишку макулатури після термолізу при різних температурах

Формула	Вміст, % (мас.)		
	термоліз при 400 °С	термоліз при 450 °С	термоліз при 500 °С
1	2	3	4
Al ₂ O ₃	10,490	11,809	10,655
CaO	56,399	57,659	58,065
Cl	3,525	2,349	6,340

Продовження таблиці 5

1	2	3	4
Fe ₂ O ₃	3,997	3,116	2,520
MnO ₂	0,106	0,094	0,081
SO ₂	2,126	1,882	1,995
SiO ₂	16,262	16,197	13,975
TiO ₂	6,828	6,655	6,117
ZnO	0,267	0,240	0,253

Аналіз спектрів FTIR-ATR твердих залишків утворених при термолізі макулатури за різних температур (рис. 11) показують, що вони належать до вуглецевих матеріалів. Поверхня зразків є гідрофобною: наявні характеристичні смуги пропускання при 3030 см⁻¹, зумовлені валентними коливаннями СН-зв'язків в аліфатичних ланцюгах (рис. 11, табл. 6), а також смуги пропускання деформаційних коливань С=С ароматичного кільця (1048 см⁻¹). В ІЧ-спектрах чітко виокремлюється смуга поглинання при 1650-1700 см⁻¹, що відноситься до С=О груп в ароматичних карбонових кислотах (Одинцова, 2010) і лактонах та карбоксильних ангідридах, а при 1550-1600 см⁻¹, що відноситься до С=О зв'язку у хінонних і цетенольних групах (Figueiredo, Pereira, Freitas & Orfao, 1999). Широка смуга з центром піка при 1580-1590 см⁻¹ відноситься до валентних коливань С–О в ефірах, лактонах, фенолах і карбоксильних ангідридах (рис. 11, табл. 6). Смуга поглинання в області 3385 см⁻¹ відповідає валентним коливанням –ОН груп.

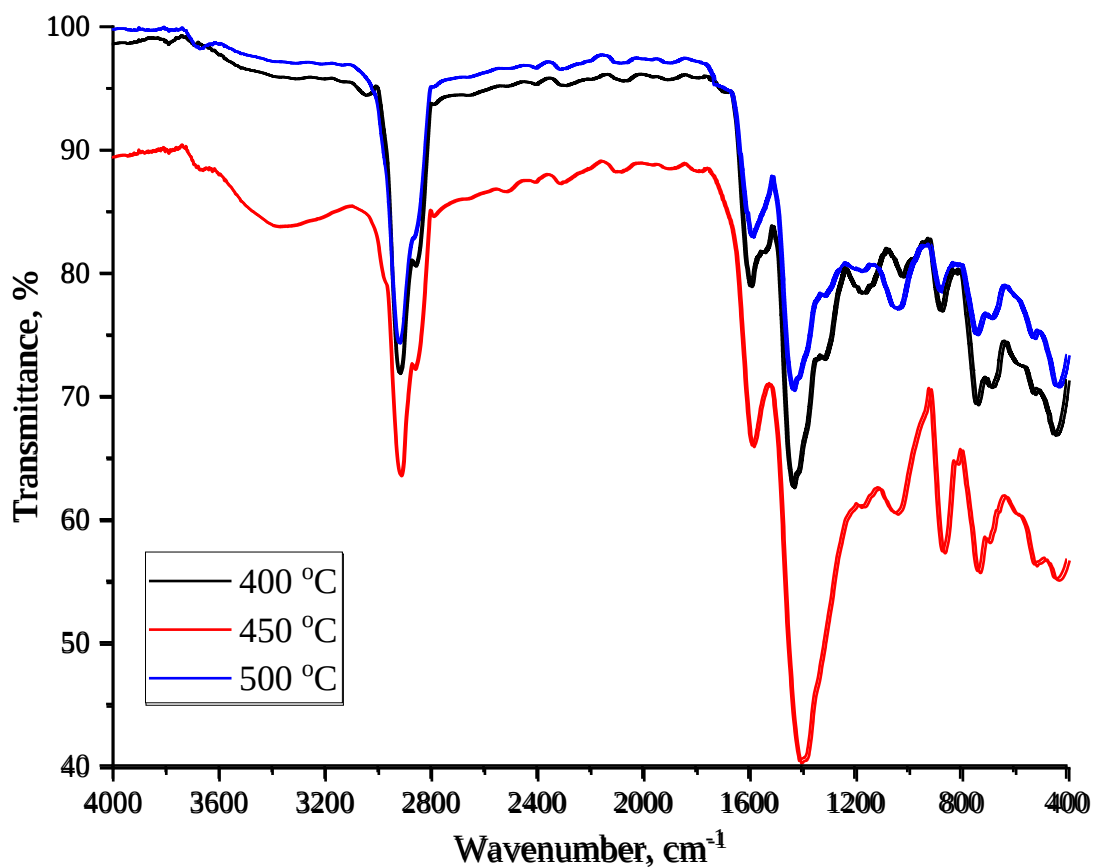


Рис. 11. FTIR-ATR твердого вуглецевого залишку

Таблиця 6

ІЧ величини функціональних груп на вуглецевій поверхні (Shen, Li & Liu, 2008; Blanco Lopez, Martínez-Alonso & Tascon, 2000; Quan et al., 2004; Fanning & Vannice, 1993; Tomaszewski, Gunko, Skubiszewska-Zieba & Leboda, 2003)

Спектральна інформація	Діапазон, cm^{-1}
1	2
С-О в ефірах (розтягнення)	1000-1300
Спирти	1049-1276, 3200-3640
Фенольні групи	
С-ОН (розтягнення)	1000-1220
О-Н	1160-1200, 2500-3620
Карбонати, карбоксил-карбонати	1100-1500, 1590-1600
-С-С ароматичні (розтягнення)	1585-1600
Хінони	1550-1680
Карбонові кислоти	1120-1200, 1665-1760, 2500-3300

Продовження таблиці 6

1	2
Лактони	1160-1370, 1740-1880
C-H (розтягнення)	2600-3000
N-H, C=N	1560-1570
Циклічні амід	646, 1461, 1546, 1685
C-N ароматичне кільце	1000, 1250, 1355
C-N	1190
C=C=N	2070-2040
N-O-	1300-1000

TGA, DTG і DSC криві наведені на рис. 12, 13 для зразків твердих залишків утворених при термолізі макулатури за різних температур, відповідно мають типовий вуглецевий характер (Cuhadaroglu & Uygun, 2008). Так до 100 °C відбувається втрата сорбованої води з поверхні всіх носіїв, що найбільш чітко відображено на диференційованих термогравіметричних кривих (DTG). Незначна величина піку свідчить, що перед дослідженням зразки були попередньо просушені від води (рис. 13). Спільним для всіх вуглецевих матеріалів є термічна стабільність до 250 °C. Максимальна втрата маси становить від 0,1 % для матеріалу отриманого при 450 °C до 5 % при 400 °C (рис. 12), що є настільки мізерною, що нею можна знехтувати. Згідно з термограмами розклад поверхневих функціональних груп відбувається безперервно з екзотермічним ефектом (рис. 13) в інтервалі температур 300-500 °C. У цьому температурному діапазоні проходить основна втрата маси зразків 88 % для матеріалу отриманого при 400 °C, 85,6 % при 450 °C та 80,3 % при 500 °C. При подальшому підвищенні температури до 1000 °C спостерігається вирівнювання залишкової маси на рівні 11,2 % для матеріалу отриманого при 400 °C, 12,4 % при 450 °C та 16,1 % при 500 °C, що близькі до значень наведених у табл. 4. Таким чином, утворений тверди залишок з підтвердженою вуглецевою структурою у подальшому може бути

використаний як сировина для синтезу таких матеріалів як карбід та нітрид кремнію (Tkachenko et al., 2020).

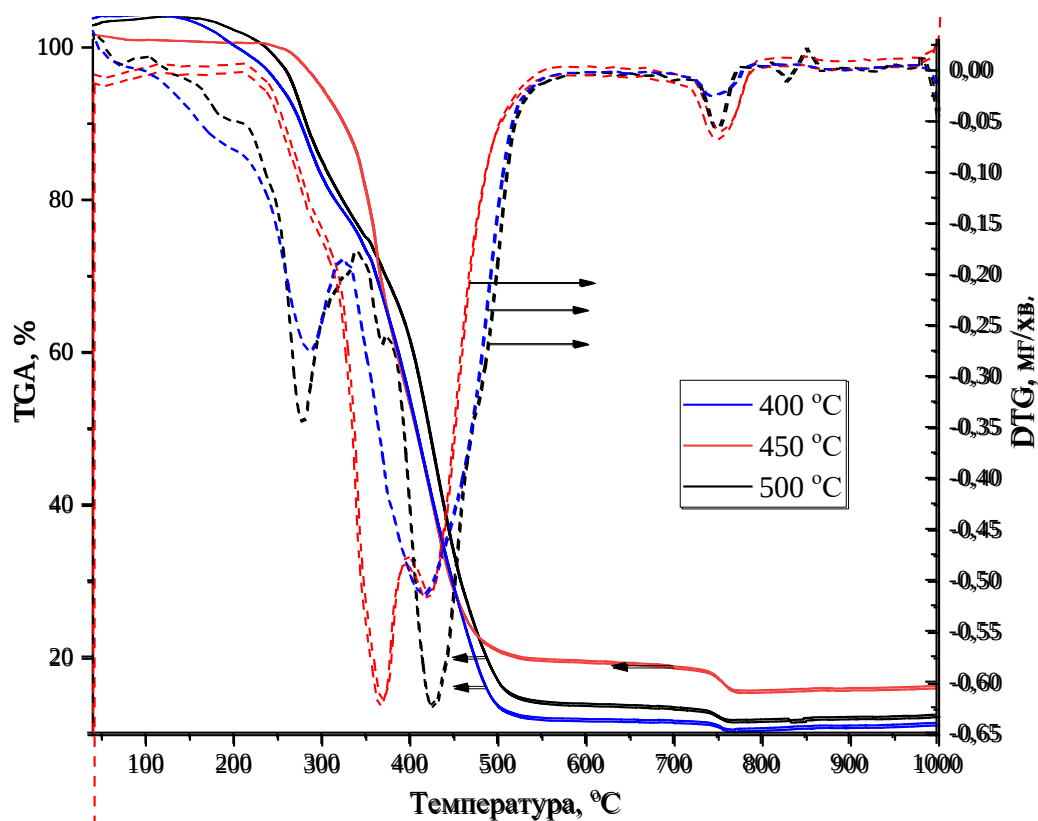


Рис. 12. TGA, DTG (пунктиром) криві твердого вуглецевого залишку

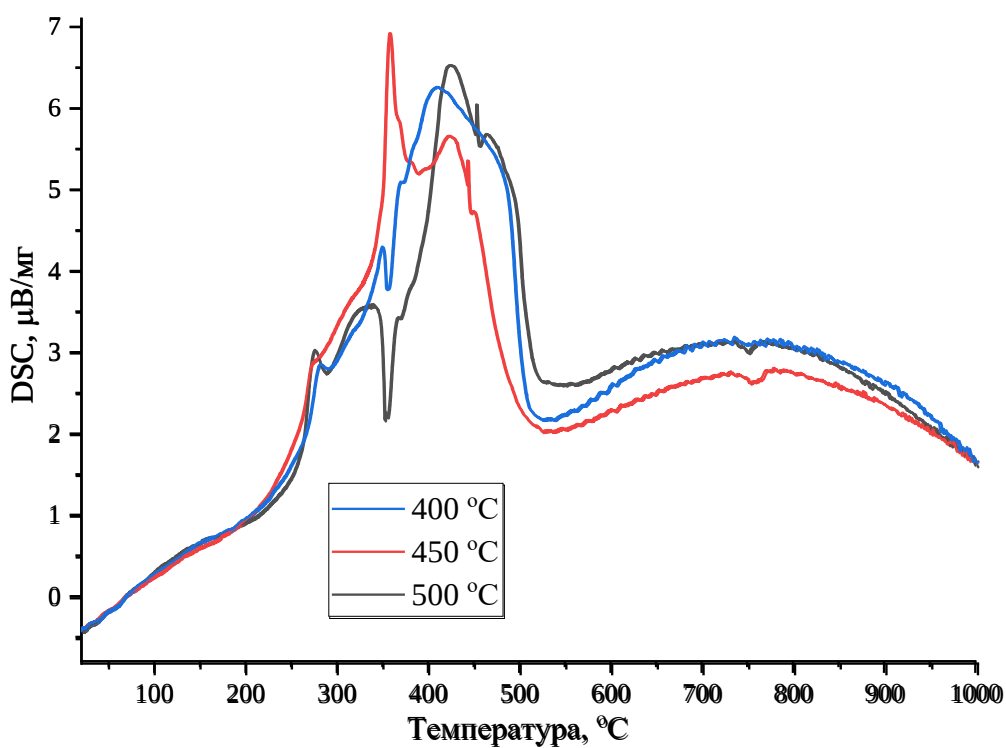


Рис. 13. DSC криві твердого вуглецевого залишку

На основі аналізу одержаних даних лабораторних досліджень термолізу макулатури нами запропонована технологічна схема промислової установки безперервної дії (рис. 14). Після попередньої підготовки вихідної сировини, а саме подрібнення до необхідної фракції, проводиться таблетування зі зволожуючим агентом. Підсушування отриманої фракції здійснюється в стрічковій сушарці за рахунок утилізації енергії димових газів. Предпідготовані відходи подаються в бункер і через шлюзовий живильник дозуються до реактора піролізу. Утворений твердий вуглецевий залишок з реактора безперервно вивантажується через шлюзовий затвор в ємність з водою, який за допомогою шнекового вивантажувача спрямовується на зневоднення в геоконтейнери (Kashkovsky, Yevdokymenko, Kamenskyh & Yevdokymenko, 2014). Парова фаза з реактора надходить в холодильник, після чого відбувається розділення на газову та рідку фракції. Газ після очищення спрямовується до споживача, а рідка фракція на подальше розділення та застосування. Для забезпечення стабільності конверсії сировини в енергетичні продукти, передбачено введення дозатором дешевих не відновлюваних каталізаторів на основі одно-, двовалентних металів, у тому числі, для зв'язування оксиду сірки – оксиду кальцію. Відомо (Печура, Капкин та Песин, 1986), що багато речовин прискорюють взаємодію вуглецю з газифікуючими агентами. Особливо ефективні сполуки, що містять лужні метали – хлориди і карбонати натрію або калію. Оксиди кальцію, заліза, магнію, цинку також суттєво прискорюють процес. Вказані дешеві каталізатори – карбонати лужних і лужноземельних металів дозволяють знизити оптимальну температуру і тиск газифікації вуглецю. Наявність у продуктах конверсії водяного пару, діоксиду вуглецю, при введенні вказаних каталізаторів дозволяє у робочому діапазоні температур також зменшити коксовий залишок за рахунок його газифікації. Що в свою чергу збагатить несконденсовані гази воднем і оксидом вуглецю.

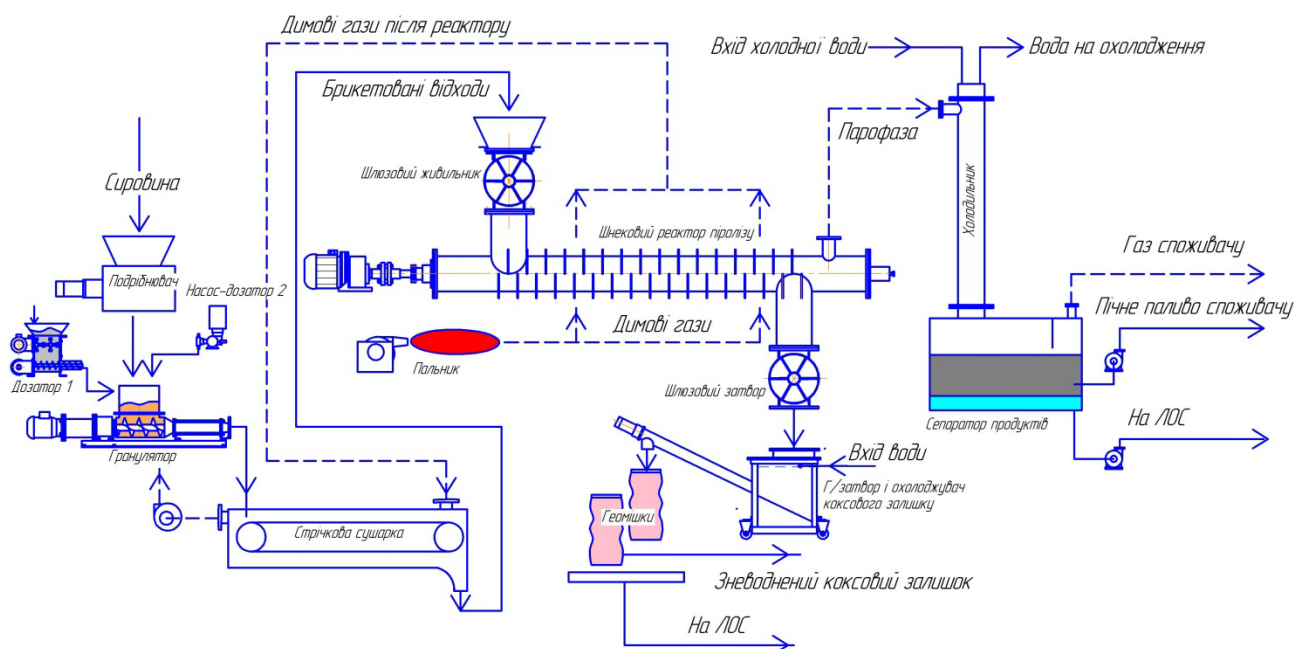


Рис. 14. Технологічна схема піролізної установки

На запропонованій установці (рис. 14) можна проводити термоліз не лише макулатури, але і ТПВ з яких попередньо вилучені метал, скло і кераміка; зневоднені надлишкові мули міських каналізаційних очисних споруд; подрібнені лігноцелюлозні відходи з розміром тріски 5 мм і менше; торф; буре вугілля. Вище згадана сировина може бути подана в установку як окремо, так і у суміші.

Висновки

У роботі досліджено термоліз макулатури на лабораторній установці при температурі 400-500 °С та атмосферному тиску. З'ясовано, що при температурі 500 °С більше 50 % макулатури конвертується у рідкі продукти. Встановлено, що вміст безводних органічних речовин становить від 20 до 35 % залежно від температури процесу, з них можна отримати бензинової фракції 45 %, дизельної 45 %, мазуту 10 %. Виявлено, що основними компонентами серед утворених газів є оксиди вуглецю, які в подальшому можуть бути використані у реакції гідрування. Методами FTIR-ATR та термогравіметричного аналізу (TGA) разом зі скануючою калориметрією (DSC) підтверджено вуглецеву

структуру твердого залишу продуктів термолізу макулатури. Запропоновано технологічну схему термоконверсії антропогенних відходів.

Список літератури

- Binder, J. B., & Raines, R. T. (2009). Simple chemical transformation of lignocellulosic biomass into furans for fuels and chemicals. *J. Am. Chem. Soc.*, 131, 1979-1985. doi:10.1021/ja808537j
- Blanco Lopez, M. C., Martínez-Alonso, A., & Tascon, J. M. D. (2000). Microporous Texture of activated carbon fibres prepared from nomex aramid fibres. *Micropor Mesopor Mater*, 34, 171-179. doi:10.1016/S1387-1811(99)00171-7
- Cuhadaroglu, D., & Uygun, O. A. (2008). Production and characterization of activated carbon from a bituminous coal by chemical activation. *African Journal of Biotechnology*, 7(20), 3703-3710. doi: 10.5897/AJB08.588
- Fanning, P. E., & Vannice, M. A. (1993). A DRIFTS study of the formation of surface groups on carbon by oxidation. *Carbon*, 31, 721-730. doi:10.1016/0008-6223(93)90009-Y
- Figueiredo, J. L., Pereira, M. F. R., Freitas, M. M. A., & Orfao, J. J. M. (1999). Modification of the surface chemistry of activated carbons. *Carbon*, 37, 1379-1389. doi:10.1016/S0008-6223(98)00333-9
- Furszyfer Del Rio, D. D., Sovacool, B. K., Griffiths, S., Bazilian, M., Kim, J., Foley, A. M., & Rooney, D. (2022). Decarbonizing the pulp and paper industry: A critical and systematic review of sociotechnical developments and policy options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112706. doi:10.1016/j.rser.2022.112706
- Jeong Yong-Seong, Park Ki-Bum, & Kim Joo-Sik. (2020). Hydrogen production from steam gasification of polyethylene using a two-stage gasifier and active carbon. *Applied Energ*, 262, 114495. doi:10.1016/j.apenergy.2020.114495

- Kashkovsky, V. I., Yevdokymenko, V. O., Kamenskyh, D. S., & Yevdokymenko, A. N. (2014). Method of Sewage Sludge Dewatering with the Use of GEOTUBE Technology Elements at the Bortnichy Aeration Station. *Sci. Innov.* 10(1). 30-40. doi:10.15407/scine10.01.030
- Liu Changjun, Wang Huamin, Karim Ayman M., Sun Junming, Wang Yong. (2014). Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Chem. Soc. Rev.* 43(22). 7594-7623. doi:10.1039/c3cs60414d
- Luo, Zh., Wang, Sh., Liao, Y., & Cen, K. (2004). Mechanism study of cellulose rapid pyrolysis. *Ind. Eng. Chem. Res.* 43. 5605-5610. doi:10.1021/ie030774z
- Oasmaa, A., & Meier, D. (2005). Norms and Standards for Fast Pyrolysis Liquids: 1. Round Robin Test. *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 73. 323-334. doi:10.1016/j.jaap.2005.03.003
- Oasmaa, A., & Peacocke, C. (2018). *Properties and fuel use of biomass-derived fast pyrolysis liquids. Technical Report.* doi: 10.13140/RG.2.2.32703.20649
- Oasmaa, A., Peacocke, C., Gust, S., Meier, D., & McLellan, R. (2005). Norms and Standards for Pyrolysis Liquids. End-User Requirements and Specifications. *Energ. Fuel.* 19. 2155-2163. doi:10.1021/ef040094o
- Ouadi, M., Fivga, A., Jahangiri, H., Saghir, M., & Hornung, A. (2019). A review of the valorization of paper industry wastes by thermochemical conversion. *Ind. Eng. Chem. Res.* 58(35). 15914-15929. doi:10.1021/acs.iecr.9b00635
- Paper and Pulp Waste Basics (2014) Retrieved from <https://www.hazardouswasteexperts.com/paper-and-pulp-waste-basics/>
- Quan, X., Liu, X. T., Bo, L. L., Chen, S., Zhao, Y. Z., & Cui, X. Y. (2004). Regeneration of acid orange 7-exhausted granular activated carbons with microwave irradiation. *Water Res.* 38. 4484-4490. doi: 10.1016/j.watres.2004.08.031
- Shen, D. K., Gu, S. (2009). The mechanism for thermal decomposition of cellulose and its main products. *Bioresource Technology.* 100. 6496-6504. doi:10.1016/j.biortech.2009.06.095

- Shen, W., Li, Zh., & Liu, Y. (2008). Surface Chemical Functional Groups Modification of Porous Carbon. *Recent Patents on Chemical Engineering*. 1(1). 27-40. doi:10.2174/2211334710801010027
- Tkachenko, T., Yevdokymenko, V., Kamenskyh, D., Povazhny, V., Filonenko, M., Kremenetskii, V., Vakhryn, V., & Kashkovsky, V. (2020). Influence of SiC production temperature on its physico-chemical characteristics. *Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies*. 18(3). 669-679. doi:10.15407/nnn.18.03.669
- Tomaszewski, W., Gunko, V. M., Skubiszewska-Zieba, J., & Leboda, R. (2003). Structural characteristics of modified activated carbons and adsorption of explosives. *J Colloid Interf Sci*. 266. 388-402. doi:10.1016/S0021-9797(03)00633-7
- Баран, М. М., Каменських, Д. С., Ткаченко, Т. В., & Євдокименко, В. О. (2022). Нові підходи до утилізації CO₂. 7-й Міжнародний Молодіжний Конгрес Сталий Розвиток: Захист Навколишнього Середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. Львів
- Іщенко, В. А. (2017). Утилізація первинних відходів переробки макулатури. XLVI Науково-технічна конференція Вінницького національного технічного університету.
- Одинцова, М. В. (2010) Физико-химические характеристики бифункционального сорбента из скорлупы кедровых орехов. Автореф. Тюмень.
- Печура, Н. С., Капкин, В. Д., & Песин, О. Ю. (1986). *Химия и технология синтетического жидкого топлива и газа*. Москва, Химия.
- Шилович, Т. Б. (2018). Утилізація упакувань. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронний ресурс: Навчальний посібник з навчальної дисципліни. Retrieved from https://cpsm.kpi.ua/Doc/util_pack_posibn.pdf

ІНФОРМАТИВНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ЗРАЗКА ПИВНИХ СТОКІВ МІНІ-ПИВОВАРНІ

Пироженко Є.В., Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", аспірантка кафедри ХТПЕ, Україна

Abstract

The need to develop new effective methods and devices for informative control of physicochemical characteristics that determine the state of alkaline brewery waste water samples has been proven. Thanks to this, it is possible to simultaneously warn of the reasons for the deviation of samples of beer effluents from the specified indicators of environmental safety and to carry out measures that carry out the corresponding correction. Experimental studies have confirmed that thanks to the hardware methods associated with heating the sample in the process of control and compensation of the influence of the parasitic magnetic flux of the thermal non-contact eddy current converter, it becomes possible to control the electrical and temperature parameters of the studied samples by informative eddy current methods. In turn, determining the errors of compatible measurements of the signal components of eddy current converters makes it possible to establish rational modes of operation of converters with samples of weak electrolytic liquids under control.

Вступ

На сьогодні виникає необхідність проведення заходів щодо модернізації виробництв на сучасній технологічній основі за рахунок визначення вимог до стандартів навколишнього середовища і якості продукції (ДСТУ ISO 14001:2015, 2015; Abhinesh Kumar Prajapati & Parmesh Kumar Chaudhari, 2015; Wunderlich & Back, 2010). Високий рівень споживання води під час виробництва пива обумовлює великий обсяг утворення стічних вод, які мають високу ступінь забрудненості і становлять небезпеку для навколишнього середовища, при цьому вибір способу очищення повинен залежати від фізико-хімічних властивостей

стічних вод, а також необхідного ступеня очищення та споживання стічних вод. Слід визначити, що найбільшу небезпеку для навколишнього середовища представляють стічні води, які утворюються при промиванні осадових пивних рідких дріжджів, скиданні в каналізацію табірних опадів і мийці технологічних ємностей, що використовуються на стадіях бродіння і доброджування пива. Зокрема для процесу виробництва пива характерні залпові викиди з коливанням концентрації і кількості стічних вод, тобто існує значна нерівномірність лужного складу, що вимагає обов'язкового застосування усереднювача рН. Під час залпових викидів стічна вода збагачується відпрацьованими миючими та дезінфікуючими розчинами, тому показник рН може значно перевищувати чисельні значення нормативних показників.

Звідси для вибору, розробки, експлуатації та впровадження пристроїв та методів очищення стічних вод продукції пивоваріння (Adhena Ayaliew Werkneh, Hayelom Dargo Beyene & Abduljeleel A. Osunkunle, 2015) виникає необхідність створення нових інформативних методів контролю параметрів зразків стічних вод. На сьогодні відносно прості методи кондуктометрії та потенціометрії застосовують для вимірювань електропровідності λ слабких електролітів, до яких мають відношення у тому числі і харчові продукти: соки, вина, пиво, молоко, напої та зокрема водні розчини солей та кислот, емульсії, лужні розчини, зразки стічних вод промислових виробництв, у тому числі і харчової промисловості (Majewski, 2010; Васілевський & Дідич, 2012). Простота реалізації та дешевина методів кондуктометрії та потенціометрії для визначення питомої електричної провідності λ надає змогу щодо застосування цих методів у якості контрольних при аналізі λ проб напівфабрикатів, готового продукту та зразків пивних стоків. Однак, кондуктометричні та потенціометричні методи мають цілу низку недоліків, а саме чутливі до наявності домішок, особливо домішок кисло-лужного складу, у зв'язку з різкою відмінністю та рухливістю іонів кислотного основного характеру, тобто різницею у рухливості іонів H^+ і OH^- у порівнянні з рухливістю інших іонів, оскільки електропровідність λ величина адитивна, то внаслідок застосування методів кондуктометрії та потенціометрії є можливим

отримувати інформацію тільки щодо загальної концентрації іонів у розчині, тобто вимірювальний контроль питомої електропровідності λ та пов'язаними з нею характеристиками відносної діелектричної проникності ϵ_r , температури t , мінералізації «ТДС» (Total Dissolved Solids), концентрації C та рівня pH – значно ускладнюється. Таким чином, є можливим стверджувати щодо малої селективності кондуктометричного та потенціометричного методів, яка призводить до виникнення значних похибок вимірювань λ та інших фізико-хімічних параметрів багатокомпонентних розчинів. Саме тому, при виборі первинного перетворювача інформативного контролю фізико-хімічних характеристик зразків пивних стоків, необхідно враховувати сумісне визначення кількох сполучених фізико-хімічних величин, які еквівалентно впливають на чутливий елемент перетворювача. Всім цим умовам відповідають електромагнітні (вихорострумові) методи вимірювального контролю, реалізація яких здійснюється на основі вихорострумових перетворювачів трансформаторного типу, котрі на виході дозволяють отримати вимірювальну інформацію, що включає в себе відомості про ЕРС та фазовий кут зсуву трансформаторного вихорострумового перетворювача зі зразком рідини, що контролюється. Отриману вимірювальну інформацію можна обробляти з високою точністю, перетворювати в інші фізичні величини, передавати на відстань та автоматизувати процес вимірювань корелюючих величин у відповідності з командами комп'ютерної системи контролю основних характеристик технологічних процесів очищення стічних вод (Себко & Себко, 1999).

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У загальному, випадку відходи пивоварної галузі сучасної промисловості являють собою залишки сировини рослинного походження, в основному, органічного складу. До вторинних сировинних ресурсів і відходів, які повинні бути видалені або утилізовані, відносяться: забруднені стічні води, що містять миючі та дезінфікуючі препарати, пивна і хмельова дробина, осад суспензій

гарячого сусла (білковий відстій), залишкові пивні дріжджі та ін. Стічні води утворюються також від миття технологічного обладнання, котлів для варіння сусла, бродильних чанів, від розливу пива та охолодження сусла і пива. Як правило, стічні води, які скидаються від міні-пивоварень міста в загальну міську каналізацію мають лужний склад (Sharmin, Mahbuboor, Ahmed, Nawrin & Md. Saifur, 2018; Chang, 2014; Angosto, Fernández-López & Godínez, 2015; Вашкурак, 2017; Максимів, 2007; Ковальчук, Ковальчук & Самелюк, 2010). Емульсії, які виникають в результаті потрапляння пивних стоків у міську каналізацію, а також штучні та відкриті водоймища, несприятливо можуть вплинути на мікроорганізми відкритих водойм. При цьому, для відкритих водоймищ також дуже важливо враховувати так звані теплові забруднення, які супроводжуються зменшенням вмісту кисню в воді, зміною її хімічного та газового складу, цвітінням води і збільшенням вмісту у воді мікроорганізмів, як наслідок теплових забруднень можуть привести до загибелі всієї екосистеми. Таким чином, в результаті антропогенного втручання відбуваються відхилення від норми важливих характеристик середовища, які відповідають нормам реакції мікроорганізмів на ці характеристики.

Таким чином, подальших досліджень потребує проблема моделювання екологічних ситуацій, пов'язаних з процесами урбанізації та руйнуванням природного середовища районів великих міст в яких розміщуються виробництва пивоварної галузі.

Саме тому для виконання моделювання екологічної ситуації та обирання способів очищення, необхідно сумісне визначення питомої електричної провідності λ , відносної діелектричної проникності ϵ_r і температури t та інших корелюючих з електричними та температурними параметрами фізико-хімічних величин, новими інформативними методами. Таким чином, у даній роботі пропонується визначення електричних та температурних параметрів зразків стічних вод трипараметровим вихорострумовим методом. Слід визначити також, що вимірювальний контроль температури має важливе самостійне значення, оскільки збільшення температури на сигналах первинного

перетворювача відображується результатом зростання числа домішок, або кількісного зростання забруднюючих часток у рідині за рахунок зростання електропровідності λ .

У роботах (Себко, Здоренко, Петухова & Минкова, 2015; Себко & Здоренко, 2016) запропоновано контактні електромагнітні методи сумісного вимірювального контролю електричних і температурних параметрів зразків карбонових кислот. Показано, що підвищення точності вимірювань температури зразків відбувається за рахунок розроблених алгоритмів вимірювальних та розрахункових процедур, які містять операції зі складовими компонентів сигналів теплових контактних електромагнітних перетворювачів. Однак слід зазначити, що в цих роботах не наведено шляхи встановлення оптимальних режимів роботи перетворювача зі зразками, що контролюються, не розглянуто безконтактні методи контролю зразків розчинів та слабких електролітів засновані на простих алгоритмах вимірювальних та розрахункових процедур, не розглянуто особливості контролю фізико-хімічних характеристик емульсій та суспензій, які утворюються внаслідок скиду відходів виробництв кислот та лугів, не наведено основні положення теорії похибок багатопараметрових вихорострумових вимірювань компонентів сигналів перетворювачів та фізико-хімічних характеристик об'єктів дослідження. Вочевидь, це пов'язано з тим, що є відсутнім загальний підхід відносно оцінювання похибок сумісних вимірювань електричних, температурних та інших корелюючих з ними фізико-хімічних параметрів зразків немагнітних електролітичних рідинних середовищ під час реалізації інформативних методів вимірювального контролю. Тобто відомі методики визначення систематичних похибок вимірювання функції багатьох змінних, які представляють собою залежності нормованих характеристик перетворювачів від важливих інформативних параметрів контролю зразків слабких електролітів (тобто у даному випадку зразків пивних стоків), потребують подальшого розвитку.

При цьому, до нормованих характеристик первинних теплових вихорострумових перетворювачів відносять ЕРС, фазовий кут зсуву φ , частоту

магнітного поля f , індуктивність L , електричний опір R , потокозчеплення ψ та інші компоненти сигналів вихорострумів перетворювачів, метрологічні характеристики яких, обумовлюють метрологічні характеристики автоматизованої системи контролю та управління технологічними процесами очищення в цілому (Себко та ін., 2015).

Тому є підстави вважати, що питання, які пов'язані з обиранням методу очищення, потребують створення нових багатопараметрових інформативних методів, у свою чергу, недостатня визначеність теоретичних положень роботи вихорострумів пристроїв та обмеження реалізації методів контролю електричних і температурних параметрів зразків слабких електролітів, обумовлюють необхідність проведення відповідних досліджень для досягнення високого ступеню очищення зразків пивних стоків за вказаними вище напрямками.

Ціль та задачі дослідження

Метою статті є дослідження теоретичних положень роботи теплового трансформаторного вихорострумів перетворювача (ТТП), під час здійснення підготовчих етапів екологічного моніторингу зразків стічних вод пивоварного виробництва на основі реалізації безконтактного трипараметрового методу вихорострумів сумісного контролю питомої електричної провідності λ_t , відносної діелектричної проникності ϵ_r та температури t зразка стоків продукції пивоваріння. Слід визначити, що завдяки цьому є можливим одночасно попереджати причини відхилення зразків пивних стоків від заданих показників екологічної безпеки й здійснювати заходи, виконуючі відповідне корегування.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- дослідити можливість застосування теорії роботи трансформаторного теплового вихорострумів перетворювача (ТТП), стосовно реалізації інформативного (для подальшого екологічного моніторингу) трипараметрового метода контролю питомої електричної провідності λ_t відносної діелектричної проникності ϵ_r та температури t зразка пивних стоків міні-пивоварні;

- навести алгоритм моделювання процесу вимірювального контролю питомої електричної провідності λ_t , відносної діелектричної проникності ϵ_r та температури t зразка за допомогою ТТП;
- дослідити теоретичні положення оцінювання похибок сумісних вимірювань параметрів зразка пивних стоків при реалізації теплового вихорострумowego перетворювача для функцій багатьох змінних, які пов'язують компоненти сигналів вихорострумowego перетворювача з температурою t зразка досліджуваної рідини.

Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті

Дослідження проводили з використанням трансформаторного теплового вихорострумowego перетворювача (ТТП) зі зразком стічних вод міні-пивоварні лужного складу. Експериментальні характеристики зразка скляної трубки або пробниці: радіус $a = 12 \cdot 10^{-3}$ м, довжина $l = 0,50$ м. Параметри ТТП були наступні: $f_1 = 82$ МГц, ЕРС теплового ТТП при відсутності зразка $E_0 = 87$ мВ, довжина намагнічувальної обмотки $l_H = 0,30$ м, радіус намагнічувальної обмотки $a_H = 14 \cdot 10^{-3}$ м.

Метод контролю електричних та температурних параметрів зразка стічних вод міні-пивоварні

Нижче досліджено метод та тепловий вихорострумований пристрій для сумісного інформативного контролю питомої електричної провідності λ_t , відносної діелектричної проникності ϵ_r та температури t зразка пивних стоків.

Формула для визначення дійсного значення ЕРС E_0 , тобто ЕРС ТТП при відсутності зразка рідини, має наступний вигляд:

$$E_0 = W_B \cdot a_{\Pi}^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{f \cdot I_H \cdot W_H}{l}, \quad (1)$$

де W_B – число витків вимірювальної обмотки; a_{Π} – радіус вихорострумowego перетворювача; μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

f – частота магнітного поля; I_n – намагнічувальний струм; W_n – число витків намагнічувальної обмотки; l – довжина перетворювача, яка дорівнює довжині скляної пробниці зі зразком рідини.

Далі для розширення меж вимірювань електричних та температурних характеристик зразка рідини, необхідно ввести питомий нормований параметр G_t (питомий нормований потік G_t у зразку), проходження якого, обумовлює виникнення різницевої ЕРС теплового ТТП ΔE_t , при цьому ЕРС ΔE_t , з урахуванням результатів робіт (Себко та ін., 1999, 2015, 2016), знаходять за формулою:

$$\Delta E_t = E_{\Sigma t} - (W_n \cdot a_n^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{f \cdot I_n \cdot W_n}{l}), \quad (2)$$

де $E_{\Sigma t}$ – сумарна ЕРС теплового ТТП (індекс t свідчить, що досліджувана величина є температурозалежною).

Параметр G_t та фазовий кут зсуву $\Delta \varphi_t$ ЕРС теплового ТТП (фазовий кут зсуву поміж ЕРС E_0 та ЕРС ΔE_t), у загальному випадку, визначають за допомогою співвідношень:

$$G_t = \frac{\Delta E_t}{W_n \cdot a_n^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{f \cdot I_n \cdot W_n}{l}}, \quad (3)$$

$$|\operatorname{tg} \varphi| = \frac{a_n^2 \cdot \Delta E_t \cdot \sin \varphi_t}{a^2 \cdot E_0 - \Delta E_t \cdot \cos \varphi_t}, \quad (4)$$

де a_n – радіус пробниці зі зразком, що контролюється.

Слід визначити, що при $a \approx a_n$, формула для визначення комплексного параметра G_t , має наступний вигляд:

$$G_t = \frac{\Delta E_t}{E_0} = \frac{2}{A_t \sqrt{j}} \frac{I_1(A_t \sqrt{j})}{I_0(A_t \sqrt{j})}, \quad (5)$$

де A_t – термозалежний узагальнений параметр; I_1 і I_0 – модифіковані функції Бесселя першого роду, першого та нульового порядків; j – комплексне число.

Далі необхідно навести співвідношення, які пов'язують температуру t з характеристиками G_t і φ_t на фіксованій частоті магнітного поля f .

Знаходимо узагальнений параметр A_t , за залежністю $\Delta \varphi = f(A_t)$ та

визначаємо питому електропровідність λ_t , за формулою:

$$\lambda_t = \frac{A_t^2 \cdot E_0 \cdot G_t}{\mu_0 \cdot a_{\Pi}^2 \cdot \Delta E_t \cdot \pi \cdot f}, \quad (6)$$

Відносну діелектричну проникність ε_r , визначаємо за формулою

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2} \cdot \frac{f \cdot \lambda}{\varepsilon_0 \cdot 10^{-8}}, \quad (7)$$

де ε_0 – електрична стала, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

З урахуванням залежності λ_t від температури t , в діапазоні від 15 до 50°C, маємо формулу для визначення температури зразка рідини, що контролюється:

$$t = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{A_t^2 \cdot E_0 \cdot G_t}{\mu_0 \cdot a_{\Pi}^2 \cdot \Delta E_t \cdot \pi \cdot f \cdot \lambda_1} - 1 \right) + t_1, \quad (8)$$

де α – температурний коефіцієнт опору зразка рідини.

Визначення похибок сумісних вимірювань фізико-хімічних параметрів зразків пивних стоків надає змогу встановлювати раціональні режими роботи теплових багатопараметрових вихорострумових перетворювачів, підвищити вірогідність контролю фізико-хімічних характеристик зразків рідин та у перспективі суттєво підвищити якість управління технологічними процесами очищення пивних стоків.

Для оцінки впливу температурної похибки при виміряних значеннях амплітудних, фазових і частотних компонентів сигналів ТЕТП необхідно скористатися градувальними кривими, які виражають залежність компонентів сигналів ТЕТП від температури t .

Наприклад, для амплітудної складової, скориставшись градувальною кривою, яка виражає собою залежність результуючої ЕРС від температури t досліджуваного зразка стічних вод, маємо (Себко та Себко, 1999):

$$E_{\Sigma} = f(t), \quad (9)$$

На підставі (1), з урахуванням результатів робіт (Себко та ін., 1999, 2015, 2016; Сидоренко, 2014), отримаємо вираз для розрахунку відносної похибки $\gamma E_{\Sigma} / E_{\Sigma}$:

$$\frac{\gamma E_{\Sigma}}{E_{\Sigma}} = \frac{dE_{\Sigma}}{dt} \cdot \frac{t}{E_{\Sigma}} \cdot \frac{\gamma t}{t}, \quad (10)$$

де $\frac{dE_{\Sigma}}{dt}$ – похідна за параметром t ; ця похідна, як і значення E_{Σ} і t в (10),

визначається в кожній точці градувальної кривої $E_{\Sigma} = f(t)$ ТТП із зразком стічних вод; $\frac{\gamma}{t}$ – відносна похибка вимірювання температури t зразка стічних вод. Похибку $\frac{\gamma}{t}$ можна визначити з виразу:

$$\frac{\gamma}{t} = \frac{1}{\frac{dE_{\Sigma}}{dt} \frac{t}{E_{\Sigma}}} = \frac{1}{\frac{dE_{\Sigma}/E_{\Sigma}}{dt/t}} \frac{\gamma E_{\Sigma}}{E_{\Sigma}}, \quad (11)$$

При цьому величина роздільної здатності теплового ТТП із зразком стічних вод для амплітудної складової компонентів сигналів, з урахуванням (Себко та Себко, 1999), становить:

$$\frac{dE_{\Sigma}/E_{\Sigma}}{dt/t} = P_{E_{\Sigma}}^*, \quad (12)$$

звідси:

$$\frac{\delta t}{t} = \frac{1}{P_{E_{\Sigma}}^*} \frac{dE_{\Sigma}}{E_{\Sigma}}, \quad (13)$$

З урахуванням формули, що регламентується державними стандартами (Себко та ін., 1999, 2015, 2016; Сидоренко, 2014), результуючу температурну похибку з урахуванням вимірювання частотної складової компонентів сигналів ТТП при компенсації ЕРС E_0 знаходять:

$$\gamma_{t_{E_{\Sigma}}} = n_0 \cdot \sqrt{(B_{E_{\Sigma}} \gamma_{E_{\Sigma}})^2 + \gamma_{f_0}^2}, \quad (14)$$

де γ_{f_0} – відносна похибка вимірювання частоти, при початковій температурі $\gamma_{f_0} = (f - f_0)/f_0$, f_0 – частота електромагнітного поля, що відповідає температурі t_0 зразка стічних вод, $B_{E_{\Sigma}}$ – коефіцієнт впливу:

$$B_{E_{\Sigma}} = \frac{1}{P_{E_{\Sigma}}^*}, \quad (15)$$

Для визначення впливу температурної похибки на компоненти фазової складової сигналів ТТП (Себко та Себко, 1999) з урахуванням компенсації

частини паразитної складової ЕРС E_{Σ} , знаходимо похибку вимірювання температури t

$$\varphi = f(t), \quad (16)$$

звідси, з урахуванням (Себко та Себко, 1999), можна записати

$$\gamma_{t\varphi} = n_0 \cdot \sqrt{(B_{\varphi} \gamma_{\varphi})^2 + \gamma_{f_0}^2}, \quad (17)$$

де γ_{φ} – відносна похибка вимірювання кута φ ; B_{φ} – коефіцієнт впливу

$$B_{\varphi} = \frac{1}{P_{\varphi}^*}, \quad (18)$$

де P_{φ}^* – відносна чутливість фазового сигналу φ ТТП до температури t зразка стічних вод, яку з урахуванням (Себко та Себко, 1999), знаходять за формулою

$$P_{\varphi}^* = \frac{d\varphi/\varphi}{dt/t}, \quad (19)$$

Для визначення впливу температурної похибки на частоту f ТТП зі зразками стічних вод, застосовують отриману в роботах (Себко та Себко, 1999) залежність, яка виражає собою залежність частоти від температури досліджуваного зразка стічних вод, тобто:

$$f = f(t), \quad (20)$$

Тоді формулу для відносної похибки вимірювання температури можна записати, з урахуванням (Себко та Себко, 1999), як

$$\gamma_{tf} = n_0 \cdot \sqrt{(B_f \gamma_f)^2 + \gamma_{f_0}^2 + \gamma_{\varphi}^2}, \quad (21)$$

де γ_f – відносна похибка частоти поля за поточної температури зразка стічних вод; B_f – коефіцієнт впливу; γ_{f_0} – відносна похибка при початковій температурі.

$$B_f = \frac{1}{P_f^*}, \quad (22)$$

де P_f^* – відносна чутливість частотного сигналу ТТП до температури, з урахуванням (Себко та Себко, 1999), формула для визначення чутливості частотного сигналу ТЕТП, має такий вигляд

$$P_f^* = \frac{df/f}{dt/t}, \quad (23)$$

При цьому, якщо частотна градувальна крива ТЕТП із пробами стічних вод $f=f(t)$ визначена на підставі вимірювань, необхідно у формулах для розрахунку похибок ввести відносні похибки вимірювання температури теплового датчика, який використовується для нагрівання зразка стічних вод при імітації технологічного процесу виробництва пива. Наприклад, у разі використання ТХА для нагрівання зразків стічних вод безпосередньо у вимірювальній установці, маємо (Себко та ін., 1999, 2015, 2016; Сидоренко, 2014)

$$r = f(t), \quad (24)$$

У цьому випадку відносна похибка вимірювань, з урахуванням (Себко та Себко, 1999), матиме такий вигляд

$$\frac{\delta t_p}{t_p} = \frac{1}{P_r^*} \frac{\delta r}{r}, \quad (25)$$

Таким чином, при розрахунках температурної похибки, що впливає на амплітудні, фазові та змінно-частотні компоненти сигналів ТЕТП, з урахуванням похибки ТХА, маємо

$$\gamma_{t_{E_{\Sigma}}} = n_0 \cdot \sqrt{(B_{E_{\Sigma}} \gamma_{E_{\Sigma}})^2 + \gamma_{f_1}^2 + (B_r \gamma_r)^2}, \quad (26)$$

$$\gamma_{t_{\varphi}} = n_0 \cdot \sqrt{(B_{\varphi} \gamma_{\varphi})^2 + (B_r \gamma_r)^2 + \gamma_{f_1}^2}, \quad (27)$$

$$\gamma_{t_f} = n_0 \cdot \sqrt{(B_f \gamma_f)^2 + (B_r \gamma_r)^2 + \gamma_{f_1}^2 + \gamma_{\varphi}^2}, \quad (28)$$

З виразів (26) – (28) випливає, що температурна похибка найбільш істотно впливає на частотну складову багатокomпонентного сигналу електромагнітного перетворювача ТЕТП, оскільки у формулі (28) ми маємо чотири доданка. На

рис.1 наведено залежність похибки γ_t від температури t для зразка лужного стоку.

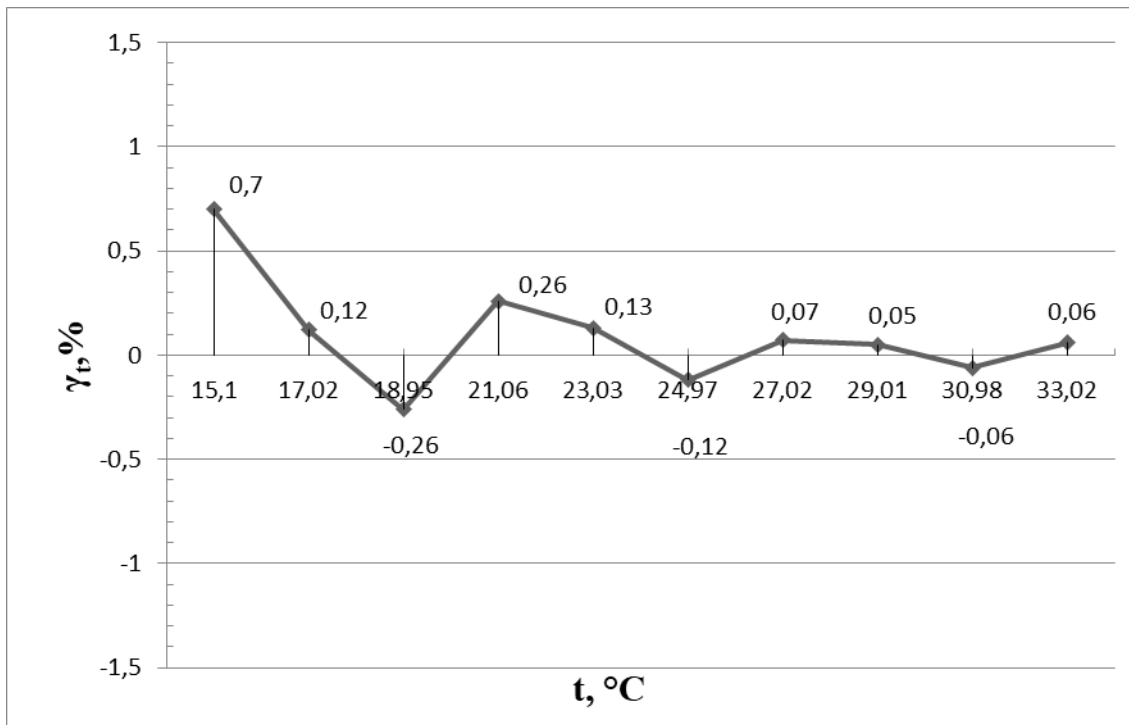


Рис.1. Залежність похибки γ_t від температури t для зразка лужного стоку

Таким чином, досліджено методики оцінювання температурної похибки γ_t зразків стічних вод, яка безпосередньо впливає на амплітудні, фазові та частотні компоненти сигналів перетворювача. Дану методику оцінювання похибок амплітудних, фазових та частотних компонентів сигналів розглянуто на основі моделі вимірювань: ТТП зразок стічних вод лужного складу.

З урахуванням схемних реалізацій методів вихорострумового неруйнівного контролю (Себко та ін., 1999, 2015, 2016), на рис. 2 надано схему теплового ТТП для сумісного визначення питомої електричної провідності λ_t відносної діелектричної проникності ϵ_t , та температури t зразка пивних стоків.

Слід відзначити, що для нагріву зразка у процесі контролю схема містить гріючий пристрій ГП. Схема ТТП передбачає два ідентичних електромагнітних перетворювача РП (робочій перетворювач) і ОП (опорний перетворювач). Намагнічувальні обмотки РП і ОП увімкнуті послідовно-узгоджено, а вимірювальні – безпосередньо до приладів схеми. Контрольним методом

вимірювання температури є термометри опору платинові ТОП, які закріплено безпосередньо до зразка.

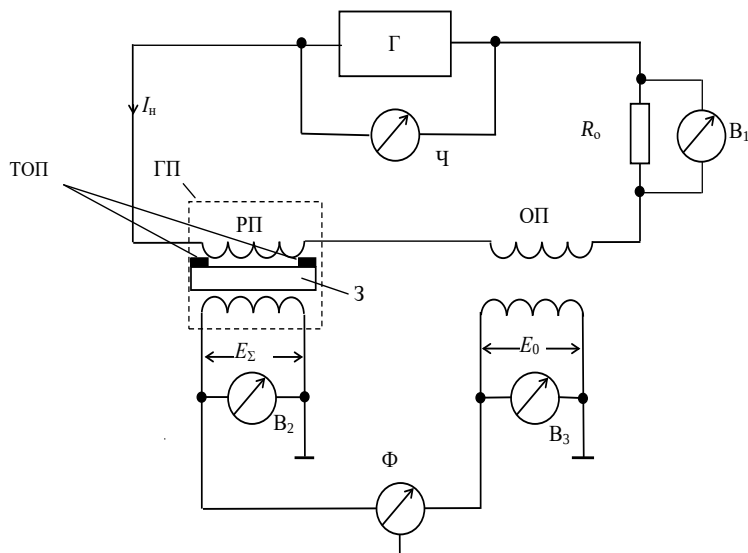


Рис.2. Схема включення теплового ТПП зі зразком рідини, що контролюється

Слід відзначити, що схема на рис. 2, не передбачає компенсацію ефектів повітряного проміжку, при цьому вважають, що вимірювальну обмотку нанесено безпосередньо на зразок, що контролюється. Схема також містить генератор Γ , частотомір Ч , вольтметри V_1 , V_2 і V_3 , зразковий опір R_0 , досліджуваний циліндричний зразок $З$, фазометр Φ . Вольтметр V_1 призначено для визначення намагнічувального струму I_H (відповідно до закону Ома). Під час роботи схеми за допомогою вольтметра V_2 вимірюємо ЕРС E_Σ при наявності зразка в РП, за допомогою вольтметра V_3 вимірюємо ЕРС E_0 (при відсутності зразка). Фазовий кут зсуву ϕ_0 (між ЕРС E_0 та E_Σ) визначаємо за допомогою фазометра Φ . Таким чином, досліджується математична модель системи ТПП – зразок стічних вод (параметри якої: питома електрична провідність λ_t відносна діелектрична проникність ϵ_r та температура t зразка пивних стоків).

Результати вимірювань питомої електричної провідності λ_t відносної діелектричної проникності ϵ_r , та температури t зразка пивних стоків

$t', ^\circ\text{C}$	x_t	G_t	$\Delta\varphi_t$, град	$\lambda_t \cdot 10^{-1}$, См/м	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda_t' \cdot 10^{-1}$, См/м	$\gamma_{\lambda t, \%}$	$\gamma_t, \%$
15	0,922662	0,105358	-81,925271	14,99	15,53	15,28	-1,89	3,53
17	0,938131	0,111348	-81,658561	15,78	17,45	15,47	2,00	2,58
19	0,953336	0,112263	-81,449979	16,32	18,78	16,00	2,00	-1,17
21	0,968307	0,115770	-81,121387	16,51	20,80	16,80	-1,73	-0,96
22	0,983062	0,119227	-80,854115	17,02	21,87	17,33	-1,79	-0,59
24	0,997562	0,122623	-80,591589	17,52	24,18	17,82	-1,68	0,74
26	1,011904	0,1349410,1	-80,321981	18,33	26,10	18,03	1,66	0,38
28	1,026013	0,1295453	-80,055172	18,82	28,05	18,54	1,51	0,17
30	1,039902	0,132939	-79,792073	19,04	30,03	19,31	-1,39	0,13
32	1,053700	0,136345	-79,527958	19,55	31,95	19,81	-1,33	-0,156
34	1,067321	0,139793	-79,259848	20,06	33,98	20,33	-1,32	-0,03
36	1,081486	0,1432682	-78,989766	20,56	35,98	20,83	-1,29	-0,06
38	1,093916	0,1465391	-78,735455	21,33	38,03	21,07	1,23	0,08
40	1,106951	0,149897	-78,473957	21,84	40,02	21,58	1,20	0,05
42	1,119923	0,153308	-78,207847	22,34	41,98	22,08	1,18	-0,05
44	1,132651	0,1566669	-77,945831	22,85	43,99	22,59	1,15	-0,02

Висновки

Запропоновано новий інформативний трипараметровий метод контролю питомої електричної провідності λ_t , відносної діелектричної проникності ϵ_r та температури t зразка пивних стоків лужного складу, отримано основні співвідношення, які описують теоретичні положення реалізації трипараметрового методу контролю. Слід визначити, що введення питомих нормованих характеристик первинного перетворювача дозволяє пов'язувати сигнали ТТП з фізико-хімічними параметрами зразка стічних вод. Наведено алгоритми вимірювального контролю питомої електричної провідності λ_t ,

відносної діелектричної проникності ϵ_r та температури t зразка стічних вод, розроблено алгоритми вимірювальних і розрахункових процедур нормованих характеристик теплового ТТП. Досліджено теоретичні положення оцінювання впливу температурної похибки зразка на компоненти сигналів ТТП за рахунок імітації нагрівання зразка у процесі контролю. Слід визначити, що отримані співвідношення, які описують універсальні функції перетворення, алгоритми вимірювальних та розрахункових операцій електричних та температурних характеристик зразка, а також компонентів сигналів первинного теплового перетворювача, отримані вирази для визначення похибок сумісних багатопараметрових вимірювань компонентів сигналів ТТП – надають змогу щодо певних етапів моделювання екологічної ситуації, які пов'язано з процесами урбанізації та руйнуванням природного середовища районів великих міст, в котрих розміщуються виробництва пивоварної галузі. Надають змогу щодо визначення походження стічних вод відповідних підприємств за фізико-хімічними характеристиками, що контролюються й дозволяють приймати рішення щодо застосування заходів регулювання за походженням відходів за рахунок технологій підготування води, сприяють введенню технологічних операцій, пов'язаних зі способами та засобами очищення пивних стоків, дозволяють надавати рекомендації за витратами води та сировини призначеної для виготовлення готового продукту.

Метою статті є дослідження теоретичних положень роботи теплового трансформаторного вихорострумowego перетворювача (ТТП), під час здійснення підготовчих етапів екологічного моніторингу зразків стічних вод пивоварного виробництва на основі реалізації безконтактного трипараметрового методу вихорострумowego сумісного контролю питомої електричної провідності λ_t , відносної діелектричної проникності ϵ_r та температури t зразка стічних вод.

Підхід: знайшла подальший розвиток теорія роботи ТТП стосовно контролю електричних та температурних характеристик зразків пивних стоків за рахунок введення універсальних функцій перетворення $G_t = f(\Delta\varphi)$ і $\Delta\varphi = f(x_t)$, які пов'язують нормовані різницеві компоненти сигналів перетворювача з фізико-

хімічними характеристиками зразка. Завдяки цьому є можливим одночасно попереджати причини відхилення зразків пивних стоків від заданих показників екологічної безпеки й здійснювати заходи, виконуючі відповідне корегування.

Результати: розроблено метод трипараметрового вимірювального контролю питомої електричної провідності λ_t , відносної діелектричної проникності ϵ_r та температури t зразка стічних вод зразка стоків продукції пивоваріння.

Дослідницькі обмеження: діапазон частот магнітного поля $f = 80-100$ МГц, досить складно підтримувати у лабораторних умовах, тому запропонований метод є досить недешевим та потребує застосування сучасної високочастотної апаратури, радіус пробниці залежить від радіусу каркаса первинного перетворювача, тому досить складно підібрати ємність, яка відповідає існуючим стандартам.

Практичне значення: полягає у визначенні характеру пивних стоків на основі результатів вимірювань фізико-хімічних параметрів зразка при реалізації трипараметрового вихорострумowego методу, що надає змогу попереджати причини відхилення зразків пивних стоків від заданих показників екологічної безпеки й здійснювати заходи, виконуючі відповідне корегування. Важливим практичним результатом є також визначення компонентів сигналів та нормованих характеристик первинного вихорострумowego перетворювача зі зразком пивних стоків, що надає змогу розраховувати, конструювати та створювати багатопараметрові автоматизовані пристрої вимірювального контролю фізико-хімічних параметрів зразків пивних стоків. У свою чергу, в результаті підвищення точності вимірювань фізико-хімічних параметрів виникає можливість удосконалення та створення перспективних методів очищення стічних вод на електролітичній основі.

Оригінальністю статті є дослідження теоретичних положень роботи теплового ТТП за рахунок реалізації нового багатопараметрового вихорострумowego методу вимірювального контролю питомої електричної провідності λ_t , відносної діелектричної проникності ϵ_r та температури t зразка

стічних вод на основі введення універсальних функцій перетворення $G_t = f(\Delta\varphi)$ і $\Delta\varphi = f(x_t)$, які пов'язують сигнали перетворювача з фізико-хімічними характеристиками зразка пивних стоків, що надає змогу попереджати причини відхилення зразків пивних стоків від заданих показників екологічної безпеки й здійснювати заходи, виконуючі відповідне корегування.

Перспективи подальших досліджень полягають у здійсненні екологічного моніторингу при визначенні характеру зразка пивних стоків на основі реалізації багатопараметрових вихорострумових методів контролю фізико-хімічних параметрів зразка, вимірювальному контролі характеристик електропровідності λ , загального солемісту TDS та рівня pH при різних температурах зразків пивних стоків одним і тим же вихорострумовим перетворювачем у визначеній зоні контролю, а також у обиранні перспективних методів очищення на основі реалізації інформативних вихорострумових методів.

Список літератури

- Abhinesh Kumar Prajapati, & Parmesh Kumar Chaudhari. (2015). Physicochemical Treatment of Distillery Wastewater-A Review. *Chemical Engineering Communications*, 202(8), 1098-1117. doi: 10.1080/00986445.2014.1002560.
- Adhena Ayaliew Werkneh, Hayelom Dargo Beyene, & Abduljeleel A. Osunkunle. (2015). Recent advances in brewery wastewater treatment; approaches for water reuse and energy recovery: a review. *Environmental Sustainability*, 2(2), 199-209. doi: 10.1007/s42398-019-00056-2.
- Angosto, M., Fernández-López, J. A., & Godínez, C. (2015) Brewery and liquid manure wastewaters as potential feedstocks for microbial fuel cells: a performance study. *Environmental Technology*, 36(1), 68-78. doi: 10.1080/09593330.2014.937769.
- Chang, S. (2014). Anaerobic Membrane Bioreactors (AnMBR) for Waste water Treatment. *Chemical Engineering and Science*, 56-61.

- Majewski, J., Malacziwskyj, P., Yatsuk, V., Stolyarczuk, P., & Michalewa, M. (2010). Zastosowanie sensor w pojemno ciowych do szybkiej kontroli parametr wroztwor w wielosk adnikowych. *Przegl d Elektrotechniczny*, 10, 92-95.
- Sasha Wunderlich, & Werner Back. (2010). *Beer in Health and Disease Prevention*. Freising-Weihenstephan, Germany. doi: 10.1016/B978-0-12-373891-2.00001-8
- Sharmin Sultana, Mahbuboor Rahman Choudhury, Ahmed Refaat Bakr, Nawrin Anwar, & Md. Saifur Rahaman. (2018). Effectiveness of electro-oxidation and electro-Fenton processes in removal of organic matter from high-strength brewery wastewater. *Journal of Applied Electrochemistry*, 48(5), 519-528. doi: 10.1007/s10800-018-1185-3.
- Васілевський, О. М., & Дідич, В. М. (2012). *Елементи теорії побудови потенціометричних засобів вимірювального контролю активності іонів з підвищеною вірогідністю*. Монографія. Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 170.
- Вашкурак, У. Ю., Фалик, Т. С., Шевчук, Л. І., & Коваль, І. З. (2017). Використання кавітаційних технологій для очищення стічних вод пивоварні. *Вісник НУ «Львівська політехніка» : Хімія, технологія речовин та їх застосування*, 868, 267-273.
- ДСТУ ISO 14001:2015. (2016). *Системи екологічного управління. (ISO 14001:2015, IDT)*. [Чинний від 2015-12-21]. Київ. (Вимоги та настанови щодо застосування).
- Ковальчук, В. А., Ковальчук, О. В., & Самелюк, В. І. (2010). Біотехнологія очистки стічних вод підприємств харчової промисловості. *Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. К.: Технік*, 93, 182-187.
- Максимів, Н. Л., Старчевський, В. Л., Коваль, І. З., & Фалик, Т. С. (2007). Особливості окиснювальних процесів під час кавітаційного очищення води від хімічних і біологічних забруднень. *Вісник НУ «Львівська політехніка» : Хімія, технологія речовин та їх застосування*, 590, 270-274.

- Себко, В. В., & Здоренко, В. Г. (2016). Метод неруйнівного контролю зразка водного розчину адипінової кислоти. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*, 1(94), 121-127.
- Себко, В. В., Здоренко, В. Г., Петухова, Е. О., & Минкова, А. К. (2015). Автоматизація вимірювального контролю температури проби харчового барвника. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*, 4(88), 49-57.
- Себко, В. П., & Себко, В. В. (1999). Вихретоковые методы и преобразователя для определения температуры изделий и сред. *Вісник харківського державного політехнічного університету (ХГПУ)*, 24, 10-16.
- Сидоренко, Ю. В. (2014). Параметрична інтерполяційна функція Гауса. *Комп'ютерне моделювання в хімії і технологіях та системах сталого розвитку: зб. матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції* (pp. 67-73). Київ : НТУУ «КПІ».

УЗАГАЛЬНЕННЯ СУЧАСНОГО ДОСВІДУ УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ФУТЕРІВКИ ПЕЧЕЙ ВІДДЗЕРКАЛЬНОГО ТИПУ В КОНТЕКСТІ РАЦІОНАЛЬНОГО РЕСУРСОКОРИСТУВАННЯ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Юшкевич П.О., Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу ФТПМС, Дніпро, Україна

Молчанов Л.С., Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук, кандидат технічних наук, заввідділом ФТПМС, Дніпро, Україна

Голуб Т.С., Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу ФТПМС, Дніпро, Україна

Abstract

Among the total number of all metallurgical units used for steel smelting in Ukraine, a special place is occupied by mirror-type furnaces. For the casing elements this metallurgical furnace used minerals materials with high temperature resistance. In the production of steel, the overall service life of mirror-type furnaces is determined by the durability of the high temperature lining. Rational operation of the lining of the metallurgical mirror-type furnace, which is made of high temperature minerals materials, is important, because it will increase the resource saving of metallurgical production in the conditions of the modern resource base of Ukraine.

The experience of operating furnaces of mirror-type is presented: a marten furnace and the dual steelmaking furnace. The high temperature resistance lining for this furnaces, especially the vault, works in very difficult conditions. In the course of technological operation have an affect: mechanical shocks; abrasion; chemical interaction of melting dust and slag; high temperature. Therefore the high quality

materials are used for masonry high temperature resistance lining. The stability of the resistance lining for high temperature furnaces of mirror-type from furnace of 100 to 300 tons can be from 400 to 1 000 of the melt repetitions, for furnace more than 300 tons from 200 to 500 of the melt repetitions.

Вступ

Україна належить до держав з провідною мінеральною та сировинною базою у світі. Станом на 1 січня 2019 в Україні налічувалося 2 233 родовища горючих корисних копалин, 147 рудних та 4 676 нерудних родовищ (Білецький, 2021). Одним з головних споживачів природних ресурсів є металургійна галузь. Вона споживає руди металів, флюсуючі добавки та додаткові матеріали. При цьому витратні показники ефективності виробництва металу визначаються не лише кількістю використаних металевих шихтових матеріалів, але й більшою мірою залежать від стійкості вогнетривких матеріалів футерівок плавильних агрегатів, що безпосередньо захищають основні конструктивні елементи технологічного устаткування від впливу агресивних високотемпературних шлакової, металевої та газової фаз. Виробництво зазначених матеріалів базується на використанні мінеральної сировини, що не видобувається на території України (оксиди хрому та оксиди магнію). Тому раціональна експлуатація футерівок технологічного металургійного устаткування, що виконано з вогнетривких матеріалів, які містять оксиди магнію та оксиди хрому, є актуальним завданням щодо підвищення ресурсоощадження металургійного виробництва в умовах сучасної ресурсної бази України та значно обмеженої поставками дефіцитних матеріалів з-за кордону через ускладнену логістичну ситуацію.

Серед загальної кількості усіх металургійних агрегатів, що використовуються для виплавки сталі в Україні особливе місце займають печі віддзеркального типу, що працюють з використанням газоподібного пального (мартенівська піч та двованний сталеплавильний агрегат). Сортамент марок

сталі, що одержуються у печах віддзеркального типу є специфічним і має попит як у державі так і у світі.

Використання печей саме такого типу для певного цільового сортаменту марок сталі є доцільним, так як заміна на інший тип печей призведе до необхідності побудови альтернативних металургійних комплексів значної вартості, а це є неможливим у складних економічних умовах України, що наразі склалися. Тому на вітчизняних підприємствах з метою збереження загального рівня виробництва сталі на відповідному рівні продовжується експлуатація печей віддзеркального типу.

При виробництві сталі загальний термін експлуатації печей віддзеркального типу визначається стійкістю вогнетривкої футерівки, оскільки проведення ремонтних робіт у ході експлуатації печей майже неможливе, через високу температуру технологічного процесу.

Відповідно до наявних свідчень (Анонім, 2021а, 2021б; Баптизманський, Бойченко та Величко, 1996; Бойченко, Охотський та Харлашин, 2006; Григор'єв, Нечкін, Єгоров та Нікольський, 1995; Кочанов, 1977; Свинолобов та Бровкин, 2002; Стрелов, 1985; Хобта, Лукьянов, Боганов, Черный та Яровой, 2007; Somnol Kumar et al., 2013; Vuzlit, 2017) з усіх конструктивних елементів печі, що захищені футерувальними матеріалами передчасний вихід з ладу відповідно до загального експлуатаційного ресурсу відбувається саме через склепіння. Таким чином для печей віддзеркального типу основним конструктивним елементом, стійкість якого визначає тривалість всієї кампанії, є склепіння. Відповідно до цього у роботі розглянуті питання, що стосуються особливостей конструктивної недосконалості найбільш поширених сучасних основних склепінь печей віддзеркального типу.

Мета роботи – узагальнити науково-технічну інформацію та охарактеризувати досвід експлуатації та фактори, що впливають на стійкість основних склепінь печей віддзеркального типу, що дозволить створити базу для подальших досліджень які будуть спрямовані на підвищення стійкості вогнетривів на печах віддзеркального типу та тривалість експлуатаційного

циклу склепінь загалом, що буде сприяти підвищенню ресурсоощадності та покращенню технологічної екологічності процесу, за рахунок того, що дозволить скоротити витрату нових вогнетривів та відходи від перефутерування склепінь та їх заміни.

Проведено пошук та аналіз джерел науково-технічної інформації, пов'язаних з питанням досвіду експлуатації та факторів, що впливають на стійкість основних склепінь печей віддзеркального типу.

Характеристика основних склепінь печей віддзеркального типу

Склепіння є одним з основних конструктивних елементів печі. Від нього у значній мірі залежить стійкість та експлуатаційний цикл агрегату загалом, що впливає на екологічні та техніко-економічні показники виробничого процесу. Склепіння безпосередньо перекриває робочий простір печі зверху (Анонім, 2021а, 2021б; Баптизманський та ін., 1996; Бойченко та ін., 2006; Григорьев та ін., 1995; Кочанов, 1977; Свинолобов та Бровкин, 2002; Стрелов, 1985; Хобта та ін., 2007; Somnoh Kumar et al., 2013; Vuzlit, 2017) та відбиває теплоту факела безпосередньо до металеві ванни. Воно також запобігає прямому контакту пилу та відхідних газів, в основі суміші яких знаходиться СО з навколишньою атмосферою зовнішнього середовища. Футерування печей віддзеркального типу, особливо склепіння, працює в дуже важких умовах. Механічні удари та стирання, хімічна взаємодія плавильного пилу та шлаків, високі температури є причинами використання для вогнетривкої кладки високоякісних матеріалів (Анонім, 2021а, 2021б; Баптизманський та ін., 1996; Бойченко та ін., 2006; Григорьев та ін., 1995; Кочанов, 1977; Хобта та ін., 2007; Somnoh Kumar et al., 2013; Vuzlit, 2017). Стійкість печей віддзеркального типу садкою від 100 до 300 т може становити від 400 до 1000 плавов, понад 300 т від 200 до 500 плавов. На печах з інтенсивним продуванням ванни киснем стійкість склепіння становить від 150 до 300 плавов (Анонім, 2021б;).

З літературних даних відомо (Анонім, 2021а, 2021б; Баптизманський та ін., 1996; Бойченко та ін., 2006; Григор'єв та ін., 1995; Кочанов, 1977; Свинолобов та Бровкин, 2002; Стрелов, 1985; Хобта та ін., 2007; Somnoh Kumar et al., 2013; Vuzlit, 2017), що стійкість склепіння віддзеркальних печей змінюється від заводу до заводу і залежить від конструкції печі (переважно висоти склепіння), умов експлуатації та обслуговування печі. Відхилення від оптимальних режимів роботи печі призводить до скорочення стійкості склепіння. У роботах (Анонім, 2021а, 2021б; Баптизманський та ін., 1996; Бойченко та ін., 2006; Григор'єв та ін., 1995; Somnoh Kumar et al., 2013; Vuzlit, 2017) вказується, що стійкість залежить від професійного рівня та якості будівельної структури склепіння. Занадто щільне і нерівномірне укладання цегли може викликати концентрацію напруг стиснення в секції арки склепіння (Somnoh Kumar et al., 2013). З робіт (Анонім, 2021а, 2021б; Баптизманський та ін., 1996; Бойченко та ін., 2006; Григор'єв та ін., 1995; Somnoh Kumar et al., 2013; Vuzlit, 2017) відомо, що двованний сталеплавильний агрегат є удосконаленою комбінацією з двох ванн мартенівських печей, що мають спільне склепіння. Відповідно до цього особливості конструкції склепінь (рис.1) мартенівської піч та двованного сталеплавильного агрегату можуть бути розглянуті загалом як представників одного типу групи віддзеркальних печей (Анонім, 2021а, 2021б; Баптизманський та ін., 1996; Бойченко та ін., 2006; Кочанов, 1977; Свинолобов та Бровкин, 2002; Стрелов, 1985; Хобта та ін., 2007; Somnoh Kumar et al., 2013; Vuzlit, 2017). Такому підходу є підтвердження у роботі (Григор'єв та ін., 1995) де автори стверджують, що конструкція склепіння двованного сталеплавильного агрегату загалом не відрізняється від мартеновського, але його висота над рівнем порогів робочих вікон може досягати від 4200 до 4500 мм в залежності від садки агрегату (Григор'єв та ін., 1995). Висока запиленість атмосфери робочого простору та велика висота склепіння знижують його роль в теплообміні але різко підвищують його стійкість порівняно з мартенівським агрегатом, що може доходити від 700 до 1200 плавов (Григор'єв та ін., 1995;).

Відповідно до джерел (Анонім, 2021а, 2021б; Баптизманський та ін., 1996; Бойченко та ін., 2006; Григор'єв та ін., 1995; Кочанов, 1977; Свинолобов та Бровкин, 2002; Стрелов, 1985; Хобта та ін., 2007; Somnroh Kumar et al., 2013; Vuzlit, 2017) встановлено, що у сучасних віддзеркальних печах розглянутих типів перевагу відають використанню основних склепінь. Схематичне зображення конструкції типового основного склепіння наведено на (рис. 1).

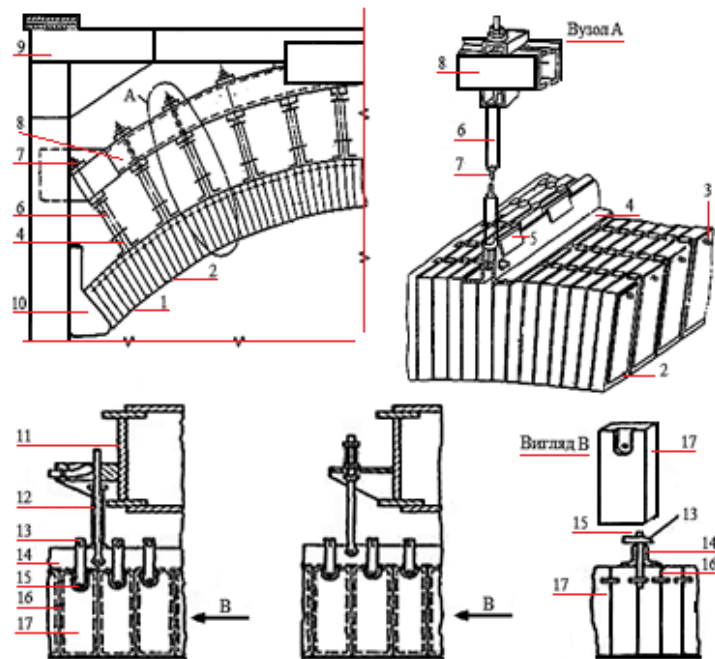


Рис.1. Конструкція розпiрно-пiдвiсного склепiння
вддзеркальних печей (Анонiм, 2021б; Vuzlit, 2017):

- 1 – склепіння цегли; 2 – пластина; 3 – штир; 4 – куточки; 5 – пластина підвіски цегли;
- 6 – обмежувач; 7 – тяга підвіски склепіння; 8 – розвантажувальна балка; 9 – ригель;
- 10 – підп'ятова балка; 11 – комбінований ригель з розвантажувальною балкою;
- 12 – потяг з обмежувачем зростання зводу; 13 – клин 14 – куточок
- 15 – посилена підвіска; 16 – пластина; 17 – сводова цегла

Склепіння з основною футерівкою, виконані у вигляді розпiрно-пiдвiсної конструкції (рис.1), що складається з наборів цеглин стандартизованих розмірів, що підбираються під кожен агрегат. Особливостями конструкції є суміщення в одному вузлі систем підвіски та розпору склепіння (рис. 1). Треба відзначити, що в умовах експлуатації склепіння з основних вогнетривів (магнезитохромітові або хромомагнезитові) може спостерігатися наступне

(Анонім, 2021а; Баптизманський та ін., 1996; Бойченко та ін., 2006; Григор'єв та ін., 1995; Кочанов, 1977; Хобта та ін., 2007; Somnoh Kumar et al., 2013):

1. Цеглини погано зварюються одна з одною, через це не утворюють моноліту;
2. Підвищена теплопровідність і великі нещільності кладки (розкриті шви) зумовлюють вищі (майже удвічі) втрати тепла з 1 м² площі склепіння;
3. Об'ємна маса магнезито-хромітової цеглини в 1,5 рази більша, ніж динасової.

Окрім цього у роботах (Анонім, 2021а; Григор'єв та ін., 1995; Свинолобов та Бровкин, 2002; Стрелов, 1985; Хобта та ін., 2007) зазначається, що коефіцієнт розширення цегли з основних вогнетривів (магнезито-хромітових або хромомагнезитових) вище, ніж з кислих(динасових), у результаті при розігріві арки склепіння зовнішні шви розкриваються, але в внутрішньому боці виникають високі напруги стиску, що призводить до сколу внутрішньої частини склепіння.

Саме через вище перелічене експлуатація основних вогнетривів у футеруванні склепіння віддзеркальних печей виключає можливість застосування звичайної аркової конструкції склепіння, і через це доводиться його виконувати розпірно-підвісним з кріпленням та прокладками між цеглою, а це ускладнює та збільшує вартість конструкції, а зі збільшенням складності, знижується загальна надійність (Анонім, 2021а; Григор'єв та ін., 1995).

Основні фактори, що впливають на стійкість основних склепінь печей віддзеркального типу

У відповідності до вище наведеного у статті, можливо виділити наступні основні чинники, що суттєво впливають на стійкість склепіння з основних вогнетривів (Анонім, 2021а, 2021б; Баптизманський та ін., 1996; Бойченко та ін., 2006; Кочанов, 1977; Somnoh Kumar et al., 2013; Vuzlit, 2017):

1. Змінення у геометричній конфігурації арки склепіння. Під впливом теплового розширення і напруг стиснення склепіння цегли при нагріванні викликають нерівномірний знос склепіння і втрату його статичної стійкості;

2. Термічна стабільність та відкрита пористість склепінних вогнетривів. Неоднорідність фізичних і хімічних властивостей вогнетривкої цегли по товщині склепіння також може призвести до змінних напруг стиснення через їхнє різне термічне розширення;

3. Переохолодження склепіння під час проведення гарячих ремонтів, аварійних відключеннях обігріву паливом, у процесі завалки (особливо під час роботи з твердою шихтою), і навіть при реверсуванні напрямку димових газів;

4. Тривалість процесів завалки, нагрівання та заливання рідкого чавуну, а також інтенсивність теплового навантаження в ці періоди;

5. Тривалість періодів плавлення та доведення, інтенсивність продування ванни киснем.

Головним фактором щодо стійкості основних склепіння є температурний режим ведення плавок. Так як у якості основних вогнетривів зазвичай для футерувальної цегли використовують термостійкий магнезито-хроміт або периклазошпінелід марок МХСП і ПШСП (щільного) і МХСПО, ПШСПО (звичайного) (Somnol Kumar et al., 2013; Vuzlit, 2017). Магнезитохромітова або периклазошпінелідна цегла характеризується не тільки досить високою вогнетривкістю але і значною чутливістю до коливань температурами (температурних перепадів). У випадку магнезитохромітової цегли допустима температура нагрівання може становити до 1800 °С, що сприяє підвищенню надійності футерування та продуктивності печі. Стійкість склепіння з основної (магнезито-хромітової) цеглини може бути в два або три рази вище, ніж з аналогічної кислої цегли (Анонім, 2021а, 2021б; Баптизманський та ін., 1996; Бойченко та ін., 2006; Кочанов, 1977; Свинолобов та Бровкин, 2002; Стрелов, 1985; Хобта та ін., 2007). Більші межі допустимної температури нагрівання, дають можливість за технологією режимів ведення плавки підвищувати

температуру в печі при використанні магнезитохромітового чи периклазошпінелідного склепіння.

Найбільш сприятливою для служби основних виробів (хромо-магнезитових та магнезито-хромітових) у склепіннях печей є температура в інтервалі від 1600 до 1650 °С, проте витримати таку температуру протягом усієї кампанії неможливо. За температурних умов в межі від 300 до 400 °С, вогнетриви склепіння печі починають постійно відчувати змінну напруги. Ступінь прояву цього явища буде залежати від температури склепіння і тривалості плавки (Анонім, 2021а, 2021б; Баптизманський та ін., 1996; Бойченко та ін., 2006; Григорьев та ін., 1995; Кочанов, 1977; Свинолобов та Бровкин, 2002; Стрелов, 1985; Хобта та ін., 2007; Somnoh Kumar et al., 2013; Vuzlit, 2017). Перепади температури на внутрішній поверхні склепіння мають місце при зміні твердих і рідких періодів плавки, як наслідок, виникають невеликі відколи (лущення) у межах від 10 до 20 мм (Свинолобов та Бровкин, 2002; Стрелов, 1985; Хобта, Лукьянов, Боганов, Черный та Яровой, 2007). Найбільш різкі перепади температури внутрішньої поверхні склепіння спостерігаються в періоди проведення гарячих ремонтів, зокрема, при ремонтах подини. Внаслідок різних термомеханічних властивостей зон, при коливаннях температури в матеріалі виникають напруги і відколи виробів у межах від 40 до 60 мм, що проходять поблизу межі між робочою і перехідною зонами (Хобта та ін., 2007). У (табл. 1) представлені дані щодо стійкості за рік, середньої стійкості за рік та кількість годин, витрачених на ремонт подини протягом року (Хобта та ін., 2007).

Таблиця 1

Стійкість склепінного вогнетриву та тривалість ремонтів подини по роках
(Хобта та ін., 2007)

Рік	2002			2003			2004				2005			2006			
Стійкість за компаніями	1171	1257	1305	1211	1346	1439	1402	638	1074	1037	1091	1146	1008	658	970	873	1108
Середня стійкість за рік	1244			1332			1038				1082			902			
Час ремонтів подини за рік, годин	40			38,7			43,9				42,7			91,2			

Окрім проблем з дотримання раціонального температурного режиму на погіршення стійкості склепіння впливають безпосередньо фізико-хімічні умови середовища, що створюються за умови відхідного газового потоку і пилу, що інтенсивно виділяється з ванни під час продувки киснем. Пил складається в основному з оксидів заліза (магнетиту, гематиту, вюстити) і у великих кількостях осідає та накопичується на робочій поверхні склепіння. Цей пил насичує окислами заліза основні фази вогнетривкої цеглової футерівки (периклаз і хроміт), що знижує температуру її плавлення та призводить до інтенсифікації оплавлення і зносу склепіння (Somnoh Kumar et al., 2013).

Регулярне реверсування потоку димових газів між камерами печі також сприяє виникненню періодичних короткочасних коливання температури склепіння, що у свою чергу впливає на зміну навантаження та напруги стиснення в арці склепіння (Somnoh Kumar et al., 2013).

Відповідно до аналізу робіт (Анонім, 2021а, 2021б; Баптизманський та ін., 1996; Бойченко та ін., 2006; Григор'єв та ін., 1995; Кочанов, 1977; Свинолобов та Бровкин, 2002; Стрелов, 1985; Хобта та ін., 2007; Somnoh Kumar et al., 2013; Vuzlit, 2017), одним із шляхів, спрямованих на підвищення стійкості

вогнетривів та склепіння, може бути дотримання наступних заходів (Свинолобов та Бровкин, 2002; Стрелов, 1985; Хобта та ін., 2007):

1. Суворе дотримання проектних значень положення склепіння для виключення контакту розігрітого склепіння з металоконструкціями печі;
2. Застосування вогнетривів з максимально високою початковою механічною міцністю та високою однорідністю механічних властивостей по перерізу цегли;
3. Скорочення до мінімуму частоти та тривалості гарячих ремонтів подини печі;
4. Організація примусового, рівномірного по поверхні склепіння обдування холодним повітрям для зниження температур перетину склепіння.

Треба також відзначити, що для досягнення високих показників стійкості склепінь віддзеркальних печей важливим є дотримуватись наступних операцій і положень під час кладки склепіння робочого простору (Анонім, 2021a, 2021б; Баптизманський та ін., 1996; Кочанов, 1977; Somnoh Kumar et al., 2013; Vuzlit, 2017):

1. Кладку склепіння необхідно виконувати кільцями, починаючи від поперечної осі печі у напрямку голівок. Кільця повинні бути щільно підігнані один до одного із зазором між ними не більше 2 мм. Растес цегли у кільцях стаціонарних віддзеркальних печей не допускається. Кружляла опалубки склепіння не повинні спиратися на кесони газових головок.

2. Базове розташування підвісок для цеглини в кільцях слід визначати при кладці першого кільця і встановлювати підвіски в інших кільцях. Відхилення підвісок від осі ряду вздовж поздовжньої осі печі повинно перевищувати 25 мм. Підвісні тяги кожного кільця повинні бути розташовані в одній вертикальній площині та спрямовані радіально до поверхні склепіння. Відхилення від проектних розмірів прокладочних та підвісних сталевих пластин не повинно перевищувати: по ширині та довжині ± 1 мм, за розташуванням отворів ± 1 мм та по діаметру отворів ± 1 мм; штирів армування – за довжиною ± 1 мм та за

діаметром ± 1 мм. Пластини мають бути рівними, без задирок. Дві прокладні пластини в один шов встановлювати не дозволяється.

3. У кожному кільці повинен бути встановлений одні замок, який необхідно забити відразу ж після закінчення набору кільця, а щоб уникнути при цьому викривлення кільця, кладку наступних кілець слід проводити від п'ятових опор уступами.

4. Монтувати підвісну і завязу арматуру слід після закінчення кладки ділянки склепіння довжиною, що дорівнює довжині несучих куточків.

5. При спиранні зводу на опалубку зазори між верхнім краєм упорних (обмежувальних) трубок і нижньою полицею дугових балок або ригелів у пучку зводу повинні дорівнювати 15 мм з поступовим зменшенням від п'яти до 0. Для визначення положення склепіння після видалення опалубки та його зростання при розігріві печі перед зняттям опалубки вздовж поздовжньої осі склепіння повинні бути встановлені маяки. Результати вимірів мають бути зафіксовані в акті приймання печі.

Наведені фактори спільно впливають у різних поєднаннях на вогнетривке футерування склепіння, взаємно посилюють один одного, що призводить до змін фізико-хімічних властивостей вогнетривкого матеріалу, погіршення експлуатаційних показників вогнетриву та зниження його стійкості. Інтенсифікація теплового та технологічного режимів сприяє посиленню та прискоренню дії вищевказаних факторів (Свинолобов та Бровкин, 2002; Стрелов, 1985; Хобта та ін., 2007). Конкретні причини руйнування футерування робочого простору склепіння в кожному випадку (Анонім, 2021a, 2021b; Баптизманський та ін., 1996; Бойченко та ін., 2006; Григор'єв та ін., 1995; Кочанов, 1977; Свинолобов та Бровкин, 2002; Стрелов, 1985; Хобта та ін., 2007; Somnoh Kumar et al., 2013; Vuzlit, 2017) можуть бути різні, однак для поліпшення їх встановлення доцільним є розглядати, враховувати та спиратися на ті, що наведені у цій роботі.

Спираючись на представлені данні стосовно досвіду експлуатації основних склепінь печей віддзеркального типу, а також чинників та факторів,

що впливають на стійкість та експлуатаційний ресурс склепіння з основних вогнетривів, у подальшому за розвитком цього напрямку досліджень можлива розробка більш досконалих конструкцій склепінь, а також вогнетривів для них, що сприятиме збільшенню кампанії експлуатаційного ресурсу склепіння і його вогнетривкового футерування, а тим самим скороченню відходів від перефутерування вогнетривів та їх заміни, що загалом сприятиме покращенню показників екологічності, цього процесу.

Висновки

Треба відзначити, що хоча конструкція склепінь віддзеркального печей усталена та перевірена часом, є необхідність у розробці модифікованих конструктивних рішень спрямованих на підвищення експлуатаційних, екологічних та техніко-економічних показників порівняно з класичними конструкціями.

Визначено чинники та фактори, що суттєво впливають на стійкість склепіння з футеруванням із основних вогнетривів (хромо-магnezитових та магнезито-хромітових), а також знижують їх експлуатаційний ресурс. Встановлено за рахунок аналізу ряду робіт заходи, що можуть дозволити забезпечення підвищення стійкості вогнетривів для футерівки та експлуатаційного ресурсу основних склепінь печей віддзеркального типу: мартенівська піч та двованний сталеплавильний агрегат, що загалом сприятиме покращенню показників ресурсоощадності та екологічності цього процесу.

Список літератури

Somnoh Kumar, Garai, S. K., Keshari, K. K., Bhattacharya, A. K., Ghosh, N. K., Roy, I., & Roy, S. (2013). Повышение стойкости свода двухванных мартеновских печей металлургического комбината в Бхилаи. *Steel Times International*, 28-32. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/316959571_Povysenie_stojkosti_svo da_dvuhvannyh_martenovskih_pecej_metallurgiceskogo_kombinata_v_Bhilai](https://www.researchgate.net/publication/316959571_Povysenie_stojkosti_svo_da_dvuhvannyh_martenovskih_pecej_metallurgiceskogo_kombinata_v_Bhilai)

- Vuzlit. (2017). *Склепіння мартенівських печей*. Retrieved from https://vuzlit.com/746481/sklepinnya_martenivskih_pechey
- Анонім. (2021a). *Мартенівська піч*. Retrieved from <https://metinvest-smc.com/ua/articles/martenivska-pich/>
- Анонім. (2021б). *Склепіння мартенівської печі*. Retrieved from <https://studfile.net/preview/7810953/page:6/>
- Баптизманський, В. И., Бойченко, Б. М., & Величко, О. Г. (1996). *Сталеплавильне виробництво*. Київ: Вища школа.
- Білецький, В. С. (2021). *Корисні копалини. Україна. 30 років незалежності стислий довідник*, ред. А. М. Киридон., 175-178. Київ: Енциклопедичне видавництво. Retrieved from <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/55551>
- Бойченко, Б. М., Охотський В. Б., & Харлашин, П. С. (2006). *Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, рециркуляція матеріалів і екологія*. Д: РВА“Дніпро-ВАЛ”.
- Григор'єв, В. П., Нечкін, Ю. М., Єгоров, А. В., & Нікольський, Л. Є. (1995). *Конструкції і проектування агрегатів сталеплавильного виробництва*. М: МІСІС.
- Кочанов, К. С. (1977). *Инструкция по кладке и футеровке промышленных печей ВСН 367-76 ММСС центральное бюро научно-технической информации*, 1-37. М: “Металлургия”.
- Свинолобов, Н. П., & Бровкин, В. Л. (2002). *Теоретические основы металлургической теплотехники*. Д: “Пороги”.
- Стрелов, К. К. (1985). *Теоретические основы технологии огнеупорных материалов*. М: “Металлургия”.
- Хобта, А. С., Лукьянов, А. В., Боганов, О. Н., Черный, А. А., & Яровой, С. Н. (2007). *Анализ стойкости сводовых огнеупоров на двухванных сталеплавильных агрегатах. Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць Національної металургійної академії України*, 287-297. Д: «ПП Грек О.С.».

ГЕТЕРОГЕННИЙ ПРОЦЕС СОНО-ФЕНТОН ДЛЯ ДЕГРАДАЦІЇ ЛЕВОМІЦЕТИНУ

Сухацький Ю.В., Національний університет «Львівська політехніка», к.т.н.,
асистент кафедри ХТНР, Україна

Шепіда М.В., Національний університет «Львівська політехніка», к.т.н.,
інженер I-ї категорії кафедри ХТНР, Україна

Знак З.О., Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., завідувач
кафедри ХТНР, Україна

Abstract

The advantages of sodium percarbonate as a “solid hydrogen peroxide carrier” compared to hydrogen peroxide in the liquid phase were considered. The disadvantages of the Fenton process and possible ways to overcome them, in particular the use of hydroxylamine reductant, were analyzed. For the effective oxidative degradation of the N-containing antibiotic chloramphenicol, it was proposed to use the heterogeneous process of sono-Fenton – ultrasonic cavitation/ $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{nanoparticles})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$. Rational conditions for degradation of chloramphenicol were established: the concentration of chloramphenicol – 50 mg/dm^3 ($1.548\cdot 10^{-4} \text{ mol/dm}^3$); the molar ratio of chloramphenicol: $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}:\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{nanoparticles}):\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2=1:100:100:100$; the volume of the reaction medium is 200 cm^3 ; $\text{pH}=3.0$; the temperature of the reaction medium is 298 K ; the specific power of ultrasonic cavitation treatment is 53.3 W/dm^3 . Under such conditions, during 7200 seconds of treatment, the degradation degree of chloramphenicol was 70.7 %, and the oxidative degradation rate constant was $7.492\cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. The synergistic effect, which was caused by the combination of ultrasonic cavitation and the heterogeneous Fenton process $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{nanoparticles})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1.5\text{H}_2\text{O}_2$, was characterized by the value of the synergistic coefficient, which was equal to 17.9.

Вступ

Натрію перкарбонат ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$) є джерелом “твердого гідрогену пероксиду”. Теоретична концентрація активного кисню в натрію перкарбонаті становить 15,3°% мас. (Du and Liu, 2014; Pesman, Imamoglu, Kalyoncu & Kırıcı, 2014). Мікрогранули натрію перкарбонату термічно стабільні за кімнатної температури, а його термічний розклад починається за температури понад 373 К. Розчинність $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ у воді ~ 1 моль/дм³, а рН його 1 %-го водного розчину $\sim 10,5$ (Zhang, Kuang, Teng, Fan & Ma, 2021). Проміжними продуктами дисоціації натрію перкарбонату у воді є натрію карбонат та гідрогену пероксид (Forwood, Harris, Landos & Deveney, 2015).

Високий окиснювальний потенціал натрію перкарбонату (1,8 В) (Yu et al., 2021) зумовлює його використання для окиснення органічних поллютантів водних середовищ, як компоненту пральних порошків й антисептичних засобів (Zhang et al., 2021), для пригнічення активності мікроорганізмів (Więskol-Ryk, Białecka and Thomas, 2020; Srisaikham, Isobe and Saksombat, 2017), як лікувального засобу для боротьби з ектопаразитарними інфекціями риб (Forwood et al., 2015). Іншими напрямками застосування окиснювальної дії натрію перкарбонату є такі: запобігання евтрофікації водойм (Thoo, Siuda and Jasser, 2020); зменшення мутності фільтрату звалищ перед його обробленням ультрафіолетовим (УФ) випромінюванням (Iskander, Novak, Brazil & He, 2017); зменшення обростання мембран водоростями у мембранних технологіях очищення води (Cheng et al., 2021). Крім того, натрію перкарбонат використовують як католіт під час опріснення води (Febriana et al., 2020).

Натрію перкарбонат як носій “твердого H_2O_2 ”, порівняно з гідрогену пероксидом у рідкій фазі, володіє низкою переваг: 1) більшою стабільністю (Pimentel et al., 2021); 2) втричі меншими витратами на зберігання і транспортування (Liu et al., 2021; Ling et al., 2021; Dangi, Urynowicz, Schultz & Budhathoki, 2022); 3) більшою адаптованістю до ефективної роботи у широкому діапазоні значень рН (Sablas et al., 2020; Hung et al., 2022). Продукти розкладу $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$, до яких належать CO_2 , H_2O і Na_2CO_3 , – не токсичні. Крім того,

вони наявні у водних екосистемах (Mohammadi, Moussavi, Yaghmaeian & Giannakis, 2022). Тому високою ефективністю у процесах водоочищення будуть відзначатись комбінації натрію перкарбонату з біоремедіацією (Yue-Hua, Chun-Mei and Chang-Hong, 2011).

Нетоксичність для водних екосистем, здатність до каталітичної активації й адаптованість до високоефективної роботи у широкому діапазоні значень рН (Liu et al., 2021) є передумовами для успішного впровадження передових процесів окиснення на основі натрію перкарбонату у сучасні технології водопідготовки та водоочищення.

Розрізняють методи гомогенної (активація ультрафіолетовим випромінюванням, електророзрядною плазмою, активація в ультразвуковому полі, йонами металів) та гетерогенної (природними та штучно синтезованими мінералами; наночастинками заліза, іммобілізованими на допоміжні матеріали; наночастинками сполук заліза; біметалевими нанокompозитами; фероценом) активації натрію перкарбонату.

Дія УФ-випромінювання на гідрогену пероксид, який утворюється внаслідок розчинення натрію перкарбонату у воді, зумовлює його розклад з утворенням гідроксильних радикалів (Gao, Duan, O'Shea & Dionysiou, 2020).

Внаслідок застосування передового процесу окиснення $\text{УФ}/\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ впродовж 3600 с було досягнуто ступеня деградації бісфенолу А 87,8 % (Gao et al., 2020). Експериментальні умови: початкова концентрація бісфенолу А – 2 мкмоль/дм³; концентрація $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ – 1 ммоль/дм³; об'єм реакційного середовища – 10 см³; рН середовища – 8,5; інтенсивність УФ-випромінювання – 0,1 мВт/см². Активованій УФ-випромінюванням натрію перкарбонат використовували також для окиснювальної деградації альбендазолу (Ortiz-Marin et al., 2022), аніліну (Li, Guo, Zhang & Yuan, 2022) і нафталену (Qiu, Rao, Wang & Wang, 2021).

Активація $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ вакуумним УФ-випромінюванням з довжинами хвиль 185 і 254 нм дала змогу досягнути ступеня деградації ципрофлосацину гідрохлориду (флюорхінолонового антибіотика) 100 %.

Встановлено, що внесок гідроксильних радикалів у деградацію ципрофлоксацину гідрохлориду становив 77,3 %, внесок карбонатних радикалів – 6,3 % (Mohammadi et al., 2022).

Знебарвлення водного розчину барвника Acid Green 16 (Pieczykolan, Płonka and Barbusiński, 2016) і деградації поліциклічних ароматичних сполук (Kozak and Włodarczyk-Makuła, 2018; Kozak and Włodarczyk-Makuła, 2019) досягали внаслідок застосування модифікованого процесу фото-Фентон, відповідно до якого утворення гідроксильних радикалів відбувається за реакціями (Kozak and Włodarczyk-Makuła, 2018):



Максимальну інтенсивність окиснювальної деградації поллютантів з використанням процесу фото-Фентон спостерігали у кислому середовищі (Pieczykolan et al., 2016).

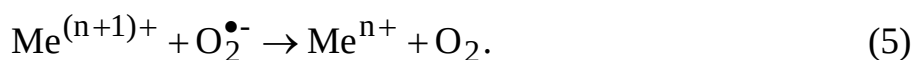
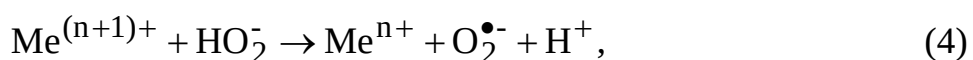
Основний недолік активованих УФ-випромінюванням передових процесів окиснення на основі натрію перкарбонату – обмеженість їх застосування тільки очищенням прозорих водних середовищ, з дуже низьким вмістом завислих частинок.

Під час оброблення імітату стічних вод, що містив антибіотик бактеріостатичної дії – тетрациклін (початкова концентрація – 20 мг/дм³), впродовж 300 с активованим в електророзрядній плазмі за напруги 4,8 кВ натрію перкарбонатом (концентрація – 52 мкмоль/дм³) досягнули ступеня деградації тетрацикліну 94,3 % (Tang et al., 2019). Недолік активації $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ в електророзрядній плазмі – дуже великі витрати енергії для генерування плазмового розряду.

Для окиснювальної деградації антибіотика метронідазолу використовували модифікований процес соно-Фентон – УЗ/Fe²⁺/Na₂CO₃·1,5H₂O₂ (Lin, He, Xu, Fang & Rao, 2020). Як правило, соноактивацію (активацію в ультразвуковому (УЗ) полі) комбінують з іншими видами

активації – найчастіше, з активацією УФ-випромінюванням (Lin et al., 2020; Eslami et al., 2020). Застосування комбінованої (в УЗ-полі та УФ-випромінюванням) активації натрію перкарбонату дало змогу досягнути ступеня деградації барвника (Acid Orange 7) 93,7 %, що було зумовлено посиленням генеруванням гідроксильних радикалів (Eslami et al., 2020).

Процес розкладу гідрогену пероксиду, що утворюється під час розчинення $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ у воді, інтенсифікують шляхом використання як каталізаторів йонів металів (Me^{n+}) (Ma et al., 2020). При цьому механізм розкладу гідрогену пероксиду описують такими рівняннями реакцій:



Швидкість каталітичного розкладу гідрогену пероксиду закономірно зростає зі збільшенням концентрації йонів металу у реакційному середовищі. Метод, який забезпечує збільшення швидкості деградації полютантів та ефективності активації натрію перкарбонату йонами Fe^{2+} , – введення у реакційне середовище різноманітних хелатоутворювальних агентів – лимонної або щавлевої кислот, цистеїну, глутамату. Ці агенти стабілізують концентрацію розчиненого Fe^{2+} у реакційному середовищі (Farooq, Sajid, Shan, Wang & Lyu, 2021; Fu et al., 2022).

До переваг активації $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ йонами металів належать велика швидкість деградації полютантів і широкий діапазон робочих значень рН.

Особливістю методів гетерогенної активації натрію перкарбонату є застосування як каталізаторів розкладу H_2O_2 природних (гематиту, альбіту, каолініту, сепіоліту, кальциту, червоної глини) (Ma et al., 2020) та синтезованих штучно (наприклад, халькопіриту) (Li et al., 2021) мінералів, наночастинок заліза, іммобілізованих на допоміжні матеріали – цеоліт, графену оксид (Danish et al., 2016; Farooq et al., 2017), або наночастинок сполук заліза (наприклад,

Fe₃O₄) (Dai, Liang, Wang & Du, 2019), біметалевих нанокompозитів (Danish et al., 2017; Xu et al., 2020), фероцену (Wang, Tian and Ning, 2014).

Використання мінералу халькопіриту для гетерогенної активації Na₂CO₃·1,5H₂O₂ забезпечило високий ступінь деградації сульфаметазину навіть за нейтрального pH реакційного середовища (Li et al., 2021). Основними реакційними формами, що брали участь у деградації сульфаметазину, були гідроксильні й карбонатні радикали, супероксидний аніон-радикал і синглетний кисень.

Наночастинки заліза – джерело Fe (II) у модифікованих системах Фентона. Вони можуть регенерувати Fe (III) до Fe (II) за реакцією

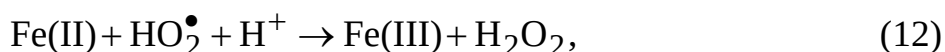
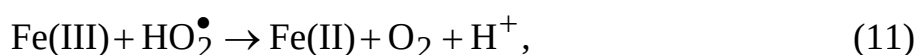
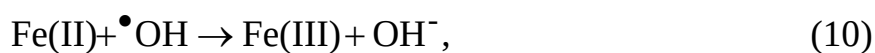
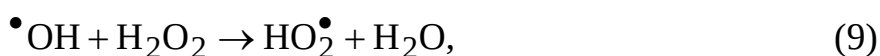
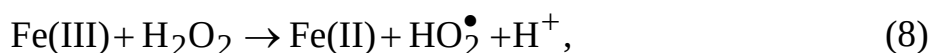
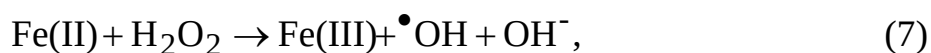


Шляхом іммобілізації наночастинок заліза на допоміжні матеріали (цеоліт, графену оксид) зменшують ймовірність їх агрегації (Danish et al., 2016; Farooq et al., 2017).

Більш стабільними й ефективними каталізаторами у гетерогенних Фентон-подібних системах окиснення, порівняно із наночастинками заліза, є біметалеві нанокompозити: цеоліт-Fe⁰-Cu⁰, цеоліт-Fe⁰-Ni⁰ (Danish et al., 2017), Fe₃O₄-CuO (Xu et al., 2020).

Потужне джерело йонів Fe²⁺ – нетоксична, високостабільна у водних середовищах металоорганічна сполука фероцен (Fe(C₅H₅)₂) (Wang et al., 2014).

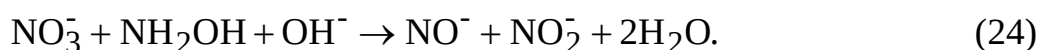
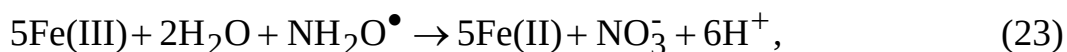
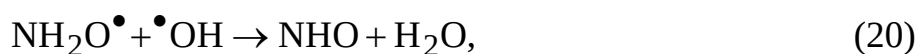
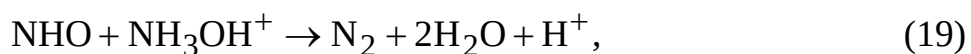
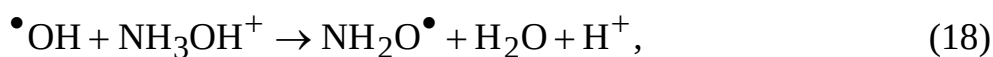
Процес Фентона є найдавнішим передовим процесом окиснення. Механізм процесу Фентона описують такими рівняннями реакцій:





Однак, для процесу Фентона притаманні певні недоліки, які обмежують його широке використання. До таких недоліків належать, насамперед: вузький діапазон робочих значень рН (найчастіше, рН=3...4), значна витрата гідрогену пероксиду, накопичення осадів сполук Fe (III).

Гідроксиламін – відновник, який з дуже малою швидкістю взаємодіє з гідроксильними радикалами і може відновлювати Fe (III) до Fe (II). Гідроксиламін має два значення pK_a 5,96 і 13,74 (Chen et al., 2015). Протонована форма гідроксиламіну (NH_3OH^+) є домінантною за $pH < 5$, а непротонована форма (NH_2OH) є основною за $pH = 7 \dots 12$. NO_3^- і N_2O були домінантними продуктами розкладу гідроксиламіну в процесі Фентона (Chen et al., 2011). Результати інших досліджень свідчили, що N_2 , N_2O , NO_3^- і NO_2^- були кінцевими продуктами відновлення Fe (III) гідроксиламіном (Bengtsson, Fronaeus and Bengtsson-Kloo, 2002; Wang, Yu, Chen & Wang, 2021):



Встановлено, що внаслідок застосування інтегрованої системи $\text{Fe(II)}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_3\text{OH}^+$ впродовж 300 с досягнули ступеня вилучення барвника Basic Fuchsin зі стічних вод 95 % (Merouani et al., 2022). Умови експериментальних досліджень були такими: об'єм реакційного середовища – 200 cm^3 ; pH – 3,0; температура середовища – 298 К; концентрація барвника Basic Fuchsin – $20 \cdot 10^{-6}$ моль/ dm^3 ; $[\text{Fe(II)}]_0$ – 0,05 ммоль/ dm^3 ; $[\text{H}_2\text{O}_2]_0$ – 0,5 ммоль/ dm^3 ; $[\text{NH}_3\text{OH}^+]_0$ – 0,5 ммоль/ dm^3 . Зі збільшенням концентрації гідрогену пероксиду від 0,5 до 0,8 ммоль/ dm^3 за інших ідентичних умов ступінь вилучення барвника Basic Fuchsin зростає від 95 до 100 %.

Мета роботи полягала у дослідженні деградації N-вмісного антибіотика левоміцетину (хлорамфеніколу) з використанням розробленого авторами передового процесу окиснення – гетерогенного процесу соно-Фентон ультразвукова кавітація/ $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ (наночастинки)/ $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$, встановленні кінетичних закономірностей цього процесу, оцінюванні ефективності процесу за значеннями ступенів очищення та синергетичного коефіцієнта.

Методика досліджень

Методика сонохімічного синтезу наночастинок Fe_2O_3

Як прекурсор для сонохімічного синтезу наночастинок Fe_2O_3 використовували водний розчин залізного купоросу ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). До цього розчину за постійної дії ультразвукового (УЗ) поля по краплях додавали водний розчин аміаку ($C=2$ моль/ dm^3) впродовж 600 с. Пристрій для генерування УЗ-кавітації (частота УЗ – 20 кГц) – ультразвуковий випромінювач магнітострикційного типу (Bandelin Sonopuls HD 2200.2 (Німеччина)) з потужністю 60 Вт. Отриманий осад відділяли центрифугуванням, промивали дистильованою водою і піддавали прокалюванню. Температура кальцинації – 500 °С.

Методика окиснювальної деградації антибіотику левоміцетину

Для генерування УЗ-кавітації застосовували випромінювач магнітострикційного типу “Ultrasonic Disintegrator” UD-20 (Польща) з частотою УЗ-коливань 22 кГц. Питому потужність УЗ-оброблення реакційного середовища змінювали у діапазоні від 53,3 до 83,3 Вт/дм³. Кінетичні дослідження окиснювальної деградації антибіотику левоміцетину (концентрація левоміцетину в середовищі – 50 мг/дм³ ($1,548 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³)) з використанням гетерогенного процесу соно-Фентон УЗ/ $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ / Fe_2O_3 (наночастинки)/ $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ здійснювали у термостатованому реакторі ($T=298$ К) за постійного об’єму реакційного середовища – 200 см³ (коефіцієнт заповнення реактора – 67 %). рН реакційного середовища (до значення 3,0) регулювали додаванням водного розчину хлоридної кислоти (концентрація HCl – 1 моль/дм³).

Характеристика синтезованих сонохімічним методом наночастинок Fe_2O_3

СЕМ-фотографію синтезованих сонохімічним методом наночастинок Fe_2O_3 та гістограму їх нормального розподілу за розмірами наведено на рис. 1.

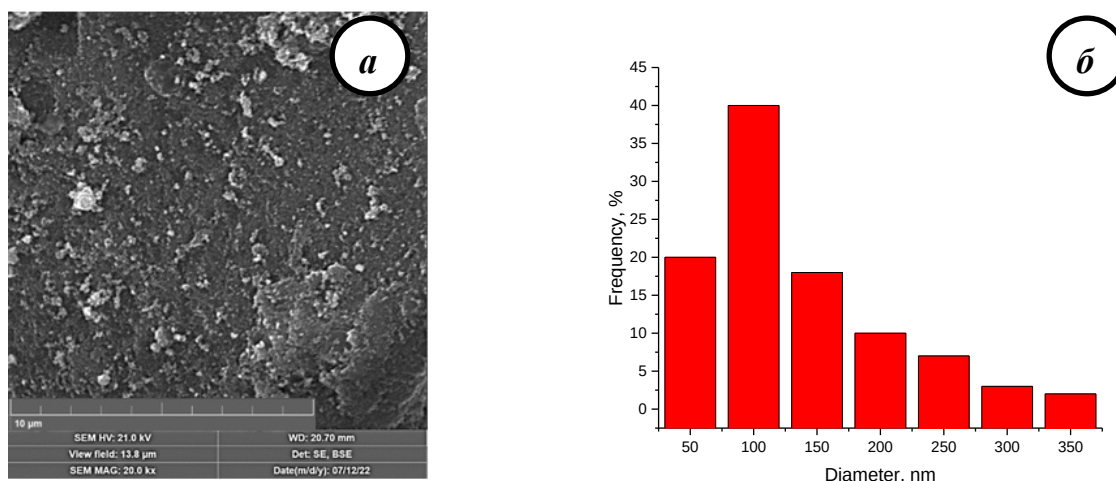


Рис. 1. СЕМ-фотографія (а) та гістограма нормального розподілу за розмірами (б) синтезованих наночастинок Fe_2O_3

Із рис. 1 видно, що розмір 78 % синтезованих сонохімічним методом наночастинок Fe_2O_3 перебуває у діапазоні 50...150 нм.

Методами EDX-спектроскопії (енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії) (рис. 2) та XRD-аналізу (рентгеноструктурного аналізу) (рис. 3) підтверджено, що елементний склад і структура синтезованого продукту відповідає хімічній формулі $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (гематиту).

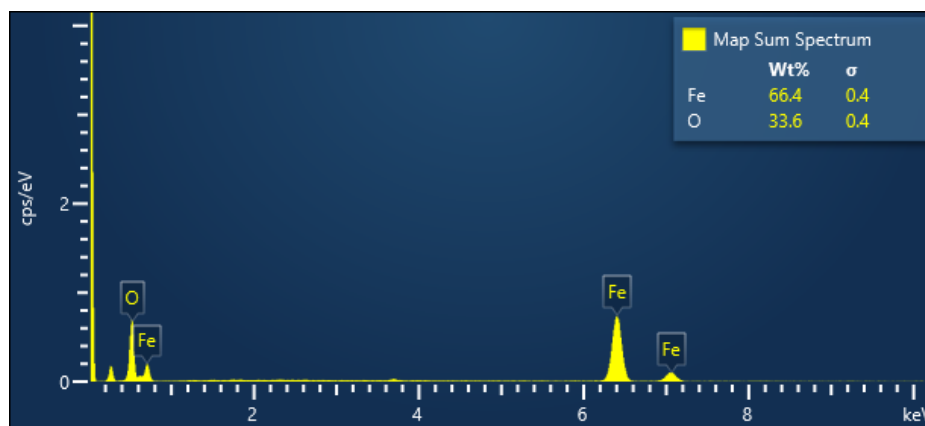


Рис. 2. EDX-спектр синтезованих сонохімічним методом наночастинок Fe_2O_3

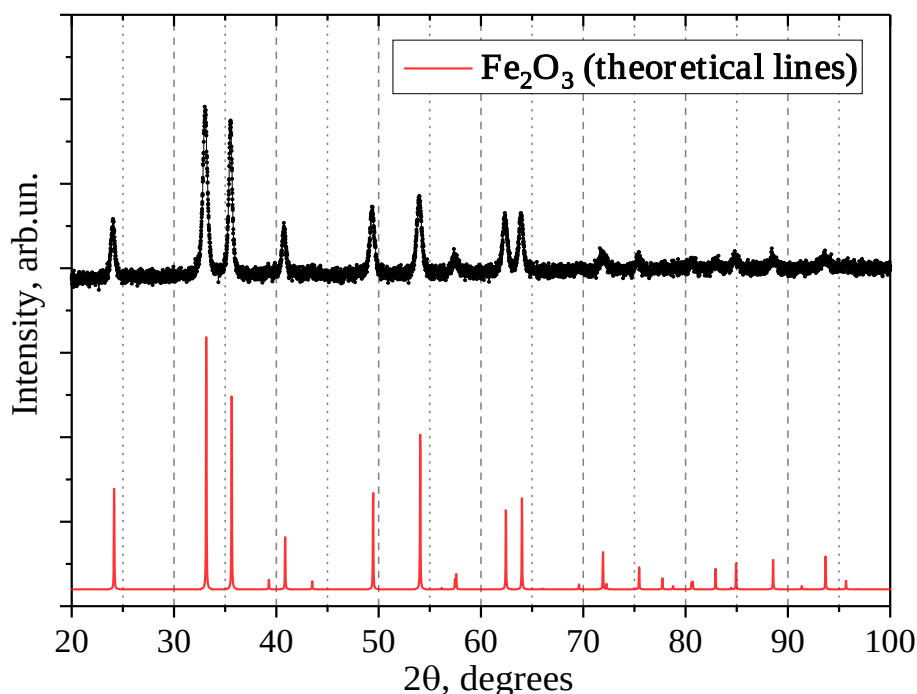


Рис. 3. Дифрактограма синтезованих сонохімічним методом наночастинок Fe_2O_3

Ідентифікована сполука $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (рис. 3) належить до структурного типу Al_2O_3 , тип сингонії – тригональна (ромбоєдрична), просторова група R-3c.

Встановлено раціональні умови окиснювальної деградації антибіотика левоміцетину ($C_{11}H_{12}Cl_2N_2O_5$) з використанням передового процесу окиснення УЗ/ $NH_2OH \cdot HCl/Fe_2O_3$ (наночастинки)/ $Na_2CO_3 \cdot 1,5H_2O_2$: концентрація левоміцетину – 50 мг/дм^3 ($1,548 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3$); мольне співвідношення левоміцетин: $NH_2OH \cdot HCl:Fe_2O_3$ (наночастинки): $Na_2CO_3 \cdot 1,5H_2O_2=1:100:100:100$; питома потужність ультразвукового кавітаційного оброблення – $53,3 \text{ Вт/дм}^3$. За встановлених раціональних умов впродовж 3600 с використання гетерогенного процесу соно-Фентон УЗ/ $NH_2OH \cdot HCl/Fe_2O_3$ (наночастинки)/ $Na_2CO_3 \cdot 1,5H_2O_2$ було досягнуто ступеня деградації левоміцетину 62,0 %. Збільшення тривалості оброблення до 7 200 с зумовлювало підвищення ступеня деградації левоміцетину до 70,7 % (рис. 4).

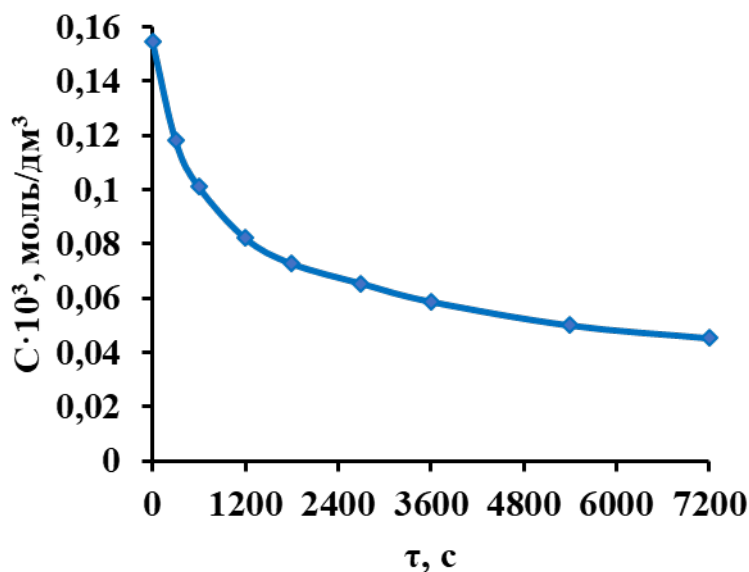


Рис. 4. Кінетична крива окиснювальної деградації левоміцетину з використанням гетерогенного процесу соно-Фентон УЗ/ $NH_2OH \cdot HCl/Fe_2O_3$ (наночастинки)/ $Na_2CO_3 \cdot 1,5H_2O_2$

Результати, які наведено на рис. 5, вказують на те, що деградація левоміцетину з використанням процесу УЗ/ $NH_2OH \cdot HCl/Fe_2O_3$ (наночастинки)/ $Na_2CO_3 \cdot 1,5H_2O_2$ протікає як реакція псевдопершого порядку.

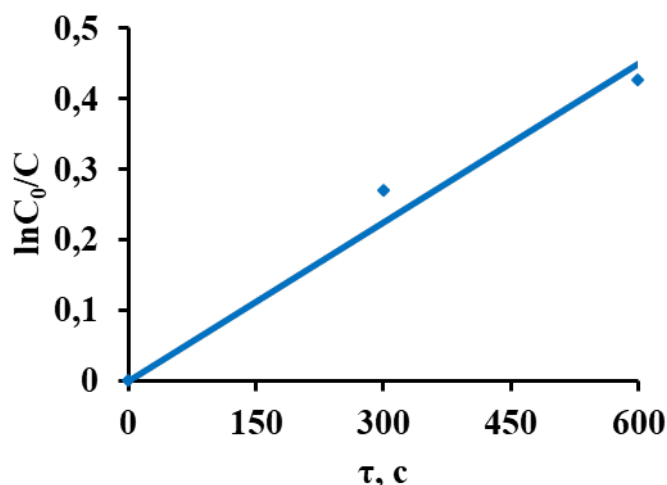


Рис. 5. Лінійна анаморфоза кінетичної кривої окиснювальної деградації левоміцетину з використанням гетерогенного процесу соно-Фентон $\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$

За раціональних умов сумісного ультразвукового і реагентного оброблення ($\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$) константа швидкості окиснювальної деградації левоміцетину дорівнювала $7,492\cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Під час реалізації процесу $\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ окисно-відновний потенціал реакційного середовища (ОВП, мВ) впродовж 7200 с оброблення зростав від 300 до 417 мВ (рис. 6).

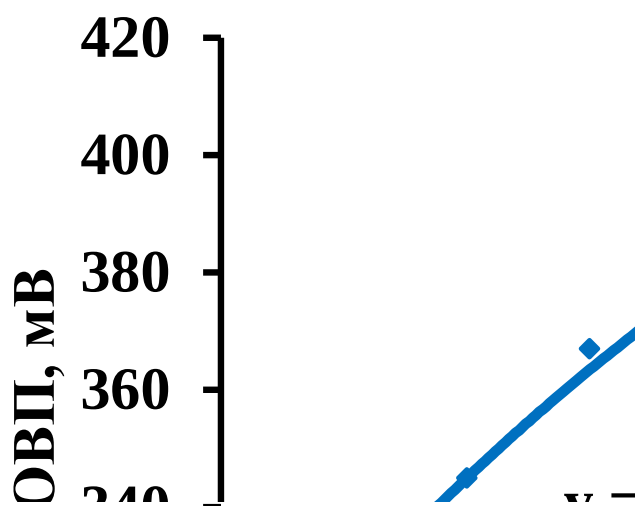


Рис. 6. Залежність окисно-відновного потенціалу (ОВП, мВ) реакційного середовища від тривалості процесу $\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ ($\tau, \text{с}$)

Внаслідок підвищення температури реакційного середовища на 10 К (від 298 до 308 К) ступінь окиснювальної деградації левоміцетину за використання розробленого процесу окиснення $\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ впродовж 3 600 с зростав на 13,1 % (від 62,0 до 75,1 %) (рис. 7). Подальше підвищення температури реакційного середовища до 318 К зумовлювало зростання ступеня деградації левоміцетину ще на 6,9 % (від 75,1 до 82,0 %).

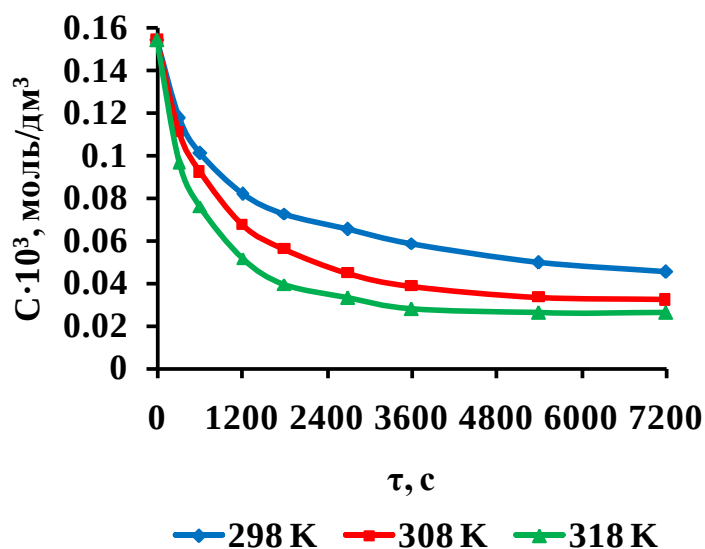


Рис. 7. Вплив температури реакційного середовища на кінетику окиснювальної деградації левоміцетину з використанням гетерогенного процесу соно-Фентон $\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ (експериментальні умови: $C_0(\text{C}_{11}\text{H}_{12}\text{Cl}_2\text{N}_2\text{O}_5)=1,548\cdot 10^{-4}$ моль/дм³, мольне співвідношення $\text{C}_{11}\text{H}_{12}\text{Cl}_2\text{N}_2\text{O}_5:\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}:\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки}):\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2=1:100:100:100$, об'єм реакційного середовища – 200 см³, pH=3,0, питома потужність ультразвукового кавітаційного оброблення – 53,3 Вт/дм³)

Збільшення тривалості оброблення від 3600 до 7200 с призводило до зростання ступеня деградації левоміцетину незалежно від значення температури реакційного середовища. Однак, з підвищенням температури реакційного середовища приріст ступеня окиснювальної деградації левоміцетину зменшувався. Так, внаслідок збільшення тривалості оброблення

від 3 600 до 7 200 с ступінь деградації левоміцетину зростав на: 8,7 % (від 62,0 до 70,7 %) – за температури реакційного середовища 298 К; 4,1 % (від 75,1 до 79,2 %) – за температури реакційного середовища 308 К; 1,1 % (від 82,0 до 83,1 %) – за температури реакційного середовища 318 К (рис. 7).

Підвищення температури реакційного середовища зумовлювало збільшення константи швидкості окиснювальної деградації левоміцетину з використанням гетерогенного процесу соно-Фентон $\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$. Так, зі збільшенням температури середовища від 298 до 308 К константа швидкості зростала в 1,2 рази (від $7,492\cdot 10^{-4}$ до $9,062\cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$). Подальше підвищення температури реакційного середовища від 308 до 318 К призводило до збільшення константи швидкості в 1,4 рази (від $9,062\cdot 10^{-4}$ до $1,253\cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) (рис. 8).

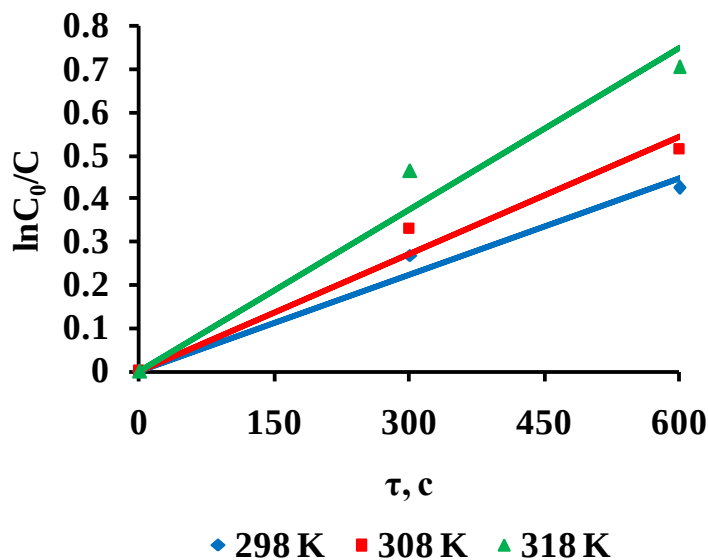


Рис. 8. Лінійні анаморфози кінетичних кривих окиснювальної деградації левоміцетину з використанням гетерогенного процесу соно-Фентон $\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ (вплив температури реакційного середовища)

(експериментальні умови: $C_0(\text{C}_{11}\text{H}_{12}\text{Cl}_2\text{N}_2\text{O}_5)=1,548\cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3$, мольне співвідношення $\text{C}_{11}\text{H}_{12}\text{Cl}_2\text{N}_2\text{O}_5:\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}:\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки}):\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2=1:100:100:100$, об'єм реакційного середовища – 200 см³, рН=3,0, питома потужність ультразвукового кавітаційного оброблення – 53,3 Вт/дм³)

На підставі залежності, яку наведено на рис. 9, розраховано значення енергії активації (E_a) окиснювальної деградації левоміцетину з використанням гетерогенного процесу соно-Фентон $\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$

$$E_a = -Rt\text{tg}\alpha = -8,314 \cdot (-2429,095) \approx 20195 \text{ Дж/моль}, \quad (25)$$

де R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К) ($R=8,314$ Дж/(моль·К)); $\text{tg } \alpha$ – тангенс кута нахилу прямої $\ln k=f(1/T)$ до осі абсцис, К.

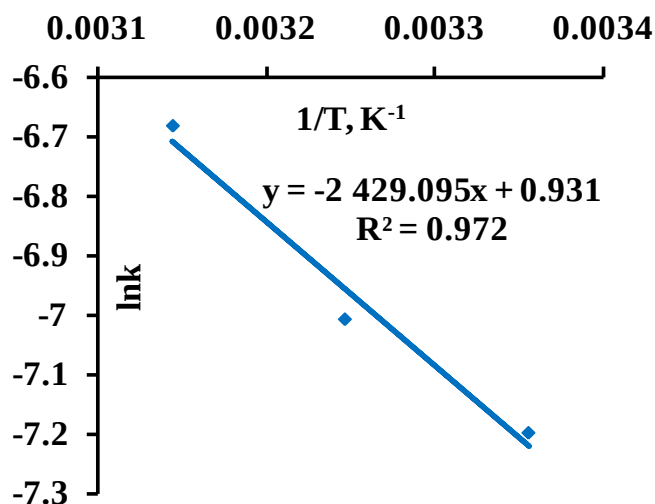


Рис. 9. Залежність $\ln k$ від $1/T$

Встановлено, що ступінь деградації левоміцетину з використанням ультразвукового оброблення, процесу $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ та комбінованого процесу $\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ впродовж 7200 с дорівнював відповідно 2,9; 37,9 і 70,7 %.

Константа швидкості деградації левоміцетину з використанням ультразвукового оброблення, процесу $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ та комбінованого процесу $\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ дорівнювала відповідно $3,739 \cdot 10^{-5}$; $4,550 \cdot 10^{-6}$ і $7,492 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ (рис. 10).

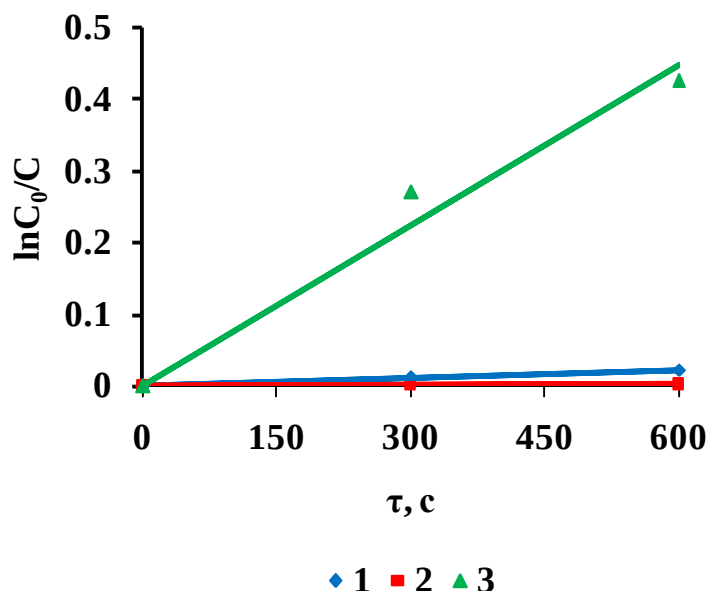


Рис. 10. Лінійні анаморфози кінетичних кривих окиснювальної деградації левоміцетину з використанням:

1 – ультразвукового кавітаційного оброблення; 2 – гетерогенного процесу Фентона $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$; 3 – гетерогенного процесу соно-Фентон $\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$
(експериментальні умови: $C_0(\text{C}_{11}\text{H}_{12}\text{Cl}_2\text{N}_2\text{O}_5)=1,548\cdot 10^{-4}$ моль/дм³,
мольне співвідношення $\text{C}_{11}\text{H}_{12}\text{Cl}_2\text{N}_2\text{O}_5:\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}:\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки}):\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2=$
 $=1:100:100:100$, об'єм реакційного середовища – 200 см³, рН=3,0, Т=298 К, питома
потужність ультразвукового кавітаційного оброблення – 53,3 Вт/дм³)

Синергетичний ефект, зумовлений комбінацією дії ультразвукової кавітації та гетерогенного процесу Фентона $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$, охарактеризовано значенням синергетичного коефіцієнта (f), який обчислювали на основі значень констант швидкості деградації левоміцетину для індивідуальних процесів

$$f = \frac{k_{\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{nano})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2}}{k_{\text{УЗ}} + k_{\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{nano})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2}} = \frac{7,492 \cdot 10^{-4}}{3,739 \cdot 10^{-5} + 4,550 \cdot 10^{-6}} = 17,9. \quad (26)$$

Отже, запропонований комбінований передовий процес окиснення ($\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$) є значно інтенсивнішим та ефективнішим, порівняно з індивідуальними процесами, які використали для

його розроблення. Це підтверджено значеннями коефіцієнта синергізму та ступеня окиснювальної деградації левоміцетину.

Висновки

Раціональними умовами окиснювальної деградації N-вмісного антибіотика левоміцетину (хлорамфеніколу) з використанням передового процесу окиснення $\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ були такі: концентрація левоміцетину ($\text{C}_{11}\text{H}_{12}\text{Cl}_2\text{N}_2\text{O}_5$) – 50 мг/дм³ ($1,548\cdot 10^{-4}$ моль/дм³); мольне співвідношення левоміцетин: $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}:\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки}):\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2=1:100:100:100$; об'єм реакційного середовища – 200 см³; рН=3,0; температура реакційного середовища – 298 К; питома потужність ультразвукового кавітаційного оброблення – 53,3 Вт/дм³. За таких умов впродовж 7200 с досягнули ступеня деградації левоміцетину 70,7 %. Ступінь деградації левоміцетину з використанням ультразвукового оброблення, процесу $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ та комбінованого процесу $\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ впродовж 7200 с дорівнював відповідно 2,9; 37,9 і 70,7 %. Підвищення температури реакційного середовища від 298 до 318 К за інших ідентичних умов експериментальних досліджень призводило до збільшення ступеня деградації левоміцетину від 70,7 до 83,1 %.

Синергетичний ефект, зумовлений комбінацією дії ультразвукової кавітації та гетерогенного процесу Фентона $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$, охарактеризовано значенням синергетичного коефіцієнта, який дорівнював 17,9.

Отже, запропонований комбінований передовий процес окиснення ($\text{УЗ}/\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}/\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{наночастинки})/\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$) є значно інтенсивнішим та ефективнішим, порівняно з індивідуальними процесами, які використали для його розроблення. Це підтверджено значеннями коефіцієнта синергізму та ступеня окиснювальної деградації левоміцетину.

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України у межах проєкту наукової роботи молодих вчених “Передові процеси окиснення, зокрема нанокаталітичного, в основі кавітаційних технологій очищення водних середовищ від резистентних N-заміщених органічних сполук” (номер державної реєстрації 0122U000790).

Список літератури

- Bengtsson, G., Fronæus, S., & Bengtsson-Kloo, L. (2002). The kinetics and mechanism of oxidation of hydroxylamine by iron(III). *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*, 12, 2548-2552.
- Chen, L., Li, X., Zhang, J., Fang, J., Huang, Y., Wang, P., & Ma, J. (2015). Production of hydroxyl radical via the activation of hydrogen peroxide by hydroxylamine. *Environmental Science & Technology*, 49, 10373-10379.
- Chen, L., Ma, J., Li, X., Zhang, J., Fang, J., Guan, Y., & Xie, P. (2011). Strong enhancement on Fenton oxidation by addition of hydroxylamine to accelerate the Ferric and Ferrous iron cycles. *Environmental Science & Technology*, 45, 3925-3930.
- Cheng, X., Lian, J., Ren, Z., Hou, C., Jin, Y., Zhang, L., Zhu, X., Luo, C., Wu, D., & Liang, H. (2021). Coupling sodium percarbonate (SPC) oxidation and coagulation for membrane fouling mitigation in algae-laden water treatment. *Water Research*, 204, Article ID 117622. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117622>
- Dai, Z., Liang, L., Wang, M., & Du, E. (2019). Degradation of DDTs by nano Fe₃O₄/sodium percarbonate and their degradation products. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 39 (4), 1183-1190.
- Dangi, M. B., Urynowicz, M. A., Schultz, C. L., & Budhathoki, S. (2022). A comparison of the soil natural oxidant demand exerted by permanganate, hydrogen peroxide, sodium persulfate, and sodium percarbonate. *Environmental Challenges*, 7, Article ID 100456. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100456>

- Danish, M., Gu, X., Lu, S., Ahmad, A., Naqvi, M., Farooq, U., Zhang, X., Fu, X., Miao, Z., & Xue, Y. (2017). Efficient transformation of trichloroethylene activated through sodium percarbonate using heterogeneous zeolite supported nano zero valent iron-copper bimetallic composite. *Chemical Engineering Journal*, 308, 396-407.
- Danish, M., Gu, X., Lu, S., Xu, M., Zhang, X., Fu, X., Xue, Y., Miao, Z., Naqvi, M., & Nasir, M. (2016). Role of reactive oxygen species and effect of solution matrix in trichloroethylene degradation from aqueous solution by zeolite-supported nano iron as percarbonate activator. *Research on Chemical Intermediates*, 42 (9), 6959-6973.
- Du, C. H., & Liu, J. R. (2014). A new utilization approach of natural soda ash: to manufacture sodium percarbonate. *Latin American Applied Research*, 44 (2), 179-183. Retrieved from http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0327-07932014000200012
- Eslami, A., Mehdipour, F., Lin, K. -Y. A., Maleksari, H. S., Mirzaei, F., & Ghanbari, F. (2020). Sono-photo activation of percarbonate for the degradation of organic dye: The effect of water matrix and identification of by-products. *Journal of Water Process Engineering*, 33, Article ID 100998. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100998>
- Farooq, U., Danish, M., Lu, S., Naqvi, M., Gu, X., Fu, X., Zhang, X., & Nasir, M. (2017). Synthesis of nZVI@reduced graphene oxide: an efficient catalyst for degradation of 1,1,1-trichloroethane (TCA) in percarbonate system. *Research on Chemical Intermediates*, 43 (5), 3219-3236.
- Farooq, U., Sajid, M., Shan, A., Wang, X., & Lyu, S. (2021). Role of cysteine in enhanced degradation of trichloroethane under ferrous percarbonate system. *Chemical Engineering Journal*, 423, Article ID 130221. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130221>

- Febriana, T. A., Khairiza, M. R., Maulina, R., Utami, T. S., Arbianti, R., & Hermansyah, H. (2020). Concentration optimization of sodium percarbonate as buffering catholyte on stacked microbial desalination cell by utilizing tofu wastewater as a substrate. *Engineering Journal*, 24 (4), 217-228.
- Forwood, J. M., Harris, J. O., Landos, M., & Deveney, M. R. (2015). Histological evaluation of sodium percarbonate exposure on the gills of rainbow trout. *Diseases of Aquatic Organisms*, 114, 263-268.
- Fu, X., Wei, X., Zhang, W., Yan, W., Wei, P., & Lyu, S. (2022). Enhanced effects of reducing agent on oxalate chelated Fe(II) catalyzed percarbonate system for benzene degradation. *Water Supply*, 22 (1), 208-219.
- Gao, J., Duan, X., O'Shea, K., & Dionysiou, D. D. (2020). Degradation and transformation of bisphenol A in UV/sodium percarbonate: Dual role of carbonate radical anion. *Water Research*, 171, Article ID 115394. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115394>
- Hung, C.-M., Chen, C.-W., Huang, C.-P., Tsai, M.-L., Wu, C.-H., Lin, Y.-L., Cheng, Y.-R., & Dong, C.-D. (2022). Efficacy and cytotoxicity of engineered ferromanganese-bearing sludge-derived biochar for percarbonate-induced phthalate ester degradation. *Journal of Hazardous Materials*, 422, Article ID 126922. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126922>
- Iskander, S. M., Novak, J., Brazil, B. & He, Z. (2017). Percarbonate oxidation of landfill leachate towards removal of ultraviolet quenchers. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 3(6), 1162-1170.
- Kozak, J., & Włodarczyk-Makuła, M. (2019). The use of sodium carbonate-hydrogen peroxide (2/3) in the modified Fenton reaction to degradation PAHs in coke wastewater. *Proceedings*, 16(1), 44-48.
- Kozak, J., & Włodarczyk-Makuła, M. (2018). The use of sodium percarbonate in the Fenton reaction for the PAHs oxidation. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 28(2), 124-139.

- Li, L., Guo, R., Zhang, S., & Yuan, Y. (2022). Sustainable and effective degradation of aniline by sodium percarbonate activated with UV in aqueous solution: Kinetics, mechanism and identification of reactive species. *Environmental Research*, 207, Article ID 112176. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112176>
- Li, Y., Dong, H., Li, L., Xiao, J., Xiao, S., & Jin, Z. (2021). Efficient degradation of sulfamethazine via activation of percarbonate by chalcopyrite. *Water Research*, 202, Article ID 117451. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117451>
- Lin, X., He, J., Xu, L., Fang, Y., & Rao, G. (2020). Degradation of metronidazole by ultrasound-assisted sodium percarbonate activated by ferrous sulfate. *Water Pollution and Treatment*, 8(3), 66-76.
- Ling, X., Deng, J., Ye, C., Cai, A., Ruan, S., Chen, M., & Li, X. (2021). Fe(II)-activated sodium percarbonate for improving sludge dewaterability: Experimental and theoretical investigation combined with the evaluation of subsequent utilization. *Science of the Total Environment*, 799, Article ID 149382. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149382>
- Liu, X., He, S., Yang, Y., Yao, B., Tang, Y., Luo, L., Zhi, D., Wan, Z., Wang, L., & Zhou, Y. (2021). A review on percarbonate-based advanced oxidation processes for remediation of organic compounds in water. *Environmental Research*, 200, Article ID 111371. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111371>
- Ma, J., Yang, X., Jiang, X., Wen, J., Li, J., Zhong, Y., Chi, L., & Wang, Y. (2020). Percarbonate persistence under different water chemistry conditions. *Chemical Engineering Journal*, 389, Article ID 123422. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123422>
- Merouani, S., Dehane, A., Belghit, A., Hamdaoui, O., Boussalem, N. E. H., & Daif, H. (2022). Removal of persistent textile dyes from wastewater by Fe(II)/H₂O₂/H₃NOH⁺ integrated system: process performance and limitations. *Environmental Science: Advances*, 1, 192-207.

- Mohammadi, S., Moussavi, G., Yaghmaeian, K., & Giannakis, S. (2022). Development of a percarbonate-enhanced Vacuum UV process for simultaneous fluoroquinolone antibiotics removal and fecal bacteria inactivation under a continuous flow mode of operation. *Chemical Engineering Journal*, 431 (2), Article ID 134064. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134064>
- Ortiz-Marin, A. D., Bandala, E. R., Ramírez, K., Moeller-Chávez, G., Pérez-Estrada, L., Ramírez-Pereda, B., & Amabilis-Sosa, L. E. (2022). Kinetic modeling of UV/H₂O₂, UV/sodium percarbonate, and UV/potassium peroxymonosulfate processes for albendazole degradation. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, Article ID 2022-01-08. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11144-021-02152-z>
- Pesman, E., Imamoglu, S., Kalyoncu, E. E., & Kırıcı, H. (2014). The effects of sodium percarbonate and perborate usage on pulping and flotation deinking instead of hydrogen peroxide. *BioResources*, 9(1), 523-536.
- Pieczkolan, B., Płonka, I., & Barbusiński, K. (2016). Discoloration of dye wastewater by modified UV-Fenton process with sodium percarbonate. *Architecture Civil Engineering Environment*, 9(4), 135-140.
- Pimentel, J. A. I., Dong, C.-D., Garcia-Segura, S., Abarca, R. R. M., Chen, C.-W., & de Luna, M. D. G. (2021). Degradation of tetracycline antibiotics by Fe²⁺-catalyzed percarbonate oxidation. *Science of the Total Environment*, 781, Article ID 146411. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146411>
- Qiu, Z., Rao, G., Wang, L., & Wang, L. (2021). Photo-assisted degradation of naphthalene by sodium percarbonate system. *Advances in Environmental Protect*, 11(3), 497-505.
- Sablas, M. M., de Luna, M. D. G., Garcia-Segura, S., Chen, C.-W., Chen, C.-F., & Dong, C.-D. (2020). Percarbonate mediated advanced oxidation completely degrades recalcitrant pesticide imidacloprid: Role of reactive oxygen species and transformation products. *Separation and Purification Technology*, 250, Article ID 117269. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117269>

- Srisaikhram, S., Isobe, N., & Suksombat, W. (2017). The inhibitory effect of sodium thiocyanate and sodium percarbonate ratios on microorganism growth in raw milk samples as an effective treatment to extend milk quality during storage. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 39 (1), 77-89.
- Tang, S., Yuan, D., Rao, Y., Li, M., Shi, G., Gu, J., & Zhang, T. (2019). Percarbonate promoted antibiotic decomposition in dielectric barrier discharge plasma. *Journal of Hazardous Materials*, 366, 669-676.
- Thoo, R., Siuda, W., & Jasser, I. (2020). The effects of sodium percarbonate generated free oxygen on *Daphnia* – Implications for the management of harmful algal blooms. *Water*, 12, 1304-1315.
- Wang, C., Yu, G., Chen, H., & Wang, J. (2021). Degradation of norfloxacin by hydroxylamine enhanced fenton system: Kinetics, mechanism and degradation pathway. *Chemosphere*, 270, Article ID 129408. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129408>
- Wang, Q., Tian, S., & Ning, P. (2014). Ferrocene-catalyzed heterogeneous Fenton-like degradation of Methylene blue: Influence of initial solution pH. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53, 6334-6340.
- Więckol-Ryk, A., Białecka, B., & Thomas, M. (2020). Effect of green oxidizing agent on inhibition of *Escherichia coli* present in livestock wastes. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231(9), 466-481.
- Xu, J., Wang, L., Chen, J.-B., Xu, F., Wang, K.-Q., Hou, Z.-F., & Huang, T.-Y. (2020). Degradation of AO7 with magnetic Fe₃O₄-CuO heterogeneous catalyzed sodium percarbonate system. *Environmental Science*, 41(4), 1734-1742.
- Yu, X., Kamali, M., Aken, P. V., Appels, L., Van der Bruggen, B., & Dewil, R. (2021). Synergistic effects of the combined use of ozone and sodium percarbonate for the oxidative degradation of dichlorvos. *Journal of Water Process Engineering*, 39, Article ID 101721. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101721>

- Yue-Hua, Z., Chun-Mei, X., & Chang-Hong, G. (2011). Application sodium percarbonate to oxidative degradation trichloroethylene contamination in groundwater. *Procedia Environmental Sciences*, 10(B), 1668-1673.
- Zhang, B.-T., Kuang, L., Teng, Y., Fan, M., & Ma, Y. (2021). Application of percarbonate and peroxymonocarbonate in decontamination technologies. *Journal of Environmental Sciences*, 105, 100-115.

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ І МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАГНІТОЧУТЛИВОГО ВУГІЛЛЯ З БУРЯКОВОГО ЖОМУ

Бордун І.М., Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., с.н.с.
кафедри ЕЗП, Україна

Мальований М.С., Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н.,
завідувач кафедри ЕЗП, Україна

Борисюк А.К., Національний університет «Львівська політехніка», провідний
інженер кафедри ПФН, Україна

Нагурський Н.О., Національний університет «Львівська політехніка», аспірант
кафедри ЕЗП, Україна

Abstract

Magnetically sensitive activated carbon from beet pulp was synthesized in the work. A mixture of zinc and iron chlorides was used as an activator. The synthesis was carried out in two ways: direct use of the activator and with preliminary pyrolysis of the raw materials. The morphology of carbon particles was studied using scanning electron microscopy, the structure using X-ray diffraction methods, and the magnetic properties using magnetometry. The distribution of pores in the samples was evaluated using small-angle X-ray scattering. The presence of the Fe_3O_4 magnetite phase, which determines the magnetic properties of the carbon material, was established in both synthesized samples. As a result of magnetic measurements, hysteresis loops were obtained and magnetic parameters of carbons were calculated. The coercive force determined for the synthesized samples corresponds to the average diameter of magnetic moment carriers ~ 25 nm.

Вступ

Магніточутливе активоване вугілля використовують як магнітокеровані адсорбенти, що дозволяє інтенсифікувати процес відділення твердої фази від водного середовища звичайними методами магнітної сепарації (Wang et al.,

2012; Kaur et al., 2014; Rocha et al., 2020). При цьому магнітні та сорбційні властивості модифікованих вуглецевих матеріалів залежать від кількості та складу введених магніточутливих частинок, умов отримання та виду вихідної сировини (Godwin, Pan, Xiao, & Afzal, 2019).

Існуючі способи синтезу магніточутливих адсорбентів можна умовно розділити на два основні типи:

- модифікація промислового активованого вугілля сполуками заліза чи інших феромагнетиків з подальшим відновлювальним відпалом;
- піроліз металополімерів на основі синтетичних смол та інших органічних матеріалів, імпрегнованих солями заліза чи інших феромагнетиків.

До методів синтезу адсорбентів за першим типом відноситься додавання феромагнітних сполук до активованого вугілля. Для введення сполук заліза, які є найдешевшими феромагнетиками, в пори активованого вугілля, проводять багаторазову обробку вихідного вугілля розчинами солей заліза (III) або сумішей солей заліза (II) і заліза (III) з подальшим термічним розкладанням солей у порах активованого вугілля до оксидів заліза.

Другий метод передбачає застосування певного органічного прекурсора, яким можуть бути як відходи сільськогосподарської чи харчової промисловості, так і органовмісні відходи інших виробництв, наприклад, гідролізний і сульфатний лігніни, подрібнені деревні матеріали тощо. Важливо зауважити, що сполуки на основі заліза можуть взаємодіяти з функціональними групами органічного матеріалу (особливо лігніну (Архилин & Богданович, 2016)) вже на стадії підготовки до піролізу. На цей процес значний вплив має рН середовища. Наприклад, з його збільшенням міцність зв'язку між аморфним гідроксидом заліза (III) та функціональними групами органічної частини зростає (Yamashita & Tomita, 1993). При термообробці сполуки заліза, які вводяться в пори, активують вуглецеву матрицю, а самі перетворюються на суміш оксидів і відновленого заліза.

Для отримання магніточутливих адсорбентів необхідно, щоб залізовмісна частина була представлена речовинами, що мають сильні магнітні властивості

або, іншими словами, є феро- чи феримагнетиками. Такі властивості мають α -Fe, магнетит Fe_3O_4 чи маггеміт $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Магнетит та маггеміт мають подібну кристалічну структуру типу шпінелі. Інші оксиди заліза (вюстит – FeO , гематит – $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) мають слабкі магнітні властивості та відносяться до антиферомагнетиків (Тикадзуми, 1983). При температурі понад 727°C у системі залізо – вуглець можливе утворення неферомагнітної фази – аустеніту ($\gamma\text{-Fe}$) (Дьяченко, 1982). Встановлено (Губин, Кокшаров, Хомутов & Юрков, 2005), що величина магнітного поля, в якому досягається насичення, збільшується при зменшенні розмірів частинок і насичення намагніченості ансамблю частинок феромагнетиків різної дисперсності контролюється частинками найменшого розміру.

Як відомо (Сафонова, Титова & Щуревич, 1997), відновлення оксидів заліза протікає за участю вуглецевого залишку в інтервалі температур $400\ldots600^\circ\text{C}$, подальше підвищення температури до 900°C призводить до збільшення частинок відновленої фази і вдосконалення її структури. Одночасно з виникненням фази $\alpha\text{-Fe}$ відбувається формування турбостратного (двовимірно-упорядкованого) вуглецю та впорядкування вуглецевого скелета (Ермоленко, Сафонова & Малашевич, 1972).

Аналіз процесів піролізу органовмісних матеріалів у присутності гідроксиду заліза (III) (Шевченко, Богданович, Кузнецова & Добеле, 1999), показав, що при температурі до 600°C відбувається утворення у продуктах карбонізації тільки Fe_3O_4 . Подальше збільшення температури до $800\ldots900^\circ\text{C}$ призводить до відновлення заліза до FeO і Fe^0 , причому в продуктах карбонізації зафіксовано всі три фази. Вочевидь, у такому випадку проявляється дефіцит органічної вуглецевої складової для повного відновлення магнетиту. Для прекурсора на основі лігніну, що містить гідроксид заліза (III), і який карбонізовано при температурі до 600°C , Fe-складова також представлена Fe_3O_4 , який вже при 700°C повністю відновлюється до FeO . Підвищення температури піролізу до 900°C призводить до подальшого відновлення заліза до Fe^0 (у формі мартенситу). При карбонізації лігніну металеве залізо є

пересиченим розчином α -Fe-C у тетрагональній формі (на відміну від кубічної форми, зазначеної у целюлозних систем), що вказує на специфічність поведінки лігніну при карбонізації та формуванні кристалічних структур заліза.

Таким чином, органічні відходи є перспективною сировиною для отримання магніточутливого вугілля, а використання сполук заліза дозволяє отримати недорогі та ефективні сорбенти з них.

Синтез зразків

Одними зі значних за кількістю відходів сільського господарства є відходи бурякового жому. При середньому виході цукру 10-12 % до маси переробленого буряка утворюється біля 83 % свіжого бурякового жому, 5,4 % меласи, 12 % фільтраційного осаду, 15 % транспортерно-мийного осаду, до 350 % стічних вод тощо. Тобто основним твердим побічним продуктом при отриманні цукру є буряковий жом (Бугаєнко & Тужилкин, 2007). І хоча жом може знайти своє застосування як сировина для синтезу біогазу, корм для худоби, пектиновий концентрат, сировина для харчових волокон, проте велика його кількість залишається не використаною, скисає, що спричинює забруднення довкілля жомокислою водою. Тому як сировину для синтезу магніточутливого активованого вугілля було використано висушений буряковий жом. Жом перед синтезом було механічно подрібнено.

У роботах (Lee & Zaini, 2022; Luo et al., 2022) показано, що для синтезу високоефективних вуглецевих адсорбентів можна використати як активатор суміш хлоридів заліза та цинку. Хлорид цинку сприяє розвитку пористої структури, а хлорид заліза, крім впливу на пористу структуру, спричинює утворення магніточутливих компонентів у вуглецевій матриці.

Для синтезу першого зразка модифікування бурякового жому проводили шляхом послідовного просочення водними розчинами хлоридів заліза та цинку. Масове співвідношення компонентів у суміші для синтезу було наступним – сировина : FeCl_3 : ZnCl_2 = 1:0,5:0,5. Отриману суміш сушили при температурі 100-105 °C до сталої маси, а далі піддавали піролізу в інертній атмосфері

(аргон) при швидкості нагрівання $10\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$ до температури $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ та витримці при кінцевій температурі ~ 90 хв. Отриманий таким способом зразок далі позначатимемо M1.

Другий зразок був синтезованим із використанням передпіролізу. У цьому способі спочатку на першому етапі було здійснено піроліз бурякового жому при температурі $\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ впродовж 90 хв. Далі отриманий карбонізат подрібнювали механічно. Модифікування сировини проводили шляхом послідовного просочення водними розчинами хлоридів заліза та цинку. Масове співвідношення компонентів в зразку Карбонізат : FeCl_3 : ZnCl_2 становило 1:1:1. Такий вміст активатора приблизно відповідатиме вмісту активатора у першому випадку, оскільки орієнтовно $\sim 50\%$ маси сировини втрачається при передпіролізі. Отриману суміш сушити при температурі $100\text{--}105\text{ }^{\circ}\text{C}$ до сталої маси, далі аналогічно піддавали піролізу в інертній атмосфері при швидкості нагрівання $10\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$ до температури $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ та витримці при кінцевій температурі ~ 90 хв. Цей зразок далі позначатимемо M2.

Після охолодження реактора із виготовленим активованим вугіллям зразки виймали і промивали. Промивання зразків M1 і M2 було зроблено за допомогою гарячої ($\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) дистильованої води. Після промивання порошки були відфільтровані та висушені у сушильній шафі за температури $100\text{--}105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Висушені зразки було перетерто у фарфоровій ступці і підготовлено до подальших досліджень.

Методика експериментальних досліджень

Для отримання фотографій синтезованого вугілля був використаний скануючий електронний мікроскоп (СЕМ) з камерою низького вакууму та системою енергодисперсійного мікроаналізу РЕММА-102-02. Цей мікроскоп призначений для безпосереднього дослідження рельєфу поверхні різних матеріалів в твердій фазі і визначення їх елементного складу методом рентгенівського мікроаналізу за енергіями квантів характеристичного рентгенівського випромінювання в режимі низького і високого вакууму. Аналіз

складу синтезованого вугілля проводили додатково із використанням рентгенофлюоресцентного аналізатора ElvaX Pro від компанії «Елватех». Цей спектрометр забезпечує високу точність аналізу, швидкість вимірювання і низькі межі виявлення для широкого діапазону елементів від натрію до урану. Такий діапазон виявлення дещо обмежує кількісний аналіз вуглецевих елементів та оксидів, проте якісні висновки можна зробити з великою певністю.

Рентгенодифракційні криві вуглецевих матеріалів отримано за допомогою дифрактометра ДРОН-3 в $\text{Cu K}\alpha$ -випромінюванні ($\lambda=0,1542$ нм), монохроматизованому відбиванням від площини (002) монокристалу пірографіту. Дифрактограми вимірювали в режимі неперервного сканування детектора з швидкістю 2 град/хв в діапазоні кутів дифракції $2\theta = 5-120^\circ$. Обробку дифракційних спектрів (згладжування, віднімання фону, визначення положень та півширин максимумів, розклад складних максимумів на окремі компоненти) проводили за допомогою пакету програм DHN_PDS.

Вимірювання спектрів малокутового рентгенівського розсіювання (МРРП) проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3 в $\text{Cu-K}\alpha$ -випромінюванні ($\lambda=0,1542$ нм), монохроматизованому відбиванням від площини (200) монокристалу LiF, в режимі проходження пучка рентгенівського випромінювання через зразок. Для обмеження зони паразитного розсіювання монокристала-монохроматора, входних щілин та зменшення інтенсивності фонового розсіювання в повітрі використовували коліматори первинного та розсіяного променів. Використання колімаційної системи дозволяє проводити вимірювання спектрів малокутового розсіювання, починаючи з $s=0,1$ нм⁻¹, де $s = \frac{4\pi}{\lambda} \sin(\vartheta)$ – хвильовий вектор, 2ϑ – кут розсіювання. Перед детектором встановлювали щілину 0,1 мм, що відповідає просторовому розділенню детектора $\Delta 2\vartheta = 0,03^\circ$. Реєстрація розсіяного випромінювання проводилась в режимі сканування кроком $0,05^\circ$, час експозиції $\tau = 125$ с. В отримані криві інтенсивності розсіювання внесена колімаційна поправка на висоту приймальної щілини детектора.

Магнітні вимірювання проводили за допомогою вібраційного магнітометра (Кондир, Борисюк, Паздрій & Швачко, 2004). Калібрування магнітометра здійснювали методом порівняння. В якості еталону використовували чистий непористий нікель з густиною $\rho = 8,9 \text{ г/см}^3$. Реєстрували криві перемагнічування досліджуваних зразків в магнітних полях від $-300 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$ до $+300 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$. Обчислювали кількість магнітної фази в отриманих продуктах за даними вимірювання питомої намагніченості насичення. Питому намагніченість насичення та її температурну залежність вимірювали в магнітному полі напруженістю $800 \text{ кА} \cdot \text{м}^{-1}$.

Результати та обговорення

На рис. 1 показано СЕМ зображення обох синтезованих видів вугілля. Як бачимо з цих фотографій, при одностадійному синтезі (зразок М1) отримуємо більш стійке до механічного перетирання вугілля, тому окремі частинки вугілля є більшими, ніж у вугіллі М2, яке отримано за двостадійною методикою. Крім того, форма частинок також відрізняється – у зразка М2 (рис. 2б) маємо форму частинок більше пластинчасту, а у зразка М1 (рис. 2а) – більш округла форма.

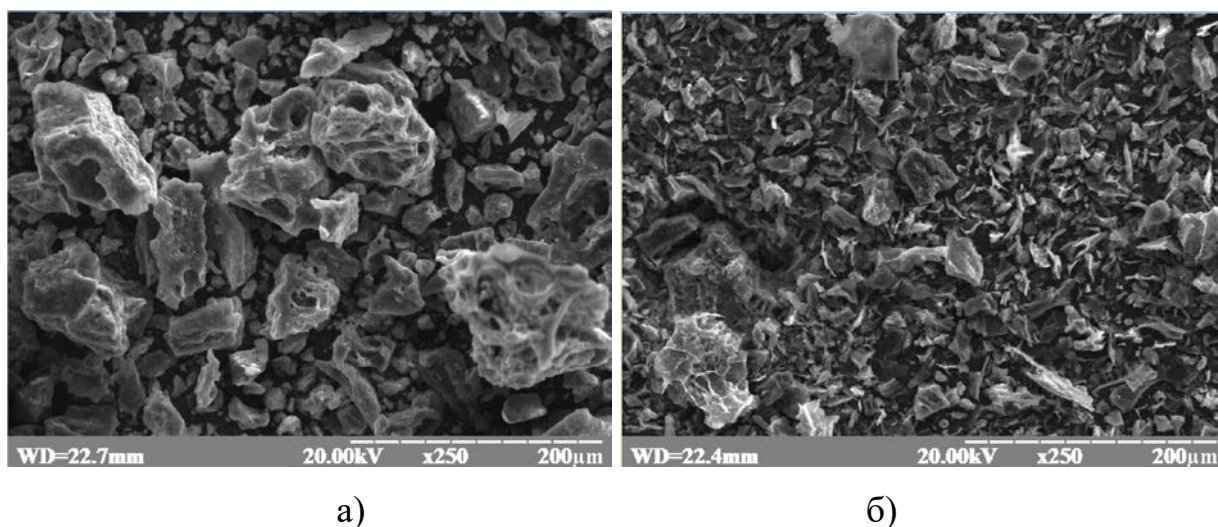


Рис. 1. СЕМ зображення активованого вугілля М1 (а) і М2 (б)

Дослідження елементного складу було проведено з використанням рентгенофлюоресцентного аналізатора ElvaX Pro. Оскільки він дає можливість

проводити визначення вмісту елементів від натрію, то з отриманих протоколів можна зробити висновок лише про відносний вміст іонів активатора у синтезованому вугіллі (табл. 1).

Таблиця 1

Вміст іонів активаторів у синтезованому вугіллі

Зразок	Елемент	Серія	Концентрація
M1	Fe	K	$89,1616 \pm 0,0365\%$
	Zn	K	$9,9029 \pm 0,0333\%$
M2	Fe	K	$72,0311 \pm 0,0542\%$
	Zn	K	$26,8136 \pm 0,0535\%$

Порівнюючи дані у табл. 1, можна зробити висновок про те, що при одностадійному синтезі маємо відносно більший вміст іонів «корисного» активатора – заліза, що дає потенційно кращі магнітні властивості у зразку M1.

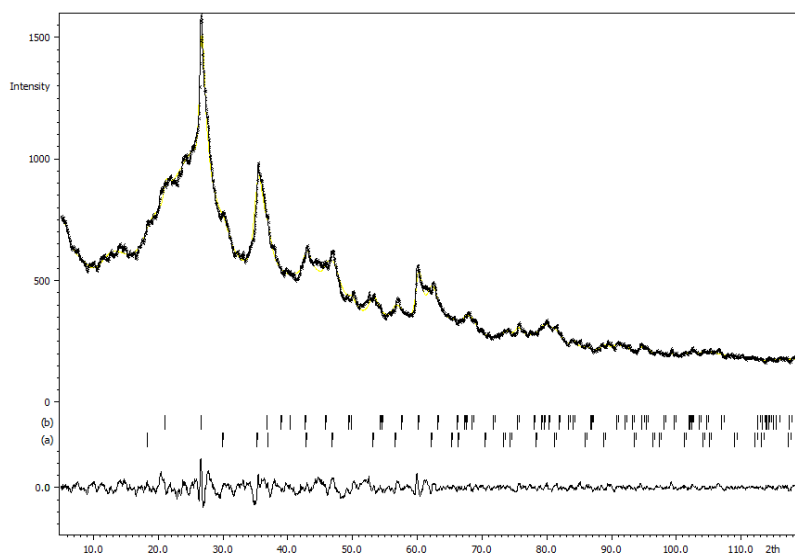


Рис. 2. Повнопрофільний аналіз дифрактограми зразка M1
(a – фаза Fe_3O_4 , b- фаза SiO_2)

Результати структурно-фазового аналізу (рис. 2) виявили присутність у зразку M1 окрім аморфної вуглецевої фази двох кристалічних фаз – α -кварцу SiO_2 та оксиду заліза Fe_3O_4 . Профіль дифракційних максимумів кристалічних фаз описували функцією Лоренца, для якої кутова залежність півширин максимумів має вигляд:

$$FWHM = Lx / \cos(\theta) \quad (1)$$

Отримано наступні значення розмірного фактора (L_x) та параметрів елементарної комірки для обох фазових складових:

$Fe_3O_4 - L_x = 1,929 \pm 0,0185^\circ$, $a = 0,84688 \pm 0,00026$ нм (просторова група Fd-3m)

$SiO_2 - L_x = 1,125 \pm 0,0140^\circ$, $a = 0,49034 \pm 0,00015$ нм, $c = 0,55389 \pm 0,00031$ нм, (просторова група P3221).

Як видно з рис. 2, спостерігається суттєве розширення дифракційних максимумів цих кристалічних фаз, що вказує на нанодисперсний характер фазових складових. Для оцінки розмірів наночастинок використовували формулу Шеррера (Yogamalar, Srinivasan, Vinu, Ariga & Bose, 2009):

$$L = \frac{\lambda}{\beta \cos(\theta)}, \quad (2)$$

де β – інтегральна ширина фізичного розширення максимумів, у випадку апроксимації профілю функцією Лоренца вона дорівнює $\beta = 1,57 \cdot (FWHM - FWHM_o)$, $FWHM_o$ – інструментальний внесок у півширину максимумів ($FWHM_o = 0,3316 \pm 0,0142^\circ$). Як показали результати розрахунків, середній розмір наночастинок для обох кристалічних фаз: $L(Fe_3O_4) \approx 5,5$ нм, $L(SiO_2) \approx 10,0$ нм.

Згідно з результатами аналізу фазового складу в зразку M2 (рис. 3), поряд з карбонізованою вуглецевою фазою (аморфна фаза) спостерігаються максимуми від кристалічних фаз – α -кварцу SiO_2 та оксиду заліза Fe_3O_4 .

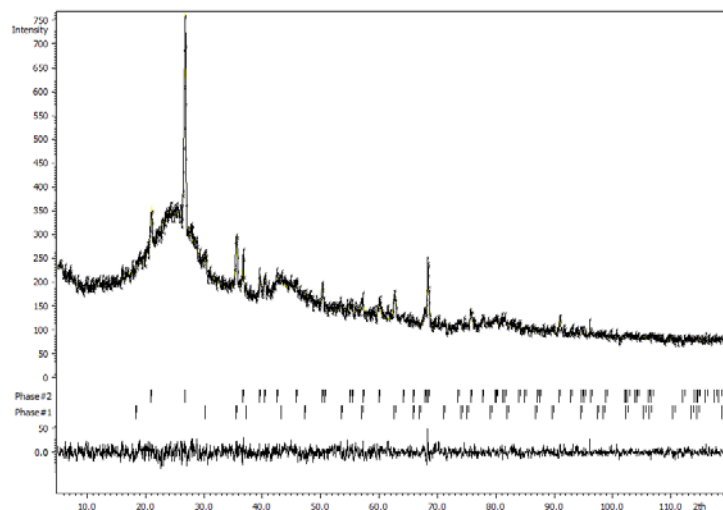


Рис. 3. Повнопрофільний аналіз дифрактограми зразка M2
(Phase#1 – фаза Fe_3O_4 , Phase#2 – фаза SiO_2)

Однак, на відміну від зразка М1, маємо значне звуження максимумів, що вказує на суттєве збільшення розмірів областей когерентного розсіювання в кристалічних фазах. Профіль дифракційних максимумів описували функцією Лоренца, а кутову залежність півширини описували формулою (1). При цьому отримано значно менші значення розмірного параметра L_x :

фаза Fe_3O_4 – $L_x = 0,3769 \pm 0,01527^\circ$,

фаза SiO_2 – $L_x = 0,2297 \pm 0,00603^\circ$.

Уточнені параметри елементарних комірок фаз мають наступні значення:

Fe_3O_4 – $a = 0,84053 \pm 0,00015$ нм;

SiO_2 – $a = 0,49205 \pm 0,00009$ нм, $c = 0,54106 \pm 0,00015$ нм.

За допомогою методу повнопрофільного аналізу з дифрактограми зразка М2 було виділено ту частину дифрактограми, яка відповідає за розсіювання аморфною фазою (рис. 4).

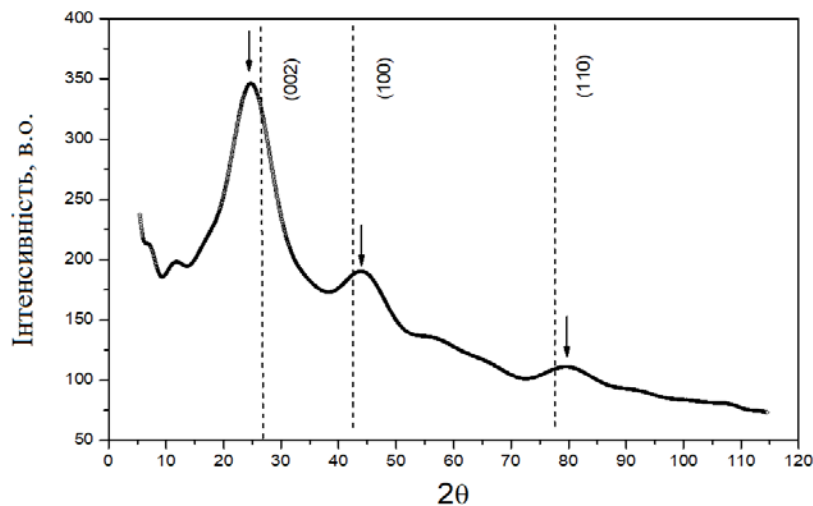


Рис. 4. Крива інтенсивності розсіювання аморфною вуглецевою фазою зразка М2.

Як видно, на кривій інтенсивності спостерігається ряд дифузних максимумів (вказані стрілками), локалізованих поблизу дифракційних ліній (002), (100) та (110) полікристалічного графіту (штрих-пунктирні лінії). Основний максимум вуглецевої фази за кутовим положенням є зміщеним вліво відносно найбільш інтенсивної лінії графіту (002). Поява інтенсивного дифузного максимуму в даному кутовому інтервалі відповідає тривимірній дифракції від областей з графітоподібною структурою, які складаються з

2-3 паралельних графенових шарів. Для оцінки характерних розмірів упорядкованих графітоподібних блоків використовували формулу, яку отримано на основі співвідношення (2):

$$L_c = \frac{\lambda}{\beta_{(002)} \cos(\theta_{002})} \approx 0,8 \div 1,0 \text{ nm}$$

Положення максимуму ($2\theta \approx 24,7^\circ$) відповідає середній відстані між графеновими шарами $d \approx 0,360$ нм, яка перевищує міжплощинну відстань (002) графіту $d_{(002)} \approx 0,335$ нм. Така зміна міжшарової відстані вказує на зменшення густини аморфного матеріалу та атомне розупорядкування структури порівняно з кристалічним аналогом. Два інших дифузних максимуми, локалізованих поблизу кутів $2\theta \approx 44,1^\circ$ та $2\theta \approx 79,6^\circ$, є, навпаки, зміщеними в бік більших кутів розсіювання в порівнянні з лініями (100), (110) полікристалічного графіту. Згідно теорії розсіювання шаруватими структурами, такий результат вказує на існування двохвимірної дифракції від окремих хаотично орієнтованих графенових шарів, а величина зміщення визначається їх ефективним розміром, який оцінили за наступною формулою:

$$L_a = \frac{1,85\lambda}{\beta_{(100)} \cos(\theta_{100})} \approx 1,2 \text{ nm}$$

Вихідні спектри МРРП зразків М1 і М2 наведено на рис. 5 як залежності інтенсивності розсіювання від кута розсіювання 2θ . В експериментальні дані була внесена поправка на фонове розсіювання з урахуванням поглинання в зразку та колімаційна поправка на висоту приймальної щілини детектора.

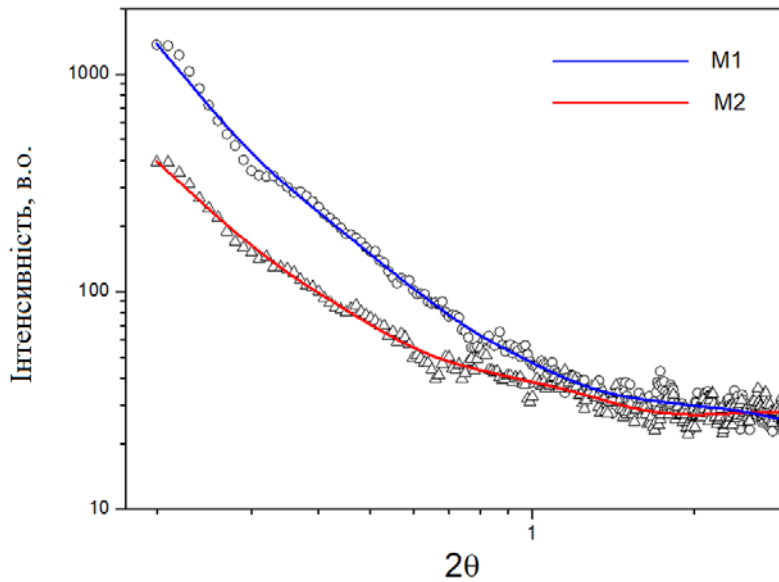


Рис. 5. Вихідні спектри МРРП зразків М1 і М2

(символи Δ і $\circ$ – експериментальні точки, суцільні лінії – криві інтенсивності, згладжені методом сплайн-інтерполяції).

На рис. 6 показано оброблені криві інтенсивності розсіювання, які представлено в подвійних логарифмічних координатах у вигляді залежності інтенсивності від модуля хвильового вектора $s=4\pi/\lambda \cdot \sin(\theta)$, де $\lambda=0,15148$ нм – довжина хвилі $\text{CuK}\alpha$ – випромінювання. Як видно, в інтервалі $s < 0,6 \text{ нм}^{-1}$, зразок М1 характеризується значно більшою інтенсивністю розсіювання, що вказує на домінуючий внесок в розсіювання макроскопічних неоднорідностей (пор). Однак на більших кутах розсіювання, зокрема при $s > 0,6 \div 0,7 \text{ нм}^{-1}$, криві розсіювання обох зразків практично співпадають, що відповідає рівноцінному внеску мікроскопічних неоднорідностей (мікропор) в пористий об'єм обох зразків.

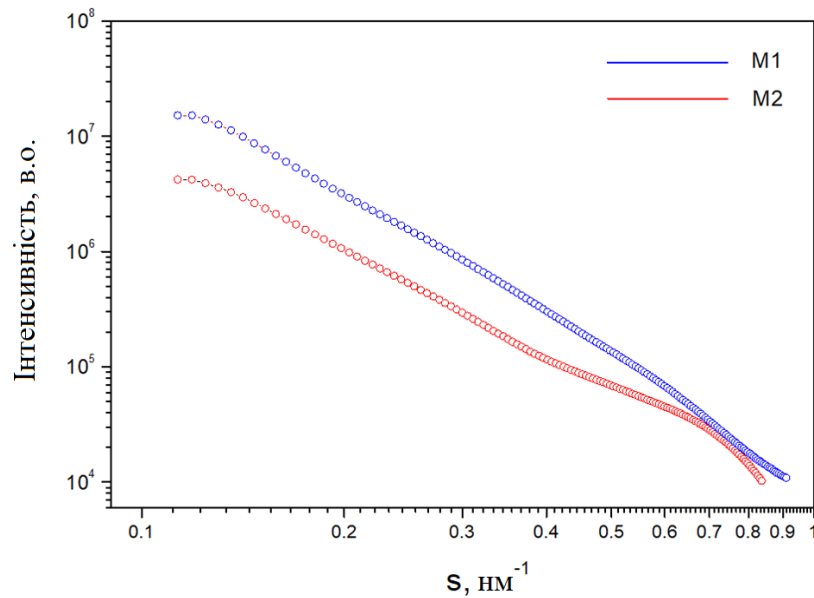


Рис. 6. Оброблені спектри МРРП зразків М1 і М2.

Об'ємні функції розподілу неоднорідностей, отримані методом непрямого Фур'є-перетворення, представлені на рис. 7. На кривій розподілу пор в зразку М1 можна виокремити максимуми, що відповідають мезопорам (можливо, ці неоднорідності можуть відповідати і наночастинкам Fe_3O_4 та SiO_2 , оскільки ці кристалічні фази володіють електронною густиною, відмінною від вуглецевої матриці) з ефективними діаметрами близько 11 та 19 нм. Також присутній широкий максимум, що вказує на формування макроскопічних неоднорідностей з ефективними розмірами до 120 нм.

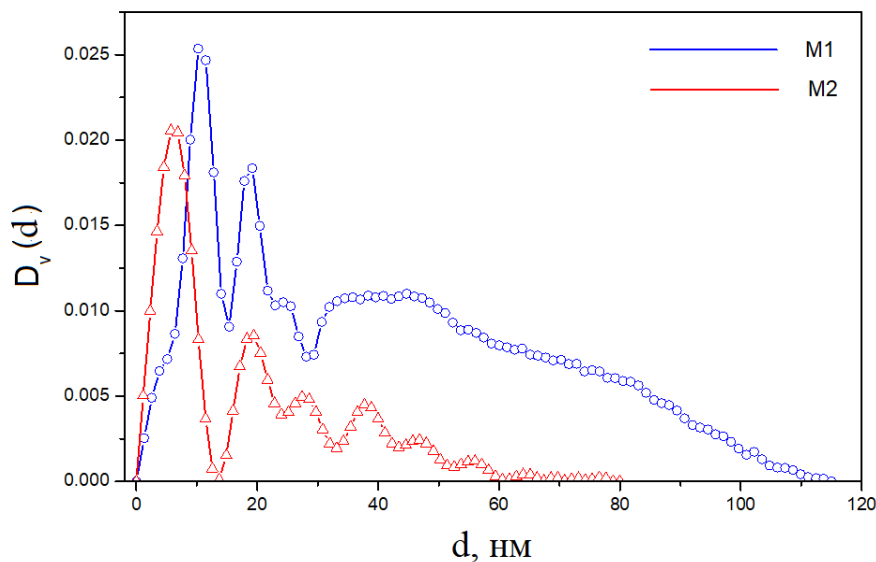


Рис. 7. Об'ємні функції розподілу неоднорідностей (пор) у зразках М1 і М2.

Натомість, у зразку М2 ми практично не спостерігаємо неоднорідностей з діаметром, більшим від 60 нм. На кривій розподілу пор присутній виражений вузький максимум, що відповідає мезопорам з ефективним діаметром 6,5 нм, які вносять основний внесок в пористий об'єм зразка. Крім того, в зразку присутні більш грубомасштабні неоднорідності з ефективними діаметрами від 14 до 60 нм. Слід відзначити значно меншу концентрацію макропор в зразку М2 в порівнянні зі зразком М1, що й спричинює зменшення інтенсивності розсіювання, яке особливо проявляється на менших кутах. Результати кількісного аналізу показали, що в зразку М1 об'ємна частка пор з діаметрами в інтервалі до 14 нм не перевищує 21 % об'єму пористого простору, тоді як в зразку М2 внесок пор вказаних розмірів збільшується до 50 %. На більший розсіювальний об'єм у зразку М1 вказують також значення інтегральних інваріантів розсіювання (інваріант Порода Q_p та константа Порода K_p), з допомогою яких визначається питома площа поверхні пор (S_p). Однак, збільшення відносної частки мікроскопічних пор в зразку М2 призводить до збільшення питомої площі поверхні пор (табл. 2).

Таблиця 2

Параметри зразків М1 і М2 згідно даних МРРП

Зразок	$Q_p \cdot 10^3, \text{нм}^{-3}$	$K_p \cdot 10^4, \text{нм}^{-4}$	$S_p, \text{м}^2/\text{см}^3$
М1	51,1	0,74	455±23
М2	21,3	0.40	583±30

Магнітні властивості синтезованих магніточутливих вуглецевих матеріалів у першу чергу визначали за петлями гістерезису, які показано на рис. 8. З отриманих залежностей було обчислено коерцитивну силу (H_c), залишкову питому намагніченість (σ_r), відносну залишкову намагніченість (σ_r/σ_s), значення яких наведено у табл. 3.

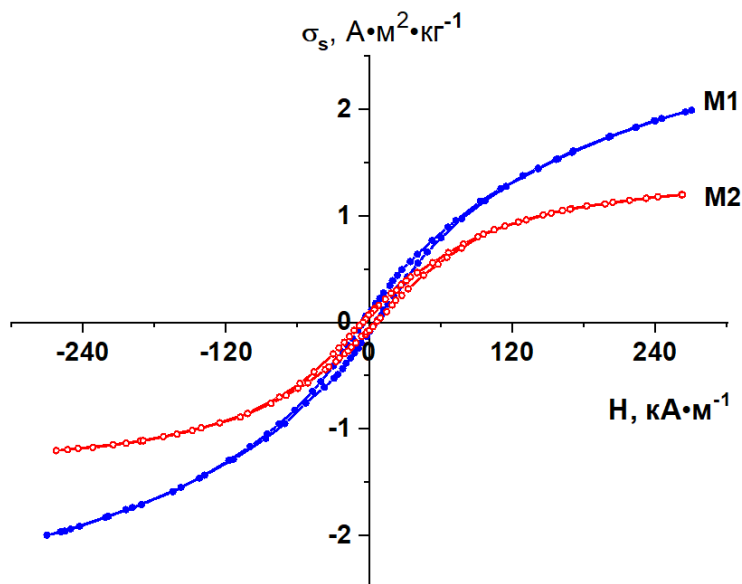


Рис. 8. Петлі гістерезису магнітного моменту зразків M1 (а) і M2 (б).

За даними рентгеноструктурного аналізу магнітні властивості отриманих матеріалів забезпечуються присутністю кубічної шпінелі Fe_3O_4 (магнетиту), котра є феримагнетиком за температур, нижчих за 580°C (Соеу, 2010).

Макроскопічні феримагнітні частинки мають доменну структуру, процес їх переманічування відбувається шляхом зміщення доменних границь, що обумовлює низькі значення H_c . Зменшення розмірів частинок призводить до збільшення значень H_c і при досягненні ними критичного середнього діаметру однодоменого стану D_{SD} отримується максимальне значення H_c , котре забезпечується іншим механізмом переманічування – шляхом обертання магнітного моменту частинок. При подальшому зменшенні розміру частинок H_c зменшується до нульового значення за рахунок зростання ролі теплових флуктуацій магнітного моменту при досягненні частинками критичного розміру суперпарамагнітного стану D_{SP} (Nguyen, Tran, Xu, & Lee, 2021).

Таблиця 3

Магнітні характеристики синтезованих зразків M1 і M2

Зразок	σ_s , $\text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	H_c , $\text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$	σ_r / σ_s	Вміст Fe_3O_4 , % мас.
M1	2,5	5,5	0,04	2,7 %
M2	1,3	5,5	0,06	1,4%

Критичні розміри однодоменності D_{SD} та суперпарамагнітного стану D_{SP} для кімнатних температур визначені експериментально для частинок магнетиту шляхом синтезу їх з широким спектром середнього діаметру та аналізу магнітних властивостей (Krishnan, 2010; Kolhatkar, Jamison, Litvinov, Willson & Lee, 2013), склали 80 нм і в околі 15-20 нм відповідно.

Отримані зразки магніточутливого вугілля демонструють малі значення коерцитивної сили і залишкової намагніченості. Визначена для синтезованих зразків коерцитивна сила за даними (Li et al., 2017) відповідає середньому діаметру носіїв магнітного моменту ~ 25 нм, що незначно перевищує критичний розмір суперпарамагнітного стану. Матеріали практично не виявляють магнітних властивостей без прикладеного зовнішнього магнітного поля, що запобігає агломерації частинок, викликаній взаємним магнітним притяганням. Проте зразки мають чутливу реакцію на зовнішнє магнітне поле.

Величина намагніченості насичення зразків визначається вмістом магнетиту Fe_3O_4 . Приймавши значення питомої намагніченості насичення частинок, яке дорівнює намагніченості масивного магнетиту $92 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ (Coeu, 2010), було обчислено вміст магнетиту в отриманих композитах (табл. 3).

Висновки

Проведені дослідження показали, що використання суміші хлоридів цинку і заліза, як активаторів при синтезі активованого вугілля із органічної сировини, призводить до утворення у структурі вуглецевого матеріалу магніточутливої фази – магнетиту Fe_3O_4 .

Результати поелементного аналізу і магнітні вимірювання показали, що при синтезі активованого вугілля у один етап отримуємо майже у двічі більший вміст магнетиту, ніж при синтезі у два етапи з використанням передпіролізу. А отже, таке вугілля має кращі магнітні властивості, зокрема, більшу питому намагніченість насичення. Проте зразки, синтезовані у два етапи, характеризуються більшим вмістом мікропор, що спричинює зростання питомої площі поверхні до $583 \text{ м}^2/\text{см}^3$ порівняно із $455 \text{ м}^2/\text{см}^3$ у зразків,

синтезованих у один етап. Більша питома площа поверхні дає потенційно кращі адсорбційні властивості для цього виду магніточутливого вугілля. У подальшій роботі планується провести саме такі дослідження.

Список літератури

- Coe, J. (2010). *Magnetism and Magnetic Materials*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511845000.
- Godwin, P. M., Pan, Y., Xiao, H., & Afzal, M. T. (2019). Progress in Preparation and Application of Modified Biochar for Improving Heavy Metal Ion Removal From Wastewater. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 4(1), 31-42, doi:10.21967/jbb.v4i1.180.
- Kaur, R., Hasan, A., Iqbal, N., Alam, S., Saini, M. K., & Raza, S. K. (2014). Synthesis and surface engineering of magnetic nanoparticles for environmental cleanup and pesticide residue analysis: A review. *Journal of Separation Science*, 37(14), 1805-1825. doi:10.1002/jssc.201400256.
- Kolhatkar, A. G., Jamison, A. C., Litvinov, D., Willson, R. C., & Lee, T. R. (2013). Tuning the magnetic properties of nanoparticles. *International journal of molecular sciences*, 14(8), 15977-16009. doi:10.3390/ijms140815977.
- Krishnan, K. M. (2010). Biomedical nanomagnetism: a spin through possibilities in imaging, diagnostics, and therapy. *IEEE transactions on magnetism*, 46(7), 2523-2558. doi:10.1109/tmag.2010.2046907.
- Lee, L. Zh., & Zaini, M. A. A. (2022). One-step ZnCl₂/FeCl₃ composites preparation of magnetic activated carbon for effective adsorption of rhodamine B dye. *Toxin Reviews*, 41(1), 64-81. doi:10.1080/15569543.2020.1837172.
- Luo, Y., Zeng, L., Zhao, Y., Zhao, Zh., Wei, M., Jiang, B., Fan, J., & Li, D. (2022). Roles of ZnCl₂ and FeCl₃ in preparing high performance corn stover-based carbon materials for efficient removal of Cr (VI) from wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102743, doi:10.1016/j.jwpe.2022.102743.

- Li, Q., Kartikowati, Ch. W., Horie, Sh., Ogi, T., Iwaki, T., & Okuyama, K. (2017). Correlation between particle size/domain structure and magnetic properties of highly crystalline Fe_3O_4 nanoparticles. *Scientific reports*, 7.1, 1-7. doi:10.1038/s41598-017-09897-5.
- Nguyen, M. D., Tran, H. V., Xu, S., & Lee, T. R. (2021). Fe_3O_4 Nanoparticles: Structures, synthesis, magnetic properties, surface functionalization, and emerging applications. *Applied Sciences*, 11(23), 11301, doi:10.3390/app112311301.
- Rocha, L. S., Pereira, D., Sousa, É., Otero, M., Esteves, V. I., & Calisto, V. (2020). Recent advances on the development and application of magnetic activated carbon and char for the removal of pharmaceutical compounds from waters: A review. *Science of The Total Environment*, 718, 137272. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137272.
- Wang, T., Liang, L., Wang, R., Jiang, Y., Lin, K., & Sun, J. (2012). Magnetic mesoporous carbon for efficient removal of organic pollutants. *Adsorption*, 18(5-6), 439-444. doi:10.1007/s10450-012-9430-2.
- Yamashita, H., & Tomita, A. (1993). Local structures of metals dispersed on coal. Effect of coal, catalyst precursor, and catalyst preparation method on the structure of iron species during heat treatment and steam gasification. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 32(3), 409-415. doi:10.1021/ie00015a003.
- Yogamalar, R., Srinivasan, R., Vinu, A., Ariga, K., & Bose, A. C. (2009). X-ray peak broadening analysis in ZnO nanoparticles. *Solid State Commun.*, 149(43), 1919-1923. doi:10.1016/j.ssc.2009.07.043.
- Архилин, М. А., & Богданович, Н. И. (2016). Адсорбционные и магнитные свойства магнитовосприимчивых адсорбентов, полученных на основе гидролизного лигнина. *Лесной журнал*, 2, 131-140.
- Бугаенко, И. Ф., & Тужилкин, В. И. (2007). *Общая технология отрасли. Научные основы технологии сахара. Часть 1*. СПб.: ГИОРД.

- Губин, С. П., Кокшаров, Ю. А., Хомутов, Г. Б., & Юрков, Г. Ю. (2005). Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства. *Успехи химии*, 74(6), 539-574. doi:10.1070/RC2005v074n06ABEH000897.
- Дьяченко, С. С. (1982). *Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах*. М.: Металлургия.
- Ермоленко, И. Н., Сафонова, А. М., & Малашевич, Ж. В. (1972). Исследование структуры металлоугольных волокон, полученных на основе солей окисленной целлюлозы. *Изв. АН БССР. Сер. хим. Науки.*, 6, 60-66.
- Кондир, А. І., Борисюк, А. К., Паздрій, І. П., & Швачко, С. Г. (2004). Застосування вібраційного магнітометра для фазового аналізу спеціальних сталей та сплавів. *Вибрації в техніці та технологіях*, 2(34), 41-43.
- Сафонова, А. М., Титова, Л. В., & Щуревич, О. А. (1997). Формирование структуры и свойств углеродных волокон, содержащих биметаллическую фазу: Со-Fe. *Журн. прикладной химии*, 70(2), 237-239.
- Тикадзуми, С. (1983). *Физика ферромагнетизма. Магнитные свойства вещества*. М.: Мир.
- Шевченко, Р. С., Богданович, Н. И., Кузнецова, Л. Н., & Добеле, Г. В. (1999). Формирование сорбционных и магнитных свойств ферромагнитных адсорбентов при пиролизе отходов переработки древесины в присутствии гидроксида железа (III). *Лесной журнал*, 2-3, 142-150.

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF LOCAL WASTEWATER TREATMENT OF THE MEAT PLANTS

Sabliy L., National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, doctor of technical sciences, professor of the department of bioenergy, bioinformatics and environmental biotechnology, Ukraine

Zhukova V., National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ph.D., associate professor of the department of bioenergy, bioinformatics and environmental biotechnology, Ukraine

Abstract

An improved technology for the local treatment of industrial wastewater of a meat plants is proposed for the intensification of cleaning processes and an increase in the efficiency of local treatment of industrial wastewater of a meat plants according to the indicators: COD, synthetic surfactants, phosphates, ammonium nitrogen, fats, and obtaining purified water in accordance with regulatory requirements at discharge into the city sewer. According to the proposed technology, industrial wastewater after the existing grease trap and concentrator is pumped to reactive flotation using an alkaline reagent and coagulant - aluminium sulphate, with the production of coagulant flakes as a result of coagulation, removal of pollutants from water and separation of phases in the form of flotation sludge and sediment and purified water with quality indicators in accordance with regulatory requirements.

Introduction

In Ukraine today, there are many industrial enterprises that do not have their own treatment facilities for preliminary treatment of industrial wastewater, discharge the latter to city treatment facilities, thereby leading to a number of negative phenomena, such as a decrease in the efficiency of their work due to a decrease in the

rate of oxidation of organic substances, cleaning effects and the depth of extraction of individual pollutants, changes in the composition of their oxidation products, etc. However, there are enterprises that provide local wastewater treatment, but the quality of the treated water remains unsatisfactory in comparison with the requirements approved by water utilities, when these wastewaters are discharged into city systems.

Examples of industrial enterprises that have treatment facilities for the preliminary treatment of industrial wastewater are one of the meat plants from Kharkiv. This enterprise specializes in the production of sausages and meat products. The enterprise produces industrial, household and shower wastewater.

The consumption of industrial wastewater at the enterprise is 20 m³/day. For the preliminary mechanical cleaning of industrial wastewater of the enterprise from fats, grease traps are installed at outlets from workshops. A grease trap is also installed in front of the concentrator at local sewage treatment plants. After the grease trap, industrial wastewater enters the concentrator to equalize the consumption and concentration of pollutants. From the concentrator, industrial wastewater is fed to the flotation plant using a pump. After the flotation device, the wastewater is discharged into the city's sewer network.

Household and shower wastewater is diverted from the buildings and workshops of the enterprise through a network of sewage pipelines laid on the territory of the enterprise to the city sewer collector.

Production wastewater of meat plants contains a variety of pollutants that pass into wastewater during the production of sausages and meat products after washing equipment and working premises: fat, suspended substances (small remains of meat, lard, etc.), organic substances (according to indicators of COD and BOD₅), synthetic surface-active substances, phosphates, ammonium nitrogen, etc. pollutants. Detergents containing surface-active substances are used to wash the surfaces of containers and equipment. Phosphates enter wastewater from detergents and meat products. Fats are contained in significant quantities in industrial wastewater due to

the use in the production of lard and fatty meat (Vikneswara, Al-Gheethi & Radin, 2018; Jachimowicz, Cydzik-Kwiatkowska & Szklarz, 2020).

Physical and chemical methods can be used to remove phosphates from wastewater: magnetic separation; chemical deposition; sorption with activated carbon; ion exchange; electrochemical methods, for example, electrocoagulation, and biological methods in anaerobic and aerobic conditions using phosphorus-accumulating microorganisms (Preisner & Smol, 2022; Sabliy & Zhukova, 2022).

The following physical and chemical methods are mostly used to clean wastewater of meat plants from fats (Ji, Riddle, Wang & Price, 2020): coagulation; flocculation (Amuda & Alade, 2006); pressure flotation (Aguilar, Saez, Lorens, Soler & Ortuno, 2003); sorption; ozonisation; electric; membrane methods, etc.

Purpose and methods

The purpose of the work was to investigate the indicators of the composition of industrial wastewater of a meat plant before and after preliminary treatment at local treatment plants, to propose and investigate ways of intensifying flotation treatment using the coagulation method, and to develop an improved technology for pre-treatment of industrial wastewater of a meat plant.

To study the composition at the stages of industrial wastewater treatment, samples were taken at the entrance to the concentrator, after the concentrator and after the flotation device, in the laboratory of the Department of Bioenergy, Bioinformatics and Ecological biotechnology of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute was chemically analysed according to a number of indicators using standard methods of wastewater analysis. Photos of glasses with samples of wastewater at the entrance to the concentrator, after the concentrator and after the floater (in two cases) are shown in fig. 1 and 2. The results of analyses of wastewater samples are shown in table 1.



Fig. 1. Photo of wastewater samples (option 1):
1 - at the input to the averager; 2 – after the
averager; 3 – after the floater

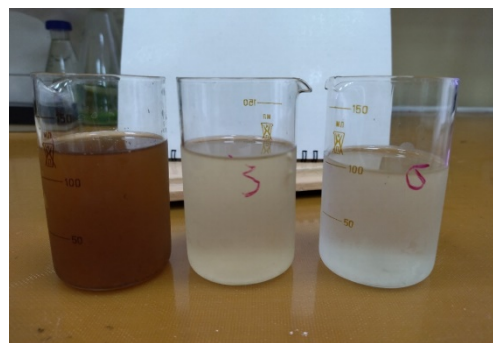


Fig. 2. Photo of wastewater samples (option 2):
4 - at the input to the averager; 5 – after the
averager; 6 - after the floater

Table 1

The results of the analysis of wastewater samples
from the production wastewater of the meat plant

N	Indicator	At the input to the averager	After the averager	After the floater	Rate of discharge to CDS*
1	pH	9.52-11.7	6.62-6.75	6.51-6.71	6.5-9.0
2	Suspended substances, mg/dm ³	232-614	200-230	114-142	300
3	Calcined suspended matter, mg/dm ³	74-190	62-74	35-44	-
4	Dry residue, mg/dm ³	1480-4720	710-1140	265-615	-
5	Calcined residue, mg/dm ³	460-1460	220-350	82-190	-
6	COD, mg/dm ³	2000-6400	1200-1600	400-800	750
7	Surfactants, mg/dm ³	0.7-3.6	0.67-3.59	0.55-3.15	0.5
8	Phosphates, mg/dm ³	10.3-14.3	10.2-14.2	9.9-13.9	6
9	Ammonium nitrogen, mg/dm ³	28.1-32.2	26.3-28.4	24.4-25.1	18
10	Fats, mg/dm ³	12.7-18.6	12.5-18.5	9.4-15.2	6

Note: * - permissible values of quality indicators for consumer wastewater that is sent for treatment, according to the Rules for accepting consumer wastewater into the Kharkiv sewage network, approved by decision No. 321 of the Kharkiv City Council session dated September 8, 2010, as amended and additions effective today. CDS - city drainage system.

Results and explanation

Comparing the obtained values of wastewater parameters after the flotation device with the normative ones when discharged into the city drainage system, it can be noted that the pH and suspended solids of the wastewater meet the regulatory requirements. However, according to indicators: COD, surfactants, phosphates, ammonium nitrogen, fats, the values obtained for the wastewater samples exceed the normative indicators. Therefore, in order to bring the indicated indicators to the requirements, it was necessary to investigate the intensification of flotation treatment with the use of reagent treatment of wastewater, for example, the introduction of a coagulant.

Therefore, in order to increase the efficiency of the local purification of industrial wastewater of the meat plant from organic compounds, suspended substances, phosphates, fats and other pollutants that may enter the industrial wastewater as a result of the technological processes of the production of sausages and meat products, the use of pre-flotation was proposed reagent treatment of wastewater by introducing a coagulant based on aluminium salts.

The purpose of the research was to establish the efficiency of industrial wastewater treatment using physicochemical methods: treatment with reagents, coagulation, flotation; determination of optimal doses of reagents, optimal pH value, technological parameters of cleaning processes to ensure the greatest cleaning effects according to the concentration of organic substances, determined by the KSC indicator, according to the concentration of suspended substances, phosphates. Aluminium sulphate was used to study the process of wastewater coagulation.

A study was conducted on wastewater samples after the averager. For alkalinisation, a 5 % NaOH solution with a dose of 2.5-3 ml/dm³ was used, which ensured an increase in pH to 7. The dose of coagulant Al₂(SO₄)₃ is recommended in the range of 250-300 mg/dm³, pH 7-7.5. The effect of purifying wastewater from organic substances according to COD is 58-62 % (fig. 3, 4), the concentration of organic substances according to COD in purified wastewater is 670-460 mg/dm³ for the initial 1600 and 1200 mg/dm³, the norm is 750 mg/dm³.



Fig. 3. Photo of wastewater samples:
on the left - before coagulation; on the right -
after coagulation with aluminium sulphate in a
dose 250 mg/dm^3



Fig. 4. Photo of filtered wastewater samples:
on the left - before coagulation; on the right -
after coagulation with aluminium sulphate in a
dose 250 mg/dm^3

The effect of wastewater treatment from ammonium nitrogen is 40-42 %, the concentration of ammonium nitrogen in purified water is $17\text{-}15.3 \text{ mg/dm}^3$ compared to the initial 28.4 and 26.3 mg/dm^3 , the norm is 18 mg/dm^3 . The effect of purification of wastewater from phosphates is 62-65 %, the concentration of phosphates in purified water is $5.4\text{-}3.6 \text{ mg/dm}^3$ compared to the initial 14.2 and 10.2 mg/dm^3 , the norm is 6 mg/dm^3 .

As a result of the conducted research, an improved technology of local treatment of industrial wastewater of the meat plant was proposed, which involves the use of physical and chemical methods for local treatment of industrial wastewater. The technology can be recommended for use at the enterprise. The scheme of the technology is shown in fig. 5.

Treatment facilities for local wastewater treatment installed at the enterprise are grease traps on discharges from meat and sausage production shops, a grease trap on the general flow of industrial wastewater, an averager to equalize flow rates and pollution concentrations, and a flotation device.

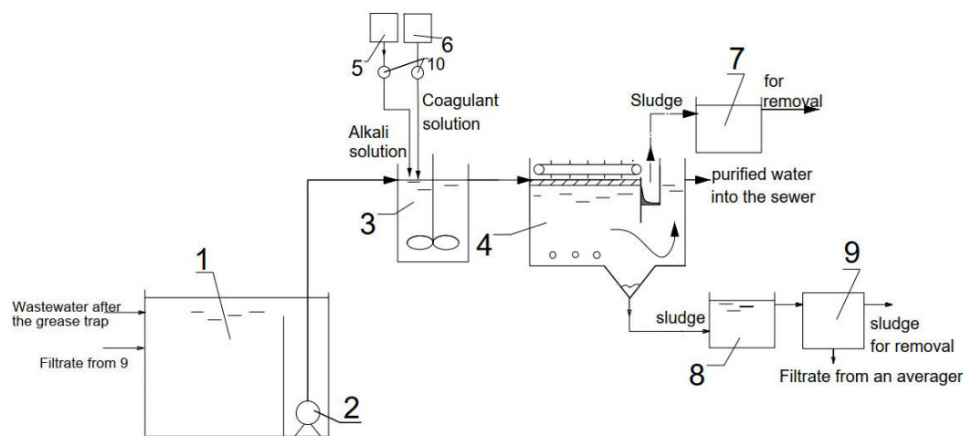


Fig. 5. Scheme of improved local cleaning technology

production wastewater of the meat plant:

- 1 – averager; 2 - pump; 3 - flaking chamber; 4 - floater; 5 - soluble tank for preparation of lye solution; 6 - soluble tank for preparing coagulant solution; 7 - collection of flotation sludge; 8 – sediment collector; 9 – filter press; 10 – dosing pump

In order to intensify the cleaning processes and increase the efficiency of the local treatment of the production wastewater of the meat plant according to the indicators: COD, surfactants, phosphates, ammonium nitrogen, fats, and to obtain purified water in accordance with the regulatory requirements when discharged into the city sewer, an improved technology for the local treatment of the production wastewater is proposed of water shown in fig. 5. According to the proposed technology, industrial wastewater after the existing grease trap and concentrator is pumped to reagent flotation using an alkaline reagent and coagulant – aluminium sulphate, with coagulant flakes obtained as a result of coagulation, removal of pollutants from water and phase separation in the form of flotation sludge and sediment and purified water with quality indicators in accordance with regulatory requirements, which makes it possible to divert it to the city sewer network. The flotation sludge formed during wastewater treatment is diverted to a collector and taken away, and the sediments are recommended to be dewatered on a filter press and taken away.

The company's wastewater is contaminated with various substances, which are determined by indicators: pH, suspended solids, COD, ammonium nitrogen,

phosphates, surfactants, fats, etc. The large content of fats in industrial wastewater requires the use of grease traps on workshop discharges (existing) and on the general flow of industrial wastewater (existing). Concentrations of pollutants in the production wastewater of the enterprise, which enter the sewage network, are characterized by significant fluctuations in time, which is related to the technological mode of production of products. Irregularity is also characteristic of wastewater flows that enter the sewage network from production processes. In order to ensure that the average concentration of pollutants contained in industrial wastewater and the average pH value enter the sewage network at the initial stage of the preliminary local treatment of industrial wastewater, an existing concentrator is used, in which such conditions are created that the wastewater will have an average concentration at the outlet of the concentrator concentrations of pollutants. A pump (2) is installed at the outlet of the concentrator to supply the averaged flow of wastewater to the flotation device.

The presence of suspended substances, organic substances in finely dispersed, emulsified, colloidal and dissolved states, phosphates, ammonium nitrogen, fats in the industrial wastewater of the enterprise at the exit from the concentrator create prerequisites for the use of physicochemical methods for cleaning such wastewater with the formation of a phase separation surface and removal of system components from the solution in the form of sediment and foam sludge. For wastewater treatment, it is recommended to use NaOH as an alkaline reagent, the solution of which is fed into the wastewater in the flocculation chamber for 15-20 minutes staying with the help of a dosing pump from the solution tank for preparing the lye solution. To increase the efficiency of removing pollutants from wastewater, it is recommended to use reagent treatment of wastewater using a coagulant – aluminium salt $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, which forms flakes of hydroxide $\text{Al}(\text{OH})_3$ in water, on the developed surface of which particles suspended from water are adsorbed, colloidal and dissolved organic substances, fats that can be contained in wastewater, in this way aggregates are formed, which in the process of flotation are attached to air microbubbles, form float complexes that are carried to the surface of the water and form a layer of flotation

sludge. As flotation complexes move to the surface of the water, they become larger, due to the presence of synthetic surface-active substances – surfactants in wastewater, the flotation of these complexes increases. Thus, as a result of flotation of flotation complexes, a layer of flotation sludge is formed on the surface of the liquid. The water captured by such units flows down, due to which the humidity of the sludge decreases. Phosphates contained in water interact with aluminium cations, forming aluminium phosphates, which are insoluble compounds capable of being removed from the water in the flotation sludge together with flotation complexes. According to the technology presented in fig. 5, the solution of the coagulant $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ is fed into the flaking chamber with stirring using a mechanical stirrer with a rotation speed of 0.3-0.55 m/c. The flocculation chamber can be blocked with a floater (arranged at the wastewater inlet to the flotation chamber with wastewater overflow through the partition between the flocculation chamber and the floater). From the flocculation chamber, wastewater with aluminium hydroxide flakes enters the flotation device.

Phase separation takes place in the flotation device – the separation of flotation sludge on the surface of the liquid, the deposition of insoluble particles in the sediment, which leads to the purification of wastewater. To supply air to the water, you can use tubular aerators with a porous surface to create small air bubbles in the wastewater. Tubular aerators are placed on the bottom of the floater. Saturating wastewater with air using flotation through fine-porous materials allows, with a simple design of the flotation device, to ensure lower electricity costs for the process than when using pressure flotation, the method does not require the installation of pumps and impellers for flotation. Air consumption should be determined by the aeration intensity of $15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ to ensure the flotation of pollutants. The duration of flotation is recommended to be 60 minutes. Install tubular aerators near the bottom of the float at a distance of 100 mm from the bottom perpendicular to the movement of water – 2 aerators. Flakes of coagulant form floating complexes with air bubbles, on the surface of which surface-active substances are adsorbed, released from the solution on the surface of the bubbles and floated, forming foamy sludge. Flakes of coagulant also adsorb suspended substances, dissolved organic substances, fats.

Metal ions interact with phosphates and form insoluble compounds, which are also adsorbed on the surface of coagulant flakes. Thus, flotation complexes are formed, which, thanks to air bubbles and SPAR, float to the surface of the water and form flotation sludge on the surface of the water in the flotation device. To improve the coagulation process, thicken coagulant flakes, speed up the process of their formation and separation from water, you can use a flocculant, for example, polyacrylamide PAA at a dose of 3-5 mg/dm³.

Conclusions

On the basis of the work carried out at the department of bioenergy, bioinformatics and ecological biotechnology of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute experimental studies established:

- composition and main indicators of pollution of industrial wastewater of the meat plant: suspended substances – 22-614 mg/dm³; COD – 2000-6400 mg/dm³; surfactants – 0.7-3.6 mg/dm³; phosphates – 10.3-14.3 mg/dm³; ammonium nitrogen – 28.1-32.2 mg/dm³; fats – 12.7-18.6 mg/dm³, and it was established that they exceeded the norms of discharge into the drainage system of the city of Kharkiv;

- when using aluminium sulphate as a coagulant at a dose of 250-300 mg/dm³ at a pH of 7-7.5, the effects of cleaning the production wastewater of the meat plant are as follows: HSC – 58-62 %, COD of treated wastewater – 460-670 mg/dm³; suspended solids – 90-95 %, the content of suspended solids in purified water – 10-23 mg/dm³; SPAR – 88 %, surfactants content in purified water – 0.43-0.08 mg/dm³; phosphates – 62-65 %, phosphate content in purified water – 3.6-5.4 mg/dm³; ammonium nitrogen – 40-42 %, the content of ammonium nitrogen in purified water – 15.3-17.0 mg/dm³.

An improved technology for local treatment of industrial wastewater using coagulation and flotation methods has been developed, the use of which will allow obtaining high-quality purified water, the indicators of which meet the regulatory requirements for the discharge of wastewater into the drainage system of the city of Kharkiv.

References

- Aguilar, M., Saez, J., Llorens, M., Soler, A., & Ortuno, S. (2003). Microscopic observation of particle reduction in slaughterhouse wastewater by coagulation-flocculation using ferric sulphate as coagulant and different coagulant aids. *Water research*, 37, 2233-2241. doi:10.1016/S0043-1354(02)00525-0.
- Amuda, O., & Alade, A. (2006). Coagulation/flocculation process in the treatment of abattoir wastewater. *Desalination*, 196, 22-31. doi:10.1016/j.desal.2005.10.039.
- Jachimowicz, P., Cydzik-Kwiatkowska, A., & Szklarz, P. (2020). Effect of Aeration Mode on Microbial Structure and Efficiency of Treatment of TSS-Rich Wastewater from Meat Processing. *Applied Sciences*, 10(21). doi:10. 7414. 10.3390/app10217414.
- Ji, Y., Riddle, B., Wang, Y., & Price, D. (2020). Fate and Removal of Phosphorus in a Municipal Wastewater Treatment Plant. *World Environmental and Water Resources Congress*, 250-257. doi: 10.1061/9780784482988.024.
- Preisner, M., & Smol, M. (2022). Investigating phosphorus loads removed by chemical and biological methods in municipal wastewater treatment plants in Poland. *Journal of Environmental Management*, 322. doi: 116058.10.1016/j.jenvman.2022.116058.
- Sabliy, L., & Zhukova, V. (2022). *Efficient treatment of industrial wastewater using immobilized microorganisms*. Water Supply and Wastewater Disposal. Designing, Construction, Operation and Monitoring. Monografie. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 248-262.
- Vikneswara, A., Al-Gheethi, A., & Radin, M. (2018). Removal of Nutrients from Meat Processing Wastewater Through the Phytoremediation Process. *Management of Greywater in Developing Countries*, 245-263. doi:10.1007/978-3-319-90269-2_13.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЗОНОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ В СИСТЕМАХ ОВІК

Чалаєв Д.М., Інститут технічної теплофізики НАН України, д.т.н., ст.н.с.,
пр.н.с. відділу ТДС, Україна

Грабова Т.Л., Інститут технічної теплофізики НАН України, к.т.н., ст.н.с.,
пр.н.с. відділу ТДС, Україна

Гончаров П.В., Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,
к.т.н., пр.н.сп. відділу, Україна

Базєєв Р.Е., Інститут технічної теплофізики НАН України, пр. інж. відділу
ТДС, Україна

Abstract

The global problem of air pollution is exacerbated by large-scale pandemics and the catastrophic consequences of the war in Ukraine. To solve the problems of air purification, a technological scheme and equipment for plasma-chemical air treatment with a module for combined catalytic and thermal decomposition of excess ozone are proposed. Approbation of the scheme with the combined method of ozone destruction on oxide-cement catalysts showed an increase in ozone conversion by 10-15 %. At the same time, the energy consumption for the implementation of the combined method of ozone destruction using heat pump recovery is 7-10 times less compared to the direct method of air heating.

Вступ

Одним з ефективних методів знезараження повітря в системах централізованої вентиляції громадських будівель може бути обробка повітряного потоку озоном. Озон є надзвичайно потужним дезінфікуючим засобом, здатним окислювати широкий спектр органічних та неорганічних сполук. Підвищення рівня зацікавленості до застосування озонових технологій викликаний тим, що такі технології дозволяють одночасно вирішувати

комплекс завдань: з дезінфекції, дезінсекції, дератизації, дезодорації, демеркуризації як житлових, так і нежитлових приміщень.

Озонові технології базуються на продукуванні високої концентрації озону в повітрі (понад $0,4 \text{ мг/м}^3$), при якій починається активне окислення високомолекулярних та токсичних речовин, руйнування стінок клітин мікроорганізмів, окислення ароматичних та гетероциклічних сполук. Ефективність технологій обумовлена високою хімічною активністю озону при його екологічній чистоті (Batakliiev, Georgiev, Anachkov, Rakovsky & Zaikov, 2014; Epelle, Macfarlane, Cusack & Yaseen, 2022).

З одного боку озон є потужним окиснювачем, а з іншого, може бути шкідливим для живих істот залежно від концентрації, місця та тривалості впливу (рис. 1) (Swanson, Jamal & Chapman, 2022). Водночас молекула озона є нестабільною і період її розпаду істотно залежить від температури, вологості й складу озоно-повітряної суміші. Період напіврозпаду є досить тривалим при $10\text{--}40^\circ\text{C}$ – 0,2-3 діб, а при 120°C скорочується до 1,5 години (Batakliiev et al., 2014; Taran, Krasnyj, Lozina, Chechelnytskyi & Schebetun, 2017).

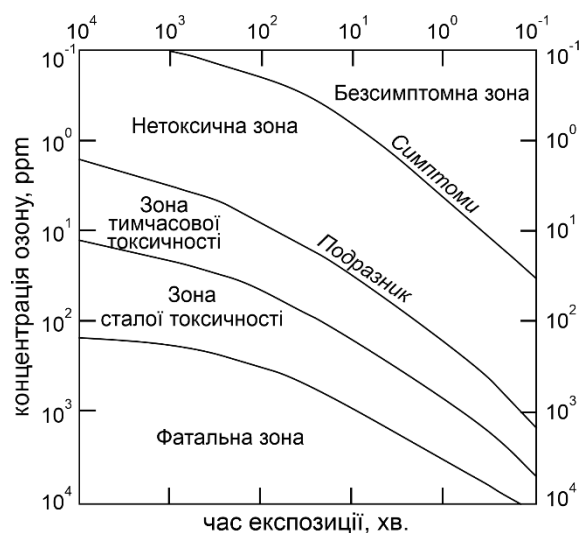


Рис. 1. Зони токсичності озону (IOA PAG, 2021; National Academies of Sciences, 1984)

Вищезазначені фактори накладають обмеження на застосування озонових технологій очищення повітря в централізованих системах опалення, вентиляції й кондиціювання (ОВіК) без додаткових заходів з нейтралізації надлишкового

озону. Тому, для безпечної експлуатації установок очищення повітря в системах припливно-витяжної вентиляції будівель та при їх проєктуванні необхідно враховувати порогові значення вмісту озону в повітрі, яке надходить до приміщення після очищення: середньодобова гранично допустима концентрація (ГДК) не повинна перевищувати 0,03 мг/м³ (МОЗ України, 2020; Guidelines of the WHO European Center, 2021).

Ефективним та економічним методом знезараження повітря у вентиляційних системах є інактивація аеродисперсної патогенної мікрофлори й деструкція молекулярних забруднювачів шляхом обробки повітряного потоку низькотемпературною плазмою атмосферного тиску. Під дією електричного поля електрони вилітають із катода і прискорюються до енергій, достатніх для іонізації молекул. Зіткнення цих електронів з молекулами азоту, кисню, води, що містяться в повітрі, викликають їх збудження, іонізацію та дисоціацію. Інактивація забруднювачів здійснюється шляхом окислення органічних домішок під дією активних форм кисню, таких як OH, O₃, H₂O₂, NO (Lagoussi, 2005). Технологія плазмохімічної обробки повітря має великий потенціал для використання як ефективний метод інактивації патогенних мікроорганізмів, що переносяться по повітрі, включаючи SARS-CoV-2 (Bisag, 2020).

Одним із заходів безпечного використання озонових технологій в централізованих системах ОВіК є застосування засобів деструкції надлишку озону. Проведено порівняльний аналіз основних груп наявних методів деструкції озону: фотохімічний, термічний, каталітичний (табл. 1).

Нині найбільшого застосування отримав метод каталітичного розкладання озону з використанням адсорбентів з активними каталітичними компонентами, таких як, оксиди благородних і перехідних металів. Механізм каталітичного розкладання озону полягає в наступному: спочатку молекула озону адсорбується на поверхні каталізатора, а потім дисоціює на молекулу кисню та атомарний кисень. При цьому залишки забруднювальних речовин, не знищених у плазмохімічному реакторі, руйнуються на каталізаторі завдяки інтенсивній реакції з атомарним киснем. Водночас, ефективним і технічно

простим способом розкладання концентрованого надлишкового озону є метод термічного розкладання. Однак цей метод має обмежене застосування через великі енерговитрати на процес нагрівання і подальшого охолодження повітря.

Таблиця 1

Аналіз методів розкладання (деструкції) озону

Метод розкладання озону	Основні характеристики й параметри	Переваги	Недоліки та лімітуючі параметри	Літ. джерело
фотохімічний	розкладання під дією лазерного або ультрафіолетового випромінювання	вибіркова деструкція озону	- чутливий до параметрів і складу газозонової суміші; - складне апаратне оснащення технології, - коштовний	(Ткаченко, 2004; Batakliiev et al., 2014)
термічний	початок процесу розкладання з 50 °C	- не забруднює повітря продуктами розпаду; - є відносно простим з точки зору технологічного оснащення	- ефективність при високих температурах (350-400 °C); - вище критичної температури спостерігається детонація газозонової суміші (вище 105 °C кінетичний розпад озону може трансформуватися у вибух); - енерговитратний метод	(Ткаченко, 2004; Batakliiev et al., 2014)
каталітичний	розкладання на високорозвинених поверхнях з активними каталітичними компонентами: - благородні метали; - оксиди перехідних металів; - змішані каталізатори, які включають оксиди d-елементів і метали платинової групи	- для широкого спектру повітряно-газових сумішей; - економічно ефективний метод	- за певних температур і швидкості вологого газового потоку метод не є ефективним; - отруєння каталізатора (ускладнена десорбція продуктів розкладання озону); - високий аеродинамічний опір, міцність і ерозивна стійкість каталітичних гранул в аеродинамічних потоках; - активність режимів (кінетичного й дифузійного) деструкції озону залежить від розвиненості й доступності до контактної поверхні каталізатора	(Ткаченко, 2004; Li, Ma & He, 2020)

З урахуванням вищезазначеного, актуальним є питання вибору ефективного методу деструкції озону в динамічних аеропотоках і способу його реалізації.

Метою роботи є розробка та створення ефективного модуля деструкції надлишку озону в плазмохімічних технологіях очищення повітря в централізованих системах ОВіК.

Розробка експериментального обладнання

Фахівцями ІТТФ НАН України й ІЕЗ ім. Е. О. Патона НАН України розроблена і створена дослідно-експериментальна установка модульного типу (Чалаєв, Грабова, Гончаров & Ковальов, 2022). В систему повітропроводу вмонтовано наступні агрегати та модулі: вентиляційний агрегат з регулятором продуктивності повітря, фільтр грубого очищення повітря класу G, модуль синтезу озону, адсорбційно-каталітичний модуль, пластинчастий рекуперативний теплообмінник. Створено автономні модулі, що дає можливість легко вмонтовувати їх в повітропровідну систему і варіювати послідовністю їх розташування. Моніторинг параметрів якості повітря за Air Quality Index (вміст дисперсних частинок PM 2.5, концентрація озону O₃, відносна вологість HUM, %, температура, концентрація вуглекислого газу CO₂, швидкість аеропотоку) здійснювали в режимі on-line у повітропроводі після генератора озону TM1 та після адсорбційно-каталітичного модуля TM2.

Модуль синтезу озону, що розроблено, побудовано за технологією генерації активного кисню (озону) з атмосферного повітря методом холодної плазми – низькотемпературного коронного розряду. За результатами натурних випробувань найкращі показники за ступенем іонізації й щільністю напруженості електричного поля в повітряному проміжку генератора озону показали пилкоподібні коронуючі електроди.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що варіювання значеннями високовольтової напруги, що подається на плазмовий генератор, дозволяє регулювати вміст озону в аеропотоках. Залежність

генерації озону в діапазоні напруг 5...25 кВ з високою ймовірністю апроксимації ($R^2 = 0,98$) описується поліномом 2-го порядку з точкою переламу в області 20...23 кВ, тобто, після 20 кВ генерація озону йде на спад (1, рис. 2).

Розроблено плазмохімічний модуль з наступними технічними характеристиками й умовами експлуатації:

габаритні розміри – 320х260х260, мм;

відстань між електродами – 20...25 мм;

напруга, що подається на блок низькотемпературної плазми – до 20 кВ;

напруженість електричного поля між електродами – до $8 \cdot 10^3$ В/см;

повітрообмін – до 700 м³/год;

діапазон робочих температур – 17...30 °С;

відносна вологість повітря – 45...70% при 25 °С.

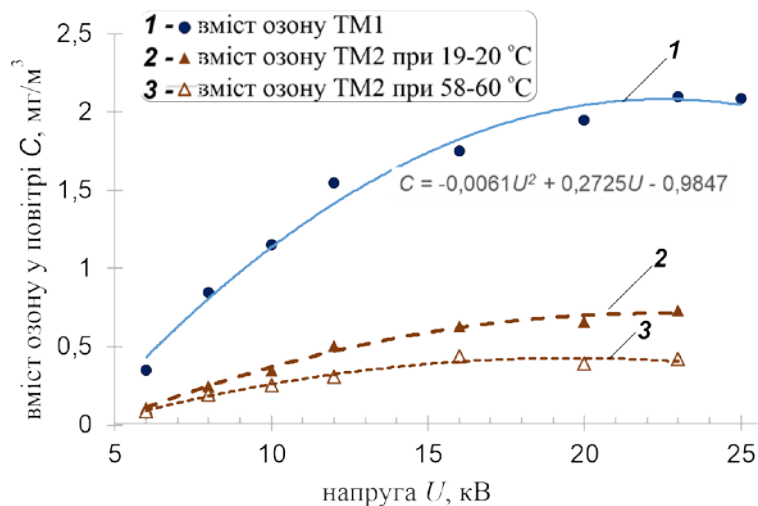


Рис. 2. Залежності від напруги, що подається на генератор озону, при швидкості повітря 1,2 м/с: 1 – синтезу озону (після генератора у ТМ1); 2,3 – вмісту озона (після адсорбційно-каталітичного модуля у ТМ2)

Аеропотік з дисперсними частинками, які були наелектризовані в зоні коронного розряду, надходить до адсорбційно-каталітичного модуля проточного типу, що складається з набору картриджів (рис. 3). Складовими частинами картриджів є два циліндри різного діаметра, які формуються з фільтрувального матеріалу з волокнистого поліпропілену класу G, простір між ними заповнено гранулами оксидного цементовмісного адсорбента-

каталізатора. Пористі гранули було отримано екструзійною технологією з суміші оксидів перехідних металів й талюма (до 40 м%) з максимальною питомою поверхнею 180 м²/г (за методом БЕТ).

Ефективність роботи адсорбційно-каталітичного модуля оцінювали за показниками зміни концентрації озону в порівнянні з початкової 1 (рис. 2). Так, шляхом гетерогенного каталізу при швидкості аеропотоку у повітропроводі 1,2 м/с деструкція озону склала 64-71 %.

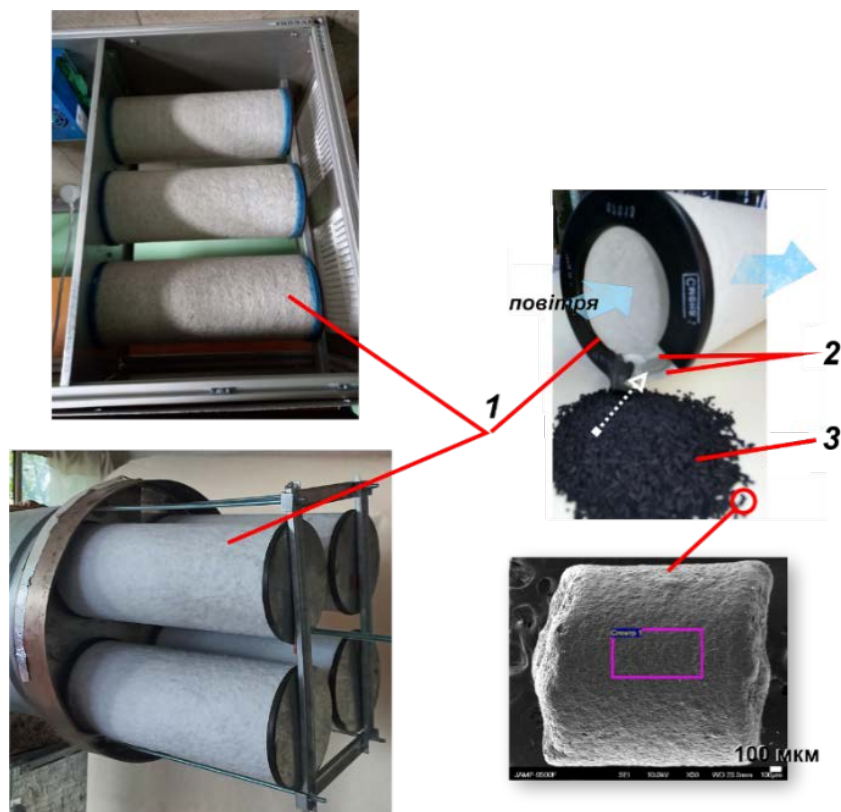


Рис. 3. Моделі адсорбційно-каталітичного модуля:

1 – картридж, 2 – фільтрувальні шари, 3 – адсорбційно-каталітичний гранульований шар
(гранула при кратності збільшенні x50, JAMP 9500F, Японія)

Результати досліджень та їх обговорення

Задля підвищення ефективності роботи вузла деструкції надлишкового озону запропоновано і розроблено технологічну схему модуля плазмохімічного очищення повітря в системах припливно-витяжної вентиляції будівель з енергоефективною системою деструкції надлишкового озону, в якій

використовується комбінована термічна та каталітична обробка аеропотоку (рис. 4).

Принцип роботи запропонованої системи очищення наступний. Забруднений аеропотік нагнітають вентилятором 1 і пропускають через механічний фільтр грубого очищення 2, який уловлює дисперсні частинки понад 10 мкм. Далі повітряні маси попадають у генератору озону 3 проходять неоднорідне електричне поле, яке створюється коронуючими розрядами. У зоні коронного розряду інтенсивно генеруються вільні радикали та озон, які запускають процес деструкції молекулярних забруднювачів і патогенної мікрофлори в аеропотоці. Насичене озоном повітря з температурою t_1 проходить через нагрівальний канал рекуперативного теплообмінника 4 і нагрівається до температури t_2 внаслідок теплообміну з потоком гарячого очищеного повітря, яке подається в охолоджувальний канал рекуперативного теплообмінника після проходження адсорбційно-каталітичного модуля 6. Нагріте в рекуперативному теплообміннику повітря додатково нагрівається в конденсаторі теплового насоса 5 до температури t_3 початку каталітичного розкладання озону і надходить в каталітичний модуль 6. На поверхні адсорбента-каталізатора забруднювачі та проміжні продукти їхнього розпаду вступають у реакцію окислення і розкладаються. Також в модулі 6 відбувається деструкція надлишкового озону. Очищене повітря послідовно охолоджується в охолоджувальному каналі рекуперативного теплообмінника та випарнику теплового насоса 7 і подається до приміщення.

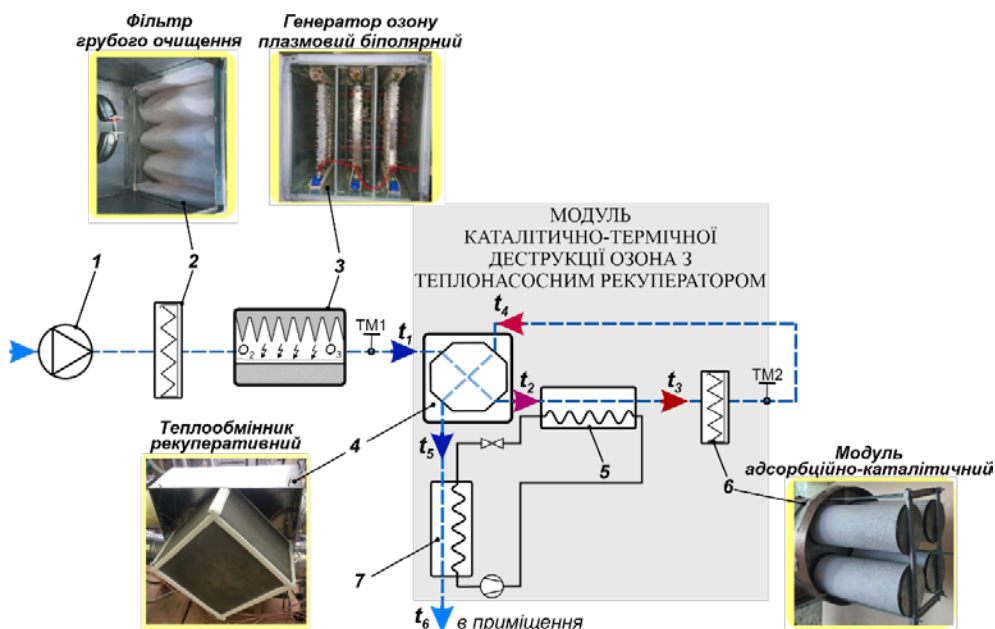


Рис. 4. Блок-схема енергоефективної технології очищення повітря:

- 1 – вентилятор нагнітальний; 2 – фільтр грубого очищення; 3 – генератор озону;
 4 – теплообмінник (рекуператор); 5 – випарник ТН; 6 – адсорбційно-каталітичний модуль;
 7 – конденсатор ТН; ТМ1-ТМ2 – точки моніторингу якості повітря;
 $t_1 \dots t_6$ – точки моніторингу температури повітря

Як видно з рис. 2, порівняння залежності 3 з 1 свідчить про те, що застосування комбінованого термічно-каталітичного методу дозволяє підвищити швидкість та глибину процесу деструкції озону в адсорбційно-каталітичному модулі до 75-80 %. Це дозволяє підвищити рівень генерації озону в іонізаційній камері, що сприяє збільшенню кількості активних радикалів у повітрі, і як наслідок, інтенсифікує деструкцію молекулярних забруднювачів та підвищує ефективність знезараження повітря. Крім того, підвищення температури повітря в адсорбційно-каталітичному модулі сприяє розкладанню органічних домішок, що накопичуються на поверхні каталітичного фільтра.

Оцінка енерговитрат

Як було зазначено вище, термічний метод розкладання озону потребує додаткових енерговитрат. Тому, в рамках роботи проведена оцінка

енергетичної ефективності запропонованої схеми теплонасосної рекуперації теплоти для реалізації комбінованого термічно-каталітичного методу (рис. 4).

Витрата енергії на пряме нагрівання повітря, що подається в адсорбційно-каталітичний модуль, становить:

$$Q_{нагр} = c_p \cdot G \cdot (t_3 - t_1).$$

У разі використання рекуперативного теплообмінника витрата енергії на нагрівання повітря дорівнює:

$$Q_{нагр}^P = c_p \cdot G \cdot [t_3 - t_1 - E \cdot (t_4 - t_1)],$$

де E – температурна ефективність рекуператора, величина якої залежить від швидкості руху повітря в каналах; G – масова витрата повітря; c_p – питома теплоємність повітря.

Графічна залежність ефективності рекуператора від швидкості руху повітря при рівних масових витратах у припливному та витяжному каналах наведена на рис. 5. Теплообмінний блок перехресно-точного рекуператора був виготовлений із пластин зі стільникового полікарбонату з відстанню між пластинами 4 мм. Конструкція теплообмінного блоку герметична і виключає перетікання з одного повітряного потоку в інший.

При використанні рекуперативного теплообмінника та теплового насоса витрата енергії на роботу теплового насоса складає:

$$Q_{нагр}^{TH} = \frac{c_p \cdot G \cdot [t_3 - t_1 - E \cdot (t_4 - t_1)]}{COP_{TH}}$$

де COP_{TH} – коефіцієнт перетворення теплового насоса.

На рис. 6 показано вплив температури повітряного потоку, що нагрівається на величину коефіцієнта перетворення теплового насоса «повітря-повітря». Температура повітряного потоку, що охолоджується, при цьому постійна і дорівнює 20 °С.

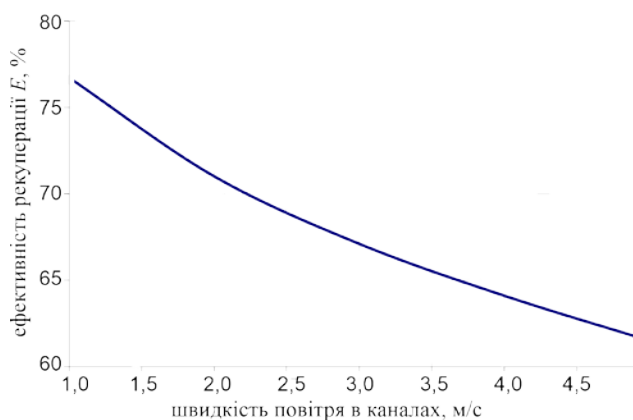


Рис. 5. Залежність ефективності перехресно-точного рекуператора від швидкості повітря в каналах

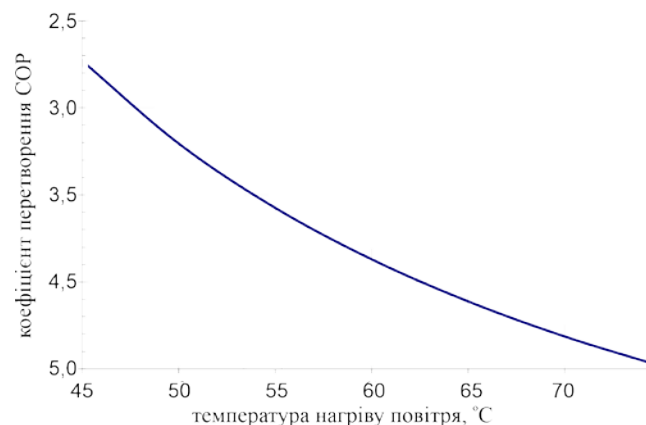


Рис. 6. Залежність коефіцієнта перетворення теплового насоса "повітря-повітря" від температурного режиму його роботи

Поєднання теплової рекуперації за допомогою теплообмінника «повітря-повітря» з термодинамічною рекуперацією за допомогою теплового насоса дозволяє значно зменшити енергоспоживання системи очищення повітря. На рис. 7 представлені результати розрахунку витрати енергії на нагрівання повітря з використанням експериментальних даних, наведених на рис. 5 і 6. Як видно з графіків, реалізація запропонованої схеми нагріву повітря дає майже десятикратне зниження енергоспоживання.

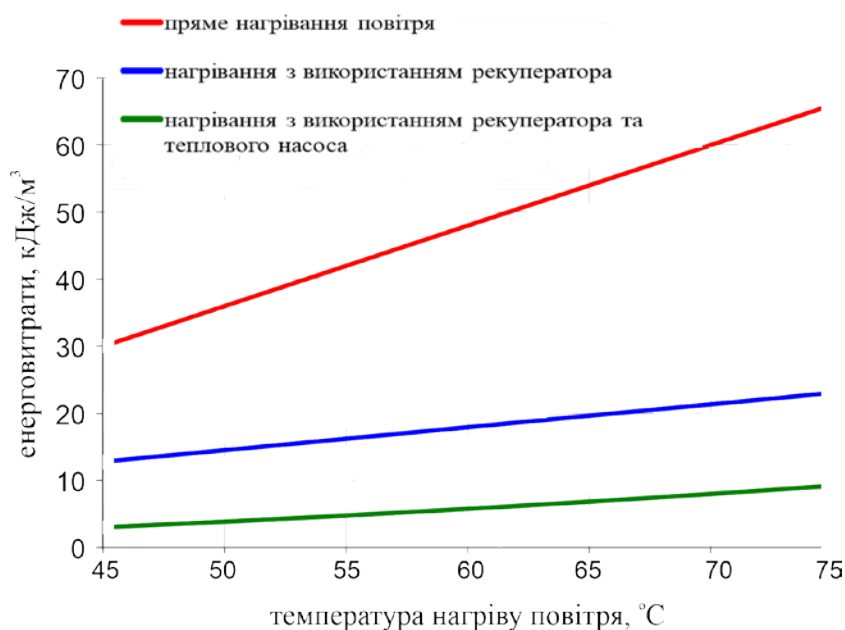


Рис. 7. Порівняння енерговитрат на нагрівання повітря за різними схемами нагрівання аеропотоку

Висновки

За результатами роботи показано можливість підвищення ефективності та безпеки озонної технології знезараження повітря шляхом деструкції надлишкового озону шляхом комбінованого каталітичного та термічного впливу.

Використання каталітично-термічної системи розкладання озону забезпечує зменшення концентрації озону у потоці повітря на 75-80 %, що показує перспективність застосування такої технології знезараження повітря у будинках із централізованою припливно-витяжною системою вентиляції.

Реалізація схеми термокаталітичного розкладання озону із застосуванням теплової й термодинамічної рекуперації теплоти дозволяє зменшити енергоспоживання системи очищення повітря майже в 10 разів. Середня ефективність рекуперативного теплообмінника склала 0,65-0,70 і коефіцієнт перетворення теплового насоса – 2,7-3,2.

Застосування запропонованої комбінованої схеми з оксидними цементовмісними каталізаторами дозволило підвищити ефективність модуля деструкції озону в 1,2-1,5 раза.

Список літератури

- Batakliiev, T., Georgiev, V., Anachkov, M., Rakovsky, S., & Zaikov, G. (2014). Ozone decomposition. *Interdiscip Toxicol*, 7(2), 47-59. doi: 10.2478/intox-2014-0008.
- Epelle, E. I., Macfarlane, A., Cusack, M., Burns, A., Thissera, B., Mackay, W., ... Yaseen M. (2022). Bacterial and fungal disinfection via ozonation in air. *Journal of Microbiological Methods*, 194. doi: 10.1016/j.mimet.2022.106431.
- Guidelines of the WHO European Center for Environment and Health. (2021). *New WHO Global Air Quality Guidelines*. Retrieved from: <https://www.who.int/news/item/22-09-2021>.
- International Ozone Association, Pan American Group (IOA-PAG). (Copyright 2021). *Ozone Safety*. Retrieved from: <https://ioa-pag.org/guidance>.

- Laroussi, M. (2005). Low temperature plasma-based sterilization: overview and state-of-the-art. *Plasma Process. Polym.*, 2, 391-400. doi: /10.1002/ppap.200400078.
- Li, X., Ma, J., & He, H. (2020). Recent advances in catalytic decomposition of ozone. *Journal of Environmental Sciences*, 94, 14-31. doi: 10.1016/j.jes.2020.03.058.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Committee on toxicology. (1984). *Emergency and Continuous Exposure Limits for Selected Airborne Contaminants*, 1. (pp. 99-106). The National Academies Press. Washington, DC. doi: 10.17226/689.
- Swanson, T. J., Jamal, Z., Chapman, J. (2022). Ozone Toxicity. *Treasure Island (FL): StatPearls Publishing LLC*. Retrieved from URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/> .
- Taran, V. S., Krasnyj, V. V., Lozina, A. S., Chechelnitskyi, O. G., & Schebetun, A. V. (2017). Investigation of ozone decay half-life in dependence of temperature and humidity as well as H₂S and NH₃ oxidation mechanism. *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*, 1(107), 244-246. Retrieved from URL: <https://vant.kipt.kharkov.ua/>.
- МОЗ України. Наказ, Регламент № 1596 від 14.07.2020. (2020). *Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони*. Офіційний вісник України. № 64. с. 111, стаття 2085. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/>.
- Ткаченко, С. Н. (2004). *Гомогенное и гетерогенное разложение озона*. (докторська дисертація 02.00.04). МГУ. Retrieved from URL: <https://fizmathim.com/>.
- Чалаєв, Д. М., Грабова, Т. Л., Гончаров, П. В., Гончарова, О. М., Набок, Т.М., & Ковальов, В. І. (2022). Знезараження повітря в системах централізованої вентиляції громадських будівель методами фотокаталіза і плазмохімії в умовах пандемії Covid-19. *Collection of scientific papers: I International scientific and theoretical conference “Technologies and strategies for the implementation of scientific achievements”*, 2. (pp. 45-47). Stockholm, Kingdom of Sweden. Collection of scientific papers «SCIENTIA». doi:10.36074/scientia-27.05.2022.

A NEW METHOD OF DISPOSAL OF CONCENTRATED SOLUTIONS BY CRYSTALLIZATION OF THEIR COMPONENTS

Radovenchyk I.V., PhD, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Trus I.M., PhD, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Radovenchyk V.M., Doctor of Technical Science, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Gomelya M.D., Doctor of Technical Science, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Hlushchuk V.R., National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

Abstract

The volume of water on Earth is immeasurable, but the main part is salt water. Humanity uses only 9 % of the planet's river flow, which means that fresh water is enough to provide all industries. Nevertheless, the issue of water scarcity is one of the most important problems of humanity today. The socio-economic causes of the water deficit are results of the growing world's population, increase in living standards, changes in consumption patterns and increase in irrigated land. That is why water purification methods must meet today's problems, be affordable, effective and of high quality. There are many factors that affect the quality of water resources, among them: the level of laboratory control, the quality of water supply pipes, the effectiveness of water protection measures, proper methods of water purification, and others. Water treatment and purification methods are currently quite effective, but they require improvement, development of new technologies and increased efficiency.

Introduction

The situation with the water supply of many countries with local resources is now extremely critical. In addition to the shortage of water, they also complain about its quality (Remeshevska et al., 2021). Nowadays, huge volumes of concentrated solutions are formed during desalination of water (Trus et al., 2019). The quality of water resources depends on many factors: availability of water resources in the regions, their sanitary condition, efficiency of water protection measures, technical level and compliance of water purification and distribution systems, level of laboratory control over water quality, corrosion monitoring of main pipes and water supply systems (Chyhyrynets, Fateev, Vorobiova & Skyba, 2016). Methods of their processing are insufficiently studied or economically impractical (Martínez et al., 2020).

Baromembrane technologies are widely used in water treatment processes (Talaiepour, Nouri, Hassani & Mahvi, 2017). This leads to the formation of concentrates, which is an extremely acute and urgent problem. Ion exchange technologies can effectively desalinate water, but a large number of regenerative solutions are formed (Rajca, 2012). Coagulation, flocculation or precipitation methods are used for their processing (Kyrii et al., 2020).

A more difficult task is the processing of excessively moist suspensions of various substances. Membrane, thermal and hybrid methods are used for concentrates crystallization. Due to the complexity of the equipment and to significant energy costs, membrane methods are not widely spread in water treatment (Ali, 2021). The thermal method is characterized by even higher energy consumption compared to membrane methods (Zhao, Feng, Li & Li, 2021).

The use of solar energy simplifies the technology and reduces the cost of evaporation of concentrates of various compositions (Zhang, Shi et al., 2021). Capillary filtration is one of the promising areas in the processes of water treatment, which increases the productivity of this technology. The capillary effect in combination with other processes has become quite widely used in various branches of industries. For example, the processes of liquids evaporation from porous capillary

materials are used in water desalination technologies, in the production of solar energy, in electronics etc. (Bongarala, Hu, Weibel & Garimella, 2021) methods of chemical analysis are based on the phenomenon of capillarity, many industrial and household equipment uses capillary tubes or materials. Also, the use of materials with capillary properties allows to create simple technologies for the treatment of water and various solutions without the consumption of electricity and additional chemical reagents (Alberghini, Boriskina, Asinari & Fasano, 2022).

It has been shown that the use of filters made of such materials allows the efficient removal of various pollutants from aqueous solutions, as well as the separation of solid and liquid phases (Radovenchyk et al., 2021). However, at the same time, there are no technologies that would consider the use of the capillary effect as the main technological process in the concentrates crystallization. Therefore, research in this direction is quite promising.

The aim of this work is to study materials with capillary properties as highly efficient evaporators.

To achieve the aim, the following tasks were set:

- evaluate the possibility of crystallization of substances from aqueous solutions using materials with capillary properties;
- to determine the conditions of crystallization of substances from concentrates of baromembrane water purification and effluents from ion exchange installations using materials with capillary properties.

Creation of highly efficient evaporators based on materials with capillary properties and energy of solar radiation. The processes of evaporation from the surface of cotton, silk and linen fabrics were studied in the natural environment. The necessary equipment in the simplest case is a cloth, fixed vertically and immersed in the lower end of the concentrate. Tap water and NaCl solutions with a concentration of 100 g/dm^3 were used as model solutions. Among modern methods of liquid waste disposal in the form of concentrates from various industries, thermal methods have become the most widespread, which are not critical to the chemical composition of concentrates and allow to be converted them into a solid state. On the other hand,

thermal methods require significant energy costs, which makes the accumulation and storage of concentrates more cost-effective, despite environmental problems. Therefore, research in the field of reducing energy costs through the use of solar energy is extremely important today, especially in the context of global warming. Since it is difficult to raise the ambient temperature with large concentrates, we have proposed to increase the evaporation rate by increasing the evaporation area. To carry out this process, fabric with capillary properties were selected, due to which the liquid phase is able to rise to significant heights. In some cases, the intensity of evaporation can be increased by several orders of magnitude. The paper describes the possibility of using this method for evaporation of liquids and crystallization of substances contained in concentrates. The influence of temperature on the height of liquid rise through fabric capillaries and the influence of salt concentration on the intensity of their crystallization have been studied.

The influence of the fabric thickness on the crystallization intensity of the constituent concentrates was studied. Several designs of crystallizers are proposed, which allow to increase the efficiency of the evaporation process, to automate the stages of solid phase removal and fabric regeneration. The proposed designs of evaporators are ready for application in industrial enterprises and are especially effective in areas with warm temperatures throughout the year.

Experimental part

The study of evaporation processes from the surface of strips of materials with capillary properties was performed under natural conditions. Cotton, silk and linen fabrics were used as such materials. During the experiment, strips of different fabrics with a width of 5 cm and a length of 50 cm were hung vertically and immersed with the lower end in the liquid phase. The height of the rise h and the volume of the liquid phase that evaporated over a period of time were recorded. In some cases, the mass of the solid phase that was crystallized on the surface of the fabric strips was recorded. At the same time, the average daily ambient temperature and the average daily wind speed at the place of experiments were recorded.

Tap water and NaCl solutions with a concentration of 0-200 g/dm³ were used as models.

Discussion

The rise height of the liquid phase in the isolated capillary depends on both the characteristics of the liquid phase and the properties of the material of the capillary walls. In real conditions, this parameter can reach 1.5-2.0 m and even more.

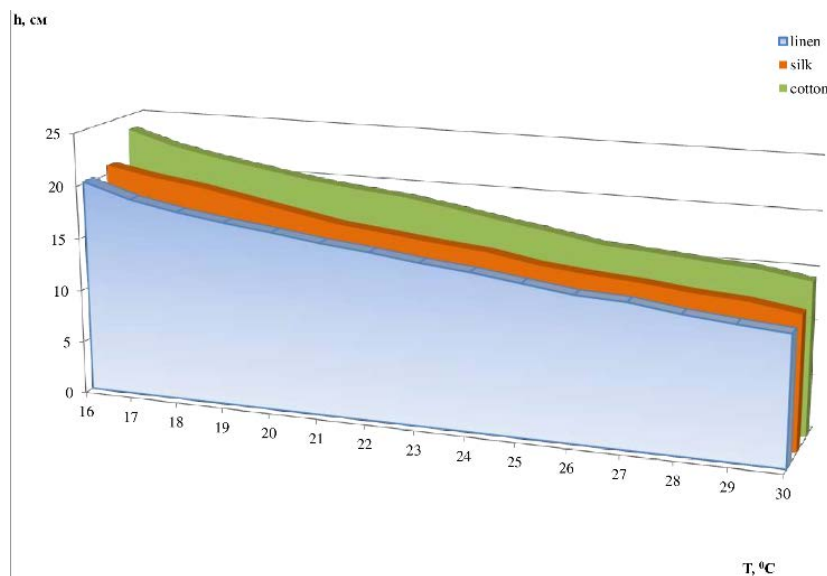


Fig. 1. Dependence of the height of the liquid phase in the strips of fabric on the ambient temperature and type of fabric

The rise of the liquid phase in the capillaries under the action of capillary forces and its evaporation under the action of ambient temperature determines the total efficiency of evaporation of the liquid phase. The height of the liquid phase in the strip of fabric will be also affected by the ambient temperature.

Research work is shown that the height of the liquid phase in the strips of fabric for tap water depends primarily on the characteristics of the material and ambient temperature. As can be seen from fig. 1, the best from this point of view is cotton, in which water at a temperature of 16 °C rises to a height of 23.6 cm. With increasing temperature to 30 °C the height of the wetted part of the strip decreases to 14.3 cm. During the application of flax and silk at a temperature of 16 °C water rises to a height of 20.2 and 20.9 cm, respectively. When the temperature rises to 30 °C,

the height of the wetted part of the strip decreases to 12.0 and 12.5 cm, which confirms the above conclusions. In case of flax and silk, at a temperature of 16 °C the water rises to a height of 20.2 and 20.9 cm, respectively. When the temperature rises to 30 °C, the height of the wetted part of the strip decreases to 12.0 and 12.5 cm, respectively. The results obtained indicate the feasibility of using cotton for the purpose of effective evaporation.

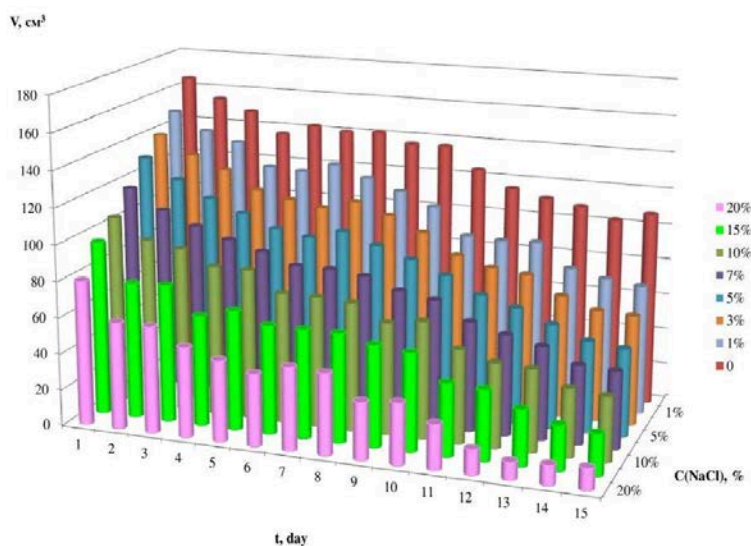


Fig. 2. Dependence of crystallization intensity on time and concentration of sodium chloride

To determine the dependence of the intensity of crystallization on time at different concentrations of sodium chloride solution the volume of the solution that evaporated during the day from the surface of the fabric was determined. Solutions of NaCl of different initial concentrations (1 %, 3 %, 5 %, 7 %, 10 %, 15 %, 20 %) and tap water (0 % in fig. 2) were used as a model solution. A series of five experiments were performed for each initial NaCl concentration. The volume of the model solution in the tank was maintained at a constant level throughout the experimental period.

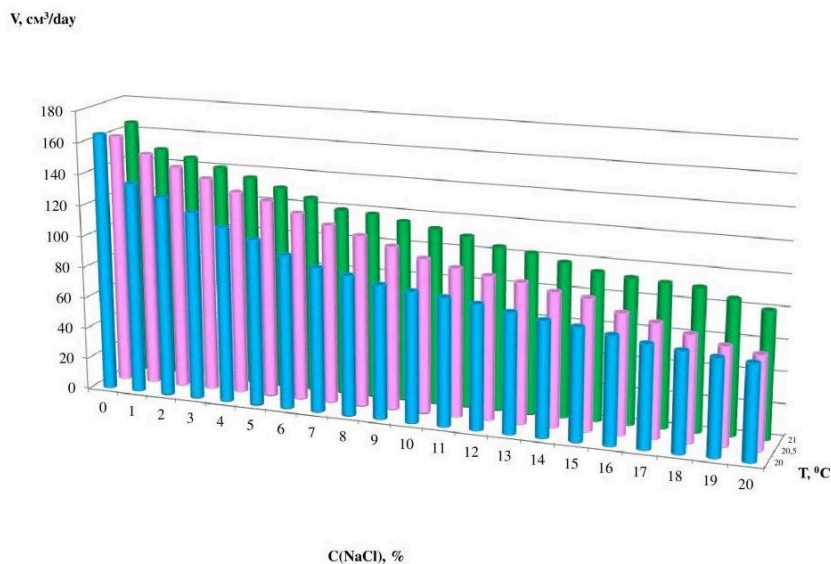


Fig. 3. Dependence of evaporation intensity on the concentration of sodium chloride solution and temperature

The crystallization process is quite intense, and the rate of formation of the solid phase is directly proportional to the concentration of the solution. To establish the dependence of the evaporation rate on the concentration of sodium chloride solution and temperature, the study was performed at a temperature of 20.0, 20.5 and 21.0 $^{\circ}\text{C}$ (average daily air temperature on the day of the experimental research) and results are given in fig. 3.

As the NaCl concentration increases, the volume of the liquid phase that evaporates from the fabric surface decreases as the characteristics of the solution change. If we consider the classical formula of capillary rise of fluid (1), it is clear that these characteristics are decisive in this process:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r}$$

where σ – is the coefficient of surface tension of the liquid; θ – is the edge angle of wetting of the capillary walls by the liquid; ρ – is the density of the liquid; g – is the acceleration of free fall; r – is the radius of the capillar.

In laboratory conditions as the density and viscosity of the solution increase, the rise height of the liquid phase and the total evaporation rate decrease.

During the evaporation of tap water there is a decrease in the intensity of evaporation is observed as a result of crystallization of various salts and compounds

from 165 cm³/day to 107 cm³/day after 15 days of experiment (fig. 2). For a 10 % solution of sodium chloride, the same figure decreases from 105 cm³/day to 36 cm³/day, and for 20 % – from 80 cm³/day to 12 cm³/day.

Productivity of the evaporation process decreases with increasing of solution concentration. That must be taken into account when create the industrial equipment.

When using materials with capillary properties in the form of a strip of fabric for crystallization of substances, the rise height of the liquid phase in the fabric is limited. This limits the productivity of these devices. Therefore, in further research it is planned to develop a new design of a multilayer crystallizer that will be operated without energy supply, so the negative impact on the environment during operation will be absent.

The feasibility of materials with capillary properties application in the processes of liquid evaporation and crystallization of their components was shown. This allows to create systems for evaporation of liquids and crystallization of their components, which are quite simple, cheap and highly efficient. The main factors influencing the efficiency of evaporation and crystallization of the solution were determined. The influence of sodium chloride solution concentration and ambient temperature on the evaporation process was established.

Problem statement

The imperfection of modern technologies leads to the formation of a significant amount of concentrated solutions, processing or disposal of which today is either impossible or economically impractical (Naidu, Ryu, Thiruvengkatachari, Choi, Jeong & Vigneswaran, 2019).

As a result, large-scale accumulators of such wastes are formed at enterprises, which are evaporated into the atmosphere, filtered into surface and groundwater, enhancing the already catastrophic state of the environment (Berger, Froër & Schäfer, 2019). Secondary salinization of water resources is a global problem that is becoming increasingly important (Cañedo-Argüelles et al., 2013).

Today, there are 465 such objects in Ukraine, which have accumulated more than 6 billion tons of waste from various industries. In most cases, they are highly mineralized solutions or excessively moisturized suspensions of various substances (Buzylo, Pavlychenko, Savelieva & Borysovska, 2018).

And while excessively moisturized suspensions can still be neutralized by traditional methods of coagulation, flocculation and advocacy, the highly mineralized solutions are now an acute environmental problem, often with catastrophic consequences of dam breaks and flooding of toxic waste in huge areas (Ostovar & Amiri, 2013).

Reverse osmosis allows to obtain water of the required quality for water supply of the population and industry (Kyrii et al., 2020). As a result of baromembrane water purification, significant amounts of concentrated waste are formed (Trus, Gomelya, Skiba, Pylypenko & Krysenko, 2022).

No less acute are the problems of waste disposal of water treatment and water treatment processes in the form of concentrates formed as a result of the use of ion exchange technologies (Trus et al., 2020). Since these technologies are considered today the most promising for the treatment of polluted water, the formation of concentrates inhibits their mass distribution and often causes secondary pollution (Levchuk, José, Márquez & Sillanpää, 2018). Therefore, for industrialized countries, the problems of concentrate disposal are extremely acute and urgent today.

Analysis of recent research

Membrane, thermal and hybrid methods have become the most widespread in technologies of water desalination and crystallization of concentrates (Morillo et al., 2014). Each of them has its advantages and disadvantages. Membrane methods are characterized by low productivity, complexity of equipment for their application, significant energy costs during operation (Alonso, del Valle & Ramirez, 2020). Additional application of vacuum allows to improve the characteristics of the equipment (Khayet & Matsuura, 2011), to create temperature differences on different sides of the membrane (Mericq, Laborie & Cabassud, 2010). the use of two-stage

reverse osmosis (Zhang, Wang, Chen, Gao & Wang, 2021). However, the disadvantages of using membrane methods is the crystallization of concentrates, because it is difficult to obtain a solid phase in one processing step.

The classical thermal method has even higher energy consumption compared to membrane methods. Thus, the best designs of evaporators require 100-110 Wh of electricity to evaporate 1 dm³ of water. Significant growth in natural temperatures and climate change in recent years has led to significant attention of scientists in this field to solar energy. Its use can greatly simplify and reduce the cost of evaporation of concentrates of various compositions. Typical equipment for this technology is a natural or artificial reservoir with a depth of 25-45 cm and a pump for pumping brine (Ning & Tarquin, 2010).

Such constructions are quite easy to install, they require minimal operating costs and practically do not require complex maintenance. Evaporation occurs naturally due to the energy of the Sun. The simplicity of the technology, the low cost of water evaporation and the possibility of application of high-performance systems based on it make the technology of evaporation of brines by solar energy quite promising and popular. It seems that one of the possible effective ways to increase the productivity of such technology for the disposal of concentrates is the use of materials with capillary properties. It was previously shown (Ferry, Widyolar, Jiang & Winston, 2020). That the use of filters made of such materials allows efficient separation of solid and liquid phases, non-displacing liquids, treatment of suspensions and colloids. In this case, the movement of the liquid phase and the process of phase separation occur due to capillary forces that are characteristic of the selected materials. The use of materials with capillary properties in solar evaporation technologies allows, depending on the conditions, to increase the intensity of evaporation by several orders of magnitude and increase the productivity of the entire technology. There are currently no studies on the possibility and efficiency of using materials with capillary properties in the crystallization processes of concentrates, which prevents their application in production. There are also no developments of

practical devices that allow the application of the solar evaporation system in the disposal of concentrates from various branches of industry.

Formulation of the purpose of work

The purpose of this work is to create highly efficient evaporators based on materials with capillary properties and energy of solar radiation.

To achieve the purpose, the following tasks were set:

- to evaluate the possibility and determine the conditions of crystallization of substances from aqueous solutions using materials with capillary properties and energy of solar radiation;
- to develop practical designs of crystallizers and to determine their efficiency in utilization of concentrates of baromembrane water purification and regenerative solutions of ion exchange units.

Results

The aim of research work was to study the processes of evaporation from the surface of strips of materials with capillary properties in the natural environment. Cotton, silk and linen fabrics were used as such materials. For the experiment, strips of different fabrics of 1.5 cm wide and 50 cm long were hung vertically and immersed with the lower end in the liquid phase 2 (fig. 4). During the study, the height of the rise h and the volume of the liquid phase that has evaporated over a period of time were recorded. In some cases, the mass of the solid phase crystallized on the surface of the fabric strips was recorded. At the same time, the average daily ambient temperature and the average daily wind speed at the place of experiments were recorded. Tap water and NaCl solutions with a concentration of 100 g/dm³ were used as model solution.

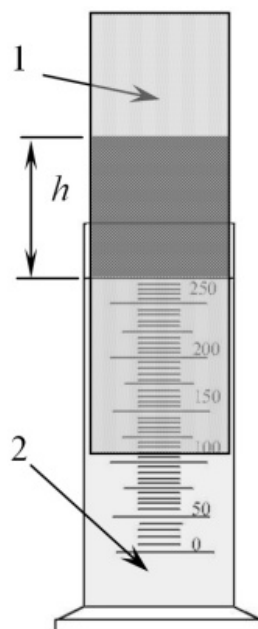


Fig. 4. Laboratory device for investigation the crystallization processes

Solid phase crystallization with the application of materials with capillary properties and solar radiation

According to modern ideas of classical physics, the height of the liquid phase in the isolated capillary is described by equation (Radovenchyk et al., 2021).

$$h = \frac{2 * \sigma * \cos\theta}{\rho * g * r}$$

where σ – is the coefficient of surface tension of the liquid; θ – is the edge angle of wetting of the capillary walls by the liquid; ρ – is the density of the liquid; g – is the acceleration of free fall; r – is the radius of the capillar.

As can be seen, the rising height depends on both the characteristics of the liquid phase and the material properties of the capillary walls. In real conditions, this parameter can reach 1.5-2.0 m and more. The mechanism of capillary transport of the liquid phase is most characteristic of groundwater and underlies the existence of all living organisms.

Most fabrics are artificial capillary systems created by combining threads made of cotton, linen, silk and other fibers in different ways. Since the fibers have a limited length, it is impossible to form one capillary of considerable length.

Therefore, the tissue is a complex porous structure formed by fibers, which in addition to being capillaries themselves, as a result of the combination form a huge number of capillaries in the interfiber space. A characteristic feature of this structure is the contact of the liquid phase, which is transported through the formed capillaries, with the atmosphere.

As a result, such porous systems are characterized by two simultaneous processes - the rise of the liquid phase through the capillaries under the action of capillary forces and its evaporation under the action of ambient temperature. It is the combination of these two processes that will determine the overall efficiency of liquid phase evaporation.

If we consider the physical model of the process described above, we can note (fig. 5a) that in this case the height of the liquid phase in the strip of fabric (h) will be determined not only by the above parameters, but also by ambient temperature. As the temperature increases, the liquid phase will be insufficient to maintain the previous value of the parameter h and it will decrease, which will reduce the evaporation area and the overall efficiency of the process.

The volume of liquid phase removed by the strip of fabric from the tank ($Q_{p \max}$) will be evenly distributed over the height of the wetted part of the strip. Thus, in the area of the strip above h , the liquid phase will be absent. Therefore, crystallization of the solution components will be observed in the upper part of the wetted section of the strip (section x), regardless of the value of their solubility.

If there are components of different solubility in the solution, they will crystallize in different parts of the strip in height. This simple design allows the neutralization of concentrates using the energy of solar radiation.

Writing the equation of material balance of the evaporation process in the form:

$$Q_p * C_{kmin} = Q_{p1} * C_{kkp}$$

where Q_p – the consumption of the liquid phase at the mirror level; Q_{p1} – the consumption of the liquid phase at a given height in the range of heights from 0 to h ; C_{kmin} – the minimum concentration of salts at the level of the mirror; C_{kkp} – the

concentration of crystallization of salts, can be determined at the height at which the formation of the solid phase takes place.

Obviously, that

$$Q_{pl} = 2 * I_b * I_1 * b$$

where I_b – the intensity of evaporation from the fabric surface, $h_1 = (h - x)$ – the height of the beginning of the crystallization zone, b – width of fabric strip. Then it can be written that

$$Q_p * C_{kmin} = 2 * I_b * I_1 * b * C_{kkr}$$

It follows that

$$h = \frac{Q_p * C_{kmin}}{2 * I_b * b * C_{kkr}}$$

Our research with tap water has shown that the height of the liquid phase in the strips of fabric depends primarily on the characteristics of the material and ambient temperature. As can be seen from fig. 6, the best from this point of view is cotton, in which water at a temperature of 16 °C rises to a height of 23.6 cm.

An increase in temperature to 30 °C, leads to the decrease in the height of the wetted part of the strip to 14 cm, which confirms the above conclusions.

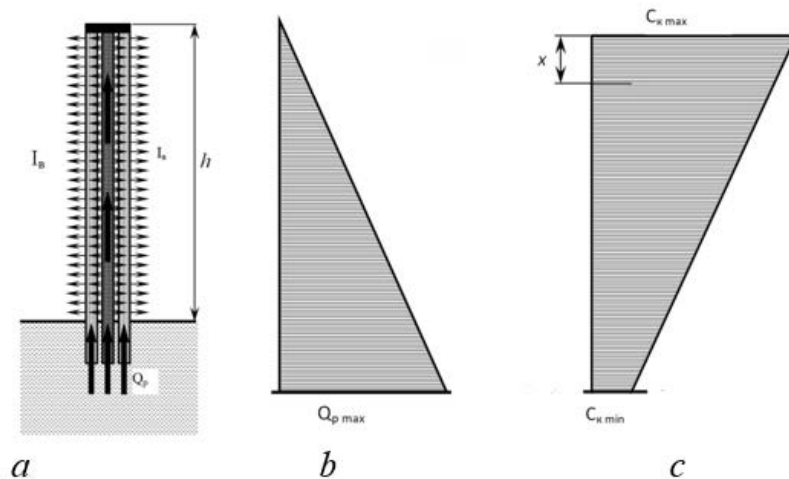


Fig. 5. Model of operation of low-temperature evaporator:

- a - scheme of movement of the liquid phase; b - diagram of the change in the flow rate of the liquid phase on the height of the evaporator; c - diagram of the change in the concentration of the components of the liquid phase along the height of the evaporator

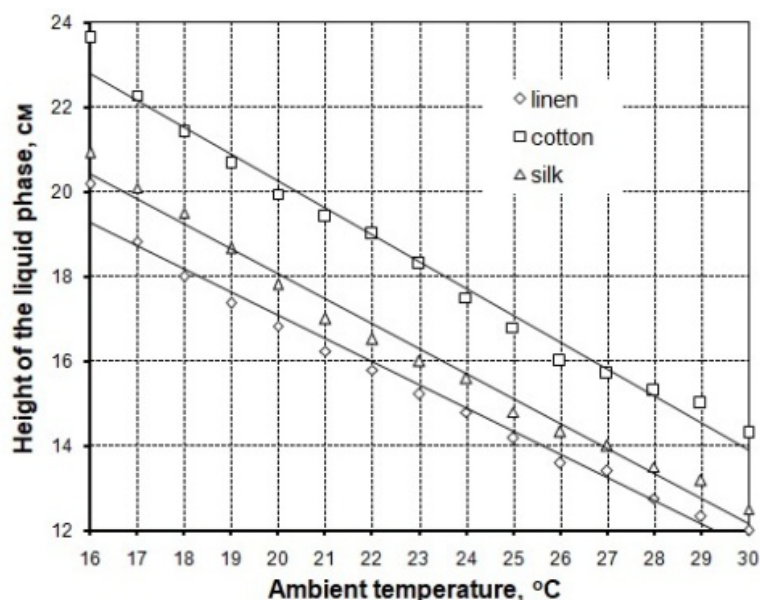


Fig. 6. The dependence of the height of the liquid phase in the strips of fabric on the ambient temperature

During the experiment with sodium chloride solutions, it was found that it is almost impossible to accurately record the height of the liquid phase in the pores of the fabric for such solutions, because once moistened fabric does not change its appearance even after complete evaporation of water from its pores. Therefore, the main indicator of the research phase was the volume of solution that evaporated during the day from the surface of the cloth.

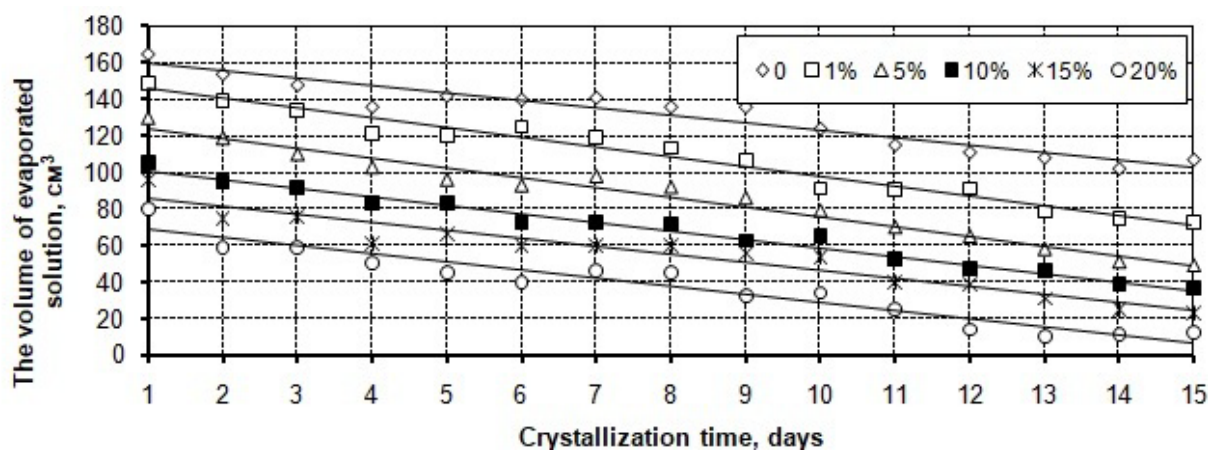


Fig. 7. Decrease in intensity of crystallization in time at various concentrations of sodium chloride

This also took into account evaporation from the surface of the liquid phase in the tank. It was found out that the crystallization process for solutions of sodium chloride is quite intense and the faster the solid phase is formed, the higher the

concentration of the solution. In the process of crystallization there is an increase in crystals on the surface and in the pores of the fabric, their enlargement. However, over time, the amount of concentrate that evaporates on the surface of the fabric begins to decrease. This is especially noticeable in experiments in the laboratory, when there are no air flows and the fabric is in a stationary state.

In our opinion, the mechanism of this process is as follows. The initial solution in the pores of the fabric rises to the maximum height for these conditions. As it moves up, the amount of water decreases as a result of evaporation, and the salt concentration increases. The maximum concentration of salt will be formed at the highest point of rise of the solution, where after reaching supersaturation the corresponding crystals will be formed. Moreover, at the highest point, crystals will form not only on the fabric surface, but also in the pores. Therefore, the penetration height of the solution begins to decrease and the crystallization process is inhibited. The area of crystal formation is constantly decreasing. Since it is difficult to clearly record the movement of the boundaries of this area, we recorded in experiments the change over time in the volume of the solution that evaporated in one day.

The results of the experiment are shown in fig. 7. As can be seen from the figure, even with the evaporation of tap water there is a decrease in the intensity of evaporation as a result of crystallization of various salts and compounds. For 15 days this decrease is 37.5 %. For a 20 % solution of sodium chloride, the same parameter reaches 86%. And further decrease is observed.

Although it should be noted that with decreasing crystallization, there is a dissolution of some of the crystals located in the pores of the fabric, because the solution does not have time to reach saturation. As a result, the exfoliation and failure from the fabric under the action of its own weight of previously formed crystals is observed. Thus, the fabric is regenerated and it can be used for a long period of operation without additional processing. However, for example, for cotton, the width of the crystallization site does not exceed 10 cm, which is almost unacceptable for productive systems.

It should also be noted that as the concentration of sodium chloride increases, the volume of the liquid phase that rises through the pores and evaporates from the surface of the fabric decreases significantly (fig. 8). This fact can be explained as follows. As the concentration of sodium chloride increases, the main characteristics of the solution change – the coefficient of surface tension, the edge angle of wetting the liquid walls of the capillary, increases the density and viscosity of the solution. If we consider the classical formula of capillary rise of fluid (1), it is clear that these characteristics are decisive in this process. For example, for a solution of sodium chloride with a concentration of 20 %, the density is 1.147 g/cm^3 . Therefore, it is obvious that the increase in the density of the solution and its viscosity leads to a decrease in the rise height of the liquid phase and, accordingly, to a decrease in the total evaporation rate (fig. 8). This fact must be taken into account when developing real equipment for industrial use, because the productivity of changing the concentration of the solution from 0 to 20 % is reduced by 2.5 times.

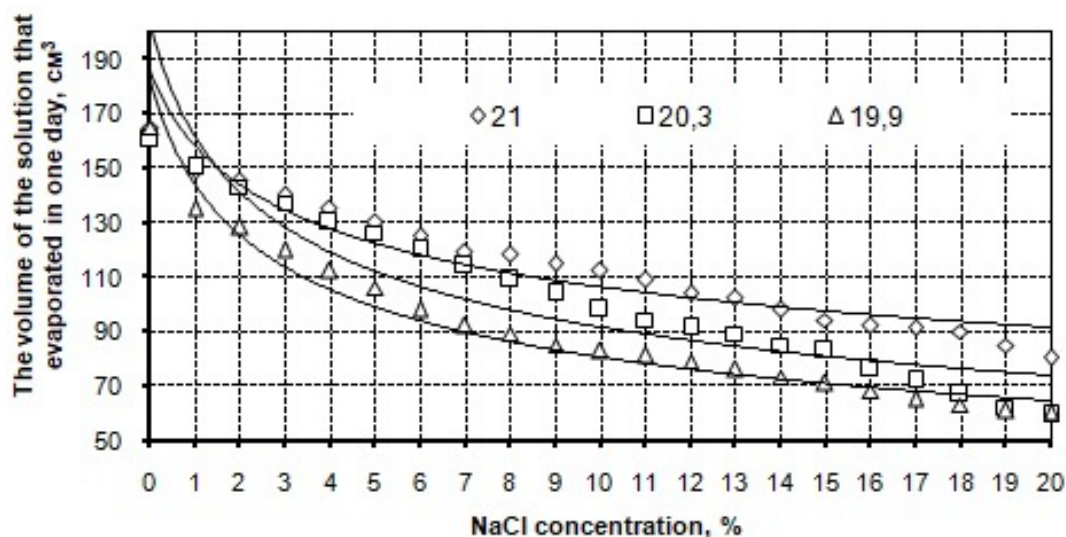


Fig. 8. Change in the intensity of evaporation depending on the concentration of sodium chloride solution at different temperatures (°C)

Designs of evaporation equipment based on materials with capillary properties

The disadvantage of these methods of crystallization of substances using materials with capillary properties is in the form of a strip of fabric which is limited height of the liquid phase in the fabric, that significantly limits the productivity of

such devices. Therefore, we have proposed a new design of a multilayer crystallizer. Its difference is that it consists of several different height layers of fabric 2, separated by waterproof partitions 3 (fig. 9a). This design, placed in the tank 4, can significantly increase the productivity of the crystallizer, feeding the liquid phase in well-defined areas.

Since the layers of fabric are isolated from each other, the evaporation of the liquid phase will occur only in the upper open part of each layer. In this case, the liquid phase does not evaporate through the transport path, as it is isolated from neighboring layers and the atmosphere. The location of the solid phase crystallization can be adjusted by changing the location and width of the open upper zone. If under normal conditions the level of rising of the liquid phase in the fabric is 20-25 cm, then with this design it increases to 45-50 cm, increasing the productivity of crystallization by 1.5-2.0 times. The result of using a mold of this design is shown in fig. 9b.

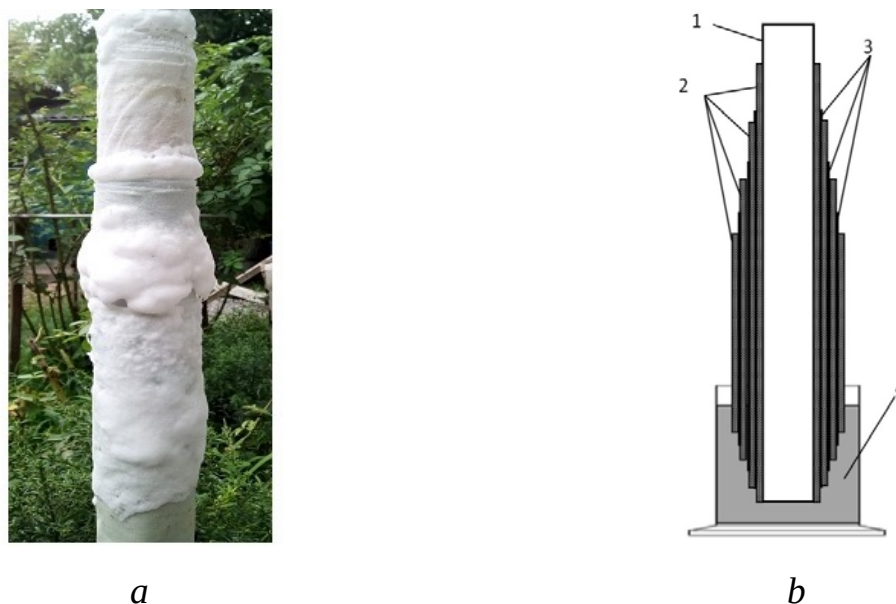


Fig. 9. Scheme of a multilayer crystallizer (a) and an example of the results of its work (b)

During the research work it was also recorded that in a room where there are no air flows, the decrease in the intensity of crystallization is more intense than in natural conditions. We have explained this fact both by the influence of air flows on the intensity of evaporation and by the periodic destruction of the formed crystalline structures and the formation of new pores for the movement of solutions in the

volume of tissue and salt. Therefore, we proposed a new design of the crystallizer with a movable fabric (fig. 10).

This design has a number of significant advantages, despite some complications. First of all, the evaporation area is doubled, because the solution rises in both branches of the fabric at the same time. Moving the fabric avoids filling pores and gaps in it. During the passage of the upper drum, the fabric is subjected to intense mechanical stress, as a result of which the deposited crystals are destroyed, opening the way for the solution. Further movement of the fabric leads to its entry into the container with the solution, where the previously deposited crystals dissolve altogether. Thus, there is a regeneration of a fabric takes place that allows to operate the equipment before physical wear.

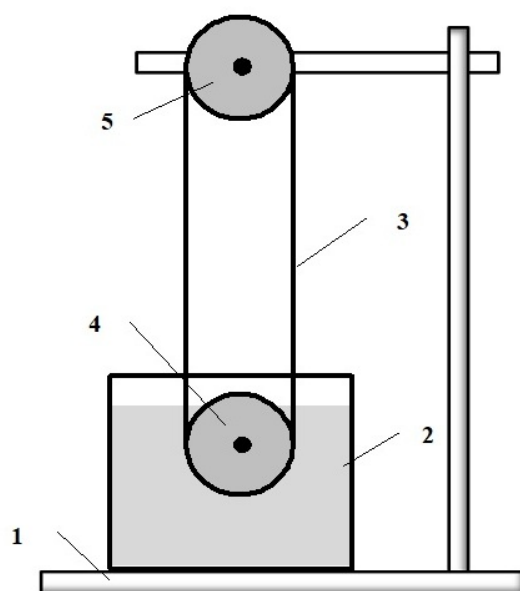


Fig. 10. Crystallizer with movable fabric:

1 - tripod; 2 - container with solution; 3 - endless fabric; 4 - lower drum; 5 - the upper drum

This design allows to organize simply the automatic capture and removal outside the crystallizer of crystals of precipitated salts when they are destroyed on the upper drum. The speed of movement of the endless fabric is selected in each case depending on the concentration of the solution, ambient temperature and other factors. At the same time the movement of a fabric can be carried out both manually, and by means of electric mechanism.

Our experiments on the experimental crystallizer (fig. 10) fully confirmed the above conclusions. Thus, at an average daily temperature of 20 °C, a concentration of sodium chloride of 100 g/dm³, a fabric width of 10 cm and a distance between drums of 50 cm, a fabric speed of 5 cm/day was acceptable. About 80 cm³ of the solution evaporated per day and about 8 g of sodium chloride crystallized.

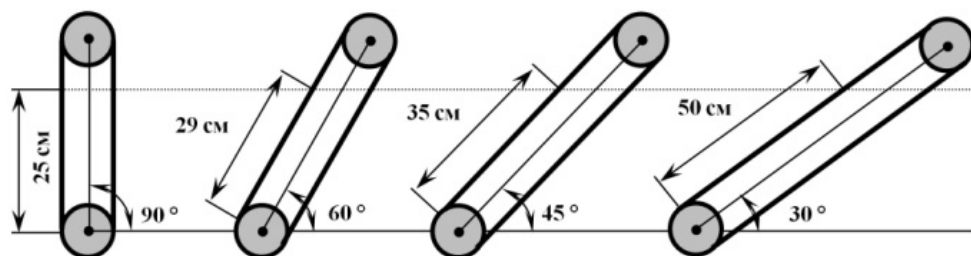


Fig. 11. Installation options for a movable fabric to increase the evaporation area and productivity of crystallization

A significant disadvantage of the design described above is the low productivity, which is limited by the height of the liquid phase in the porous medium while evaporating to a height of 15-20 cm. One way to solve this problem can be the installation the fabric at an angle to the horizon.

If we consider the fundamental formula for determining the height of the liquid phase in the capillaries (1), it is clear that this value does not depend on any horizontal factors. Thus, from a theoretical point of view, for panels of any length placed at an angle to the horizon or horizontally, the liquid phase should rise to a certain height under any conditions. At the same time the area of evaporation and, accordingly, productivity of the equipment essentially increases.

So, for example, if in vertical position height of raising of liquid makes 25 cm at inclination at an angle to horizon in 60° length of the wetted part of a fabric will make 29 cm, inclinations in 45° – 35 cm, inclinations in 30° – 50 cm (fig. 11). Theoretically, fabrics of any length can be installed horizontally. We have recorded that at the specified length up to 2 m (longer fabric have not been studied due to the inconvenience of their maintenance and fixation in natural conditions), this principle works quite well, it is only need to match the volume of transported solution with the volume evaporating transportation routes.

Our research on the installation (fig. 10) with different options for installing a movable fabric (fig. 11) confirmed that changing the angle of the fabrics to the horizon significantly affects the main parameters of the process, and the length of the wetted part and the amount of evaporation surfaces change practically on similar dependence (fig. 12). This approach can significantly increase the productivity of the crystallization method and make it more attractive for practical application.

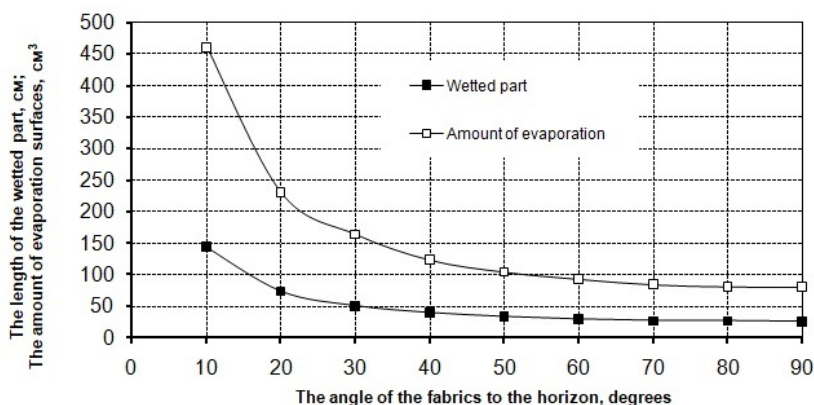


Fig. 12. The influence of the angle of inclination of the moving fabric on the main characteristics of the crystallization process

Based on the above considerations, we have developed a low-temperature crystallizer for the neutralization of concentrated solutions (fig. 13). Four drums 1, able to rotate around its own axis, covers the endless fabric 2. At one end, the whole structure is immersed in a container with concentrate 3, from where the capillaries of the fabric solution is fed to the entire length of the fabric. Both the upper and lower branches get wet. In the process of evaporation on the surface and in the pores of the fabric crystals of substances are formed from the solution. The most intense crystallization process is observed near the far drum, where the concentration of solvent is minimal and the concentration of supersaturation of the basic substance is quickly reached. As a result, most of the fabric becomes inaccessible to the solution, which reduces the productivity of the process as a whole. To prevent this phenomenon, the fabric is constantly or periodically moving clockwise. This allows to distinguish three stages of its purification. In the first stage, the crystals in the

pores of the fabric are destroyed during the passage of the extreme right drum and the formed crystals are removed from its surface.

The main product accumulates in tray 4. In the second stage, the cloth enters the zone with higher capillary pressures and higher liquid phase costs due to the placement of the upper and lower branches at different levels. This helps to dissolve the crystals already formed in the fabric and automatically clean it of crystals on its surface as a result of their loss under the action of its own weight. Further movement of the fabric allows to carry out the third stage of purification – to completely dissolve the crystals deposited in the pores of the fabric and release them for efficient transportation of the original solution.

This design is easily automated, can work for a long time without additional maintenance, does not require significant material and energy costs. It is obvious that the speed of the cloth will be determined by many factors – the concentration and temperature of the solution, the intensity of evaporation of the solvent, the dimensions of the structure, the characteristics of the solution and substances that crystallize, etc. All this is easily coordinated for real conditions and real solutions. Our research fully confirmed the above conclusions.

It was found out that when forming a fabric from one layer of cotton with a thickness of 0.15 mm even at an ambient temperature of 20 °C evaporation occurs so quickly that during the day at a distance of 17.5 cm from the container with the solution on the fabric a layer of sodium chloride crystals is formed rather fast, indicating the absence of liquid phase on the other part of the fabric. It was not possible to change the situation even when the distance from the liquid phase mirror to the upper branch of the cloth was reduced from 8 to 6 cm. If take into account the evaporation area of only the upper branch of the fabric, the average evaporation rate of sodium chloride solution with a concentration of 100 g/dm³ was 4.11 dm³/m²·day at a temperature of 20 °C and parameter $h = 8$ cm (fig. 13).

When increasing the number of layers in the fabric to 3, the maximum distance of movement of the liquid phase is 33 cm and stabilizes after 6 hours (fig. 14). The reduction of the value of the parameter h to 6 cm allows to ensure the wetting of the

fabric for the entire length. Calculated under such conditions, the evaporation intensity was $4.13 \text{ dm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ at a temperature of 20°C and the value of the parameter $h = 8 \text{ cm}$ (fig. 13).

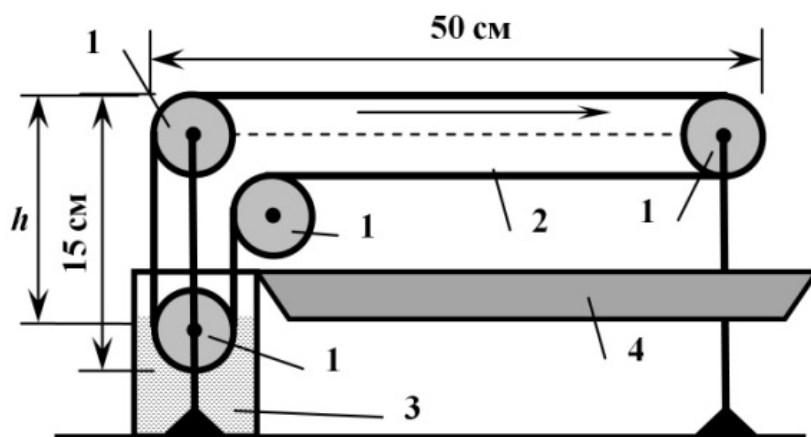


Fig. 13. Low-temperature crystallizer with movable fabric:

1 - drums capable of rotation; 2 - fabric; 3 - container with solution; 4 - tray for crystals

A further increase in the thickness of the fabric to 5 layers showed that after 5 hours the fabric is wetted to its full length. The change h in the range of 5-8 cm does not significantly affect the evaporation intensity. Calculated under such conditions, the evaporation intensity was $4.63 \text{ dm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ at a temperature of 20°C and the value of the parameter $h = 8 \text{ cm}$.

Temperature has a significant effect on the intensity of evaporation. We conducted experiments on a low-temperature crystallizer (fig. 13), and only the solution the base tank was heated. The ambient temperature was 10°C . As can be seen from fig. 15, an intensive increase in the volume of liquid that evaporates at a given temperature of the solution is observed only up to temperatures of 60°C . A further increase in the temperature of the solution is not accompanied by a significant increase in the volume of the evaporated liquid phase. Obviously, at such a low ambient temperature, heating only the solution in the original tank can not significantly affect the overall intensity of the process, because at low speeds of the liquid phase in the fabric already at a distance of 10-15 cm from the tank succeeds. Significantly increase the intensity of crystallization is possible only if the crystallizer is placed in a closed volume with the appropriate temperature.

In addition, it should be noted that for such a design 5 layers of fabric is sufficient, as the fabric is completely wetted by the liquid phase. Increasing the thickness of the fabric is justified only in the case of increasing the length of the low-temperature crystallizer.

Experiments conducted in the environment with different thickness of the fabric showed that even a slight increase in ambient temperature is much more effective than just heating the liquid phase.

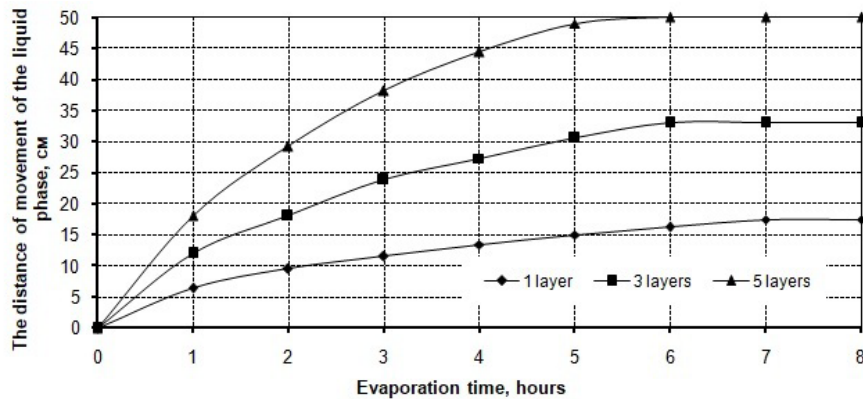


Fig. 14. The speed of wetting the fabric at different thicknesses

Thus, heating the solution to a temperature of 50 °C when using a cloth from 1 layer of fabric increases the intensity of evaporation from the surface of the fabric by 50 % compared to a temperature of 20 °C (fig. 15). To ensure the same characteristics while heating both the solution and the cloth is enough to increase the temperature to 25 °C (fig. 16). Similar results were obtained for fabrics of 3 and 5 layers of fabric.

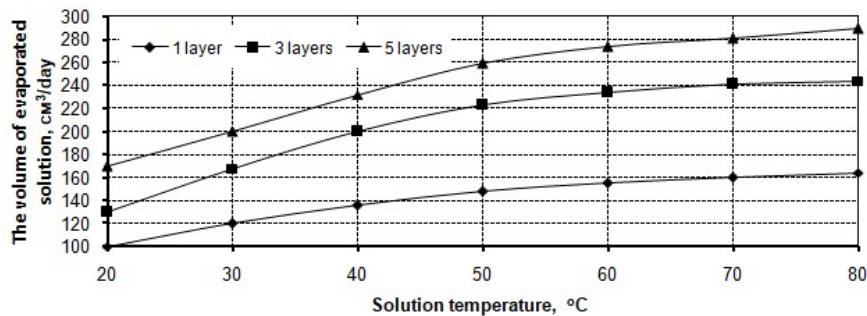


Fig. 15. Influence of liquid phase temperature on the intensity of evaporation from the surface of the fabric

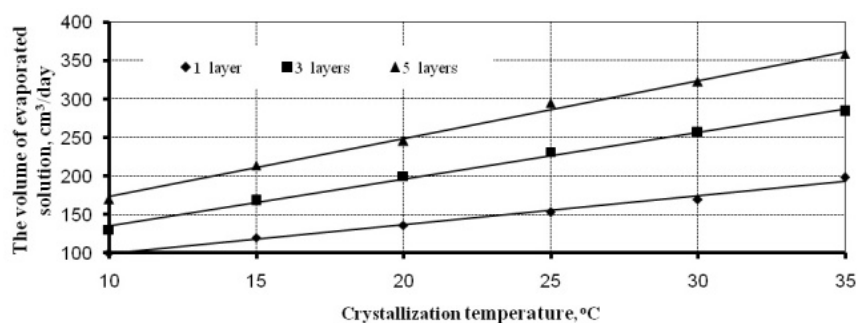


Fig. 16. Influence of ambient temperature on the intensity of evaporation from the surface of the fabric

Conclusions and prospects for the development of the direction

1. The conducted researches allow to assert about possibility of application of materials with capillary properties in processes of evaporation of liquids and crystallization of their components. At the basis of the process is the ability of liquids to rise vertically through small capillaries in a variety of materials. The combination of capillary rising of liquid and its evaporation on the way of movement allows to realize extremely simple, cheap and effective systems of evaporation of liquids and crystallization of their components.

2. The conditions of application of such systems are substantiated, the main factors influencing their efficiency, their advantages and disadvantages are described. The achievement of indeterminate height of the fabric of the conditions of crystallization of dissolved substances is theoretically substantiated and dependences for calculation of parameters of crystallization zone are offered.

3. Several options of equipment for realization of the described effect are offered. A study of laboratory samples of such equipment, the main advantages and disadvantages of each design. Developed designs of crystallizer-evaporators are ready for application on an industrial scale. Due to the minimal energy costs, and in some cases such equipment can be operated without energy supply at all, there is no negative environmental impact on the environment during operation.

References

- Alberghini, M., Boriskina, S. V., Asinari, P., & Fasano, M. (2022). Characterisation and modelling of water wicking and evaporation in capillary porous media for passive and energy-efficient applications. *Applied Thermal Engineering*, 208, 118159.
- Ali, M. (2021). Nanofiltration Process for Enhanced Treatment of RO Brine Discharge. *Membranes*, 11.
- Alonso, G., del Valle, E., & Ramirez, J. R. (2020). Desalination plants. *Desalination in Nuclear Power Plants*, 31-42.
- Berger, E, Froër, O, & Schäfer, R. B. (2019). Salinity impacts on river ecosystem processes: a critical mini-review. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 374, 20180010.
- Berthier, J., & Brakke, K. A. (2012). Capillary Effects: Capillary Rise, Capillary Pumping, and Capillary Valve. *The Physics of Microdroplets*, 183-208.
- Bongarala, M., Hu, H., Weibel, J. A., & Garimella, S. V. (2022). A figure of merit to characterize the efficacy of evaporation from porous microstructured surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 182, 121964.
- Buzylo, V., Pavlychenko, A., Savelieva, T., & Borysovska, O. (2018). Ecological aspects of managing the stressed-deformed state of the mountain massif during the development of multiple coal layers. *Paper presented at the E3S Web of Conferences*, 60.
- Cañedo-Argüelles, M., Kefford, B. J., Piscart, C., Prat, N., Schäfer, R. B., & Schulz, C-J. (2013). Salinisation of rivers: an urgent ecological issue. *Environ. Pollut.*, 173, 157-167.
- Chyhyrnyets, O. E., Fateev, Y. F., Vorobiova, V. I., & Skyba, M. I. (2016). Study of the mechanism of action of the isopropanol extract of rapeseed oil cake on the atmospheric corrosion of copper. *Materials Science*, 51(5), 644-651.
- Ferry, J., Widyolar, B., Jiang, L., & Winston, R. (2020). Solar thermal wastewater evaporation for brine management and low pressure steam using the XCPC, *Applied Energy*, 265, 114746.

- Khayet, M., & Matsuura, T. (2011). *Membrane Distillation: Principles and Applications*. Elsevier B. V. ISBN-13:978-0444531261
- Kyrii, S., Dontsova, T., Kosogina, I., Astrelin, I., Klymenko, N., & Nechyporuk, D. (2020). Local wastewater treatment by effective coagulants based on wastes. *Journal of Ecological Engineering*, 21(5), 34-41.
- Levchuk, I., José, J, Márquez, R, & Sillanpää, M. (2018). Removal of natural organic matter (NOM) from water by ion exchange – A review. *Chemosphere*, 192, 90-104.
- Martínez, J., León E., Baena-Moreno, F. M., Rodríguez-Galán, M., Arroyo-Torralvo, F., & Vilches, L. F. (2020). Techno-economic analysis of a membrane-hybrid process as a novel low-energy alternative for zero liquid discharge systems. *Energy Conversion and Management*, 211, 112783.
- Mericq, J.-P., Laborie, S., & Cabassud, C. (2010). Vacuum membrane distillation of seawater reverse osmosis brines. *Water Res.*, 44, 5260-5273.
- Morillo, J., Usero, J., Rosado, D., El Bakouri, H., Riaza, A., & Bernaola, F.-J. (2014). Comparative study of brine management technologies for desalination plants. *Desalination*, 336, 32-49.
- Naidu, G., Ryu, S., Thiruvengkatachari, R., Choi, Y., Jeong, S., & Vigneswaran, S. (2019). A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage. *Environmental Pollution*. 247, 1110-1124.
- Ning, R. Y., & Tarquin, A. J. (2010). Crystallization of salts from super-concentrate produced by tandem RO process. *Desalin. Water Treat.*, 16, 238-242.
- Ostovar, M., & Amiri, M. (2013). A novel eco-friendly technique for efficient control of lime water softening process. *Water Environment Research*, 85(12), 2285-2293.
- Radovenchyk, I., Trus, I., Halysh, V., Krysenko, T., Chuprinov, E., & Ivanchenko, A. (2021). Evaluation of Optimal Conditions for the Application of Capillary Materials for the Purpose of Water Deironing. *Ecol. Eng. Environ. Technol.*, 22(2), 1-7.

- Rajca, M. (2012). The impact of selected factors on the removal of anionic water pollutants in ion-exchange process of MIEX®DOC. *Archives of Environmental Protection*, 38, 115-121.
- Remeshevska, I., Trokhymenko, G., Gurets, N., Stepova, O., Trus, I., & Akhmedova, V. (2021). Study of the Ways and Methods of Searching Water Leaks in Water Supply Networks of the Settlements of Ukraine. *J. Ecol. Eng. Environ. Technol.*, 22(4), 14-21.
- Talaeipour, M., Nouri, J., Hassani IO, A. H., & Mahvi, A. H. (2017). An investigation of desalination by nanofiltration, reverse osmosis and integrated (hybrid NF/RO) membranes employed in brackish water treatment. *Environ Health Sci Eng.*, 15, 18.
- Trus, I., Gomelya, M., Skiba, M., Pylypenko, T., & Krysenko, T. (2022). Development of Resource-Saving Technologies in the Use of Sedimentation Inhibitors for Reverse Osmosis Installations. *J. Ecol. Eng.*, 23(1), 206-215.
- Trus, I., Radovenchyk, I., Halysh, V., Skiba, M., Vasylenko, I., Vorobyova, V., Hlushko, O., & Sirenko, L. (2019). Innovative Approach in Creation of Integrated Technology of Desalination of Mineralized Water. *Journal of Ecological Engineering*, 20(8), 107-113.
- Trus, I., Gomelya, N., Halysh, V., Radovenchyk, I., Stepova, O., & Levytska, O. (2020). Technology of the comprehensive desalination of wastewater from mines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/6(105), 21-27.
- Zhang, C., Shi, Y., Shi, L. et al. (2021). Designing a next generation solar crystallizer for real seawater brine treatment with zero liquid discharge. *Nat Commun.*, 12, 998.
- Zhang, J., Wang, D., Chen, Y., Gao, B., & Wang, Z. (2021). Scaling control of forward osmosis-membrane distillation (FO-MD) integrated process for pre-treated landfill leachate treatment. *Desalination*, 520, 115342.
- Zhao, N., Feng Y., Li, D., & Li, Z. (2021). Simulation Study on Centrifugal Spray Evaporation Characteristics and Process Optimization of Desulfurization Wastewater, *Coatings*. 11(7), 837.

HYDROECOLOGICAL ANALYSIS OF IMPACT OF THE FILTRATION FROM MAIN CHANNELS ON THE PROCESSES OF FLOODING BY THE GROUND WATERS THE ADJACENT TERRITORIES IN KHERSON REGION

Telyma S.V., Institute of Hydromechanics of NAS of Ukraine, cand.sc.(technic),
Senior Research, Ukraine

Abstract

In article the current state of the problem of the regional flooding by ground waters in Kherson area is analysed. The main reasons and factors forming of the flooding processes dynamic stipulated by the filtration losses from the net of main and distributive channels and theirs ecological and technogenic impact on environment of the adjacent territories are identified. The quantitative assessment of filtration losses from the system of channels and the results of the forecast of theirs influence on the rise of ground waters levels and the formation of flooding processes are presented. It was found out that the main filtration losses have a place from the net of distributive channels which are operating in temporal regime and without the lining. That to increase the effectiveness of the main channels the operation regime of the full filling of channels during the year is recommend and for the small ones using of the rational type of the lining screens in depends on the soil base under the channel bottom. In general that to decrease the filtration losses from the channels of different levels it is necessary to use of the corresponding lining with new materials and the choice of the optimal constructions of the protective screens that to minimize the losses through system “lining-soil base”.

Introduction

In recent years the processes of land flooding in Kherson region began to acquire a regional character, covered a significant part of its territory and nowadays constitute a serious environmental problem (Balyuk, Romaschenko & Truskavetskyi,

2015; Bruyako, Krasova & Tyuremnina, 2003; Ecological passport..., 2012; Resolution..., 2006; Trofimchuk, Yakovlev & Hlebchuk G.S., 2004; Yakovlev, 2005). In this regard the Kherson region occupies a special place in relation to this problem as due to the creation of the Kakhovsky reservoir, a network of irrigation systems, main canals and unregulated water use the hydrogeological conditions and water exchange in the active zone of the sedimentary layer of waterbearing rocks have radically changed. As a result a significant amount of lands turn out in the zones of flooding and potential flooding. Thus as on 2015-2020 years more than 70 % of its territory and more than 260 cities and settlements with a total area of up to 1,200 thousand hectares were flooded which is almost 20 times more than in 1982 (Telyma, 2022; Telyma, Voloshkina, Anpilova, Efimenko & Yakovlev, 2020). As shown by monitoring data of the ecological state of the region the annual increase in flooded areas is 50,000 ha (Telyma, 2022; Telyma et al., 2020). It should be noted that the geological and hydrogeological conditions on the territory of the Kherson region are characterized by their complexity and diversity and were insufficiently studied in the process of designing and building the Kakhovsky Reservoir, the North-Crimean Canal, existing irrigation systems and water management structures which caused the current state of flooding in the one region. A combination of natural and man-made factors the main of which are weak natural drainage, a change in climatic conditions, the creation of various reservoirs, losses from utility networks, the practical absence of functioning drainage systems, numerous irrigation facilities and unregulated irrigation cause the further flooding of the region today (Ecological passport..., 2012; Yakovlev, 2005). A significant contribution to the hydroecological situation on the territory of the region is also made by the existing system of main and distribution canals, the filtration losses of which formed the significant areas of flooding lands in adjacent zones of their influence. Schematic map of flooding of Kherson region on 2012-2015 is presented below (fig. 1).

The main aim of the performed investigations consist in detailed analysis of the reasons and factors of the forming the hydroecological regime on adjacent to the main channels territories under the influence of the filtration losses from the net of

the channels of the different levels and to carry out the forecast of the processes of flooding in the given region. The methodic of investigations bases on the modern theoretical and experimental assignments about water-and mass exchange in saturated-unsaturated media and using of the mathematical modeling.

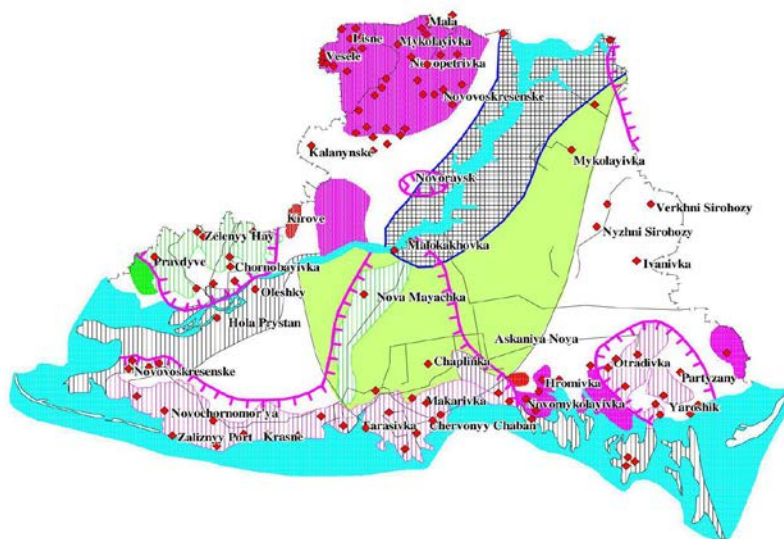


Fig. 1. The schematical map of the flooding dynamics in the region from 1982 to 2012-2015 years.

The Legend: - technogenic flooding; - through backwater of Kakhovka Reservoir; - flooding through natural and technogenic factors; - increase of the flooded areas compared to 1982 through irrigation; - increase of technogenic flooding compared to 1982; - flooding through irrigation (as at 2015); - increase of flooding of the areas as at 2015; - flooding on a set of factors; - forecasted zone of flooding as a result of irrigation

The complex hydrogeological and reclamation situation that has developed in this territory requires appropriate predictive calculations of changes in the ground waters regime and the development of a set of measures to protect lands and settlements from this negative phenomenon (Ryabtsev, 2005; Telyma, 2006).

The article presents the results of studies on the assessment of the influence of main and distribution channels on the regime of ground waters in the drainage areas due to filtration losses during their operation. Quantitative characteristics of these losses from the network of channels are presented and the main causes and factors of their formation are clarified.

Research results

In order to reduce filtration losses from channels which contribute to the flooding of areas adjacent to the channels the various designs of antifiltration lining are widely used. For example on Kakhovka irrigation system the main channel is made with the soil-film lining and the distribution channels with the use of concrete one. However many channels today have ineffective designs of antifiltration lining which causes significant filtration losses from them (Levytska, 2018; Ryabtsev, 2005; Chernyshevskaya, 2006).

In general if you take the entire area of flooded land in the region what is more than 1020792 hectares the area of flooded land on irrigation systems is about 10.9 % (111403 hectares) of this total area and the main areas of flooding are in the zones of influence of the Kakhov reservoir, main and distribution channels and within numerous settlements (Ryabtsev, 2005; Telyma, 2018). At the same time the lands in the area of Zaliznyi Port – Skladovsk as well as in the area of the Krasnoznamyanskiy main canal were flooded completely (Ryabtsev, 2005).

The current state of hydrogeological and reclamation conditions in the territory Kherson region largely depends on the nature and intensity of water exchange in the active zone of the aquifer layer in sedimentary rocks. Schematizing the hydrogeological conditions in the catchment areas it is possible to propose the following generalized calculation scheme of water exchange which is characteristic for this territory, namely: calculation scheme of a three-layer layer with leakage. The first layer is an aquifer with a free surface in a flooded layer of Quaternary sediments; the second layer is a weakly permeable waterproof layer of red-brown clays of variable strength; the third layer is an aquifer in Neogene sediments (Water exchange..., 1991; Telyma, 2018).

In natural conditions before the construction of numerous hydrotechnical structures the feeding of the ground waters aquifer in addition to infiltration from above due to atmospheric precipitation occurred mainly from the bottom-up and the Neogene aquifer regulated its level regime due to the difference in pressures in these horizons (Water exchange..., 1991; Ecological passport..., 2012).

Now such regime also prevails in the coastal areas as the horizontal component of soil flow is much smaller than the vertical one. The reason is that the eolian-deluvial layer of Quaternary sediments is characterized by a sharp filtration anisotropy with predominant filtration characteristics in the vertical direction (Telyma, 2006, 2010, 2015). Therefore the groundwater regime has the quasistationary character both during rises and falls of levels ground waters. In general the levels of ground waters depend on the filtration losses from channels and infiltration supply of soil flow on irrigation arrays.

Most of the adjacent to the canals areas are flooded and a free filtering mode is observed which is due to the technical characteristics of the channels. With their spring filling a rapid rise in ground waters levels is observed within 60-90 days and directly near the canals at distances of 20-50 m the magnitude of the rise in ground waters levels is 2.5-3.5 m. The rise in levels is accompanied by the formation of the domes of the ground waters under the channels. By the end of the period of rise of groundwater their levels close with the free surface of the water in the channel and the filtration of water from the channel almost stops since the horizontal component of the filtration flow is practically zero and prevails the vertical water exchange.

At the end of the growing season when water from the canals is discharged at their drainage a reverse process in the ground waters regime is observed which is accompanied by a decline in ground waters levels. They decrease below the bottom of the canals throughout the autumn-winter period and the ground waters regime returns to the initial stage of its formation. Such a process takes place annually periodically changing the conditions of feeding the soil flow from the system of main and distribution channels. When draining the canals during the autumn-winter period the saturated soil prism on the slopes of the canals is sucked into the channel thus forming a drainage runoff. At the same time the decline of ground waters levels occurs in a quasistationary regime and the depression curve of the subchannel dome falls parallel to itself and the spreading of the domes in the horizontal direction is practically not observed.

Four main canals (MK) are operated within the region: Inguletsky, Main Kakhovskiy, Krasnoznam'yanskiy and North-Crimean (Telyma, 2006, 2007).

All of the above canals were built at different times using different construction technologies and their impact on the environment during operation has its own differences and peculiarities.

As the analysis of numerous field observation data and other studies shows the filtration losses from the MC make up from 6 to 8 % of the main water intake and almost 20 % goes to emergency discharges. In the interfarm network of canals filtration losses are more significant and make up about 45 % of the total losses within all irrigation systems (Ryabtsev, 2005; Telyma et al., 2020) .

Filtration losses from channels are determined by the design of the lining, the permeability of the soil base, hydrogeological conditions and the dynamics of the soil flow. Thus filtration losses at the Main MK of the Kakhovskaya IS (irrigation system) with soil film lining are $3.4-8.1 \text{ l/day} \times 1\text{m}^2$ and at the North Crimean MK with concrete film lining from prefabricated reinforced concrete slabs – $5.72-11.44 \text{ l/day} \times 1\text{m}^2$ (Telyma, 2015; Chernyshevskaya, 2006).

The study of filtration losses on different channels shows that there is one general pattern, namely: filtration losses from main channels are smaller than from distribution channels regardless of the type of reclamation system.

Filtration losses from channels quantitatively and qualitatively depend on the stage of filtration: the first stage is free filtration and the second is back water filtration (Averyanov, 1982; Chernyshevskaya, 2006). The transition from one stage to another depends on a set of factors, the main of which are: the dimensions of the channel, water-physical properties of the soil, conditions of underground leakage, the initial level of groundwater, the duration of the operation of the channel, the dynamics of ground waters and filtration properties of the protective lining. How it was said above the duration of the first stage is approximately 60-90 days and then comes the stage of back water filtration which is the main stage for MK.

In unlined channels the first stage of filtration flow formation is divided into two phases: the phase of soil absorption or saturation and the phase of capillary soil flow.

The first phase is characterized by the movement of water in a three-phase soil-water-air environment. Filtration costs at the initial stage are large and have a clearly expressed unsteady character. The movement of water occurs under the influence of capillary and gravitational forces and also depends on the depth of water in the channel.

The second phase of free filtration begins from the moment when the filtration flow closes with the capillary film of ground waters and begins to interact with ground waters.

Supported filtration is characterized by a continuous flow of ground waters. The stage of back water filtration was the longest in continuously operating channels where it has been observed for many years of their operation. Filtration has an unsteady nature and the filtration costs decrease over time. This stage is of primary importance for the assessment of filtration losses and ground waters support near permanent channels (Averyanov, 1982; Telyma, 2006; Chernyshevskaya, 2006).

In channels with lining the first stage is divided into two phases: the phase of soil saturation and the phase of rising ground water under the channel.

The first phase continues until the water is filtered through the lining and passes through the soil of the aeration zone to the ground waters level. The filtration flow completely saturates the pores of the lining and the movement of the filtered water occurs in unsaturated soils. The saturation phase for lined channels is the longest compared to unlined channels.

In the saturation phase the filtration flow stabilizes after 5-10 days and its consumption becomes practically constant. This phase for permanently operating channels is characterized by a short time but is of great importance for intermittently operating channels.

After the water supply to the canals stops the ground water begins to spread. The water level in the channel drops to the bottom and the surface of the depression

curve of the filtration separates from the bottom of the channel. After a new supply of water into the channel first free (first stage) filtration is observed and then back water filtration (second stage) and then spreading and repeating the whole cycle again. The soil flow is formed against the background of the process of rising and falling water in the channel. Quantitatively and qualitatively it differs from unlined and lined channels.

As an example consider the results of research on the filtration losses at the Main Channel of the Kakhovka irrigation system (MC KIS) (Telyma, 2006, 2007).

Part of the MC route (about 30 %) passes through pods – natural, drainless terrain depressions the soils of which are characterized by low filtration properties and heavy mechanical composition.

In general the channel is designed for a flow rate of 530 m³/s, has a depth of 8 m and a width at the top of 100.0 m.

According to the data of field studies the amount of filtration losses from MC in paddy soils is $q = 0.0046 \text{ m}^3/\text{day}$ per 1 m² of the wetted surface of the channel or $q = 174 \text{ m}^3/\text{day}$ per 1 km of one.

It should be noted that the indicated values of filtration losses refer to the first stage of unsteady filtration when the filtration flow has not yet reached ground water.

The obtained values of filtration losses from the canal are insignificant and can be explained by the features of the geological structure of this section of the canal route and the small filtration coefficients of the subsoil and underlying rocks.

Observations of filtration losses showed that the filtration flow through the layer of medium loams reaches the level of the roof of heavy loams along which the part of the filtered water spreads forming the first zone of full saturation and the other part of the water passes down into heavy loams where it again spreads over the roof of loess loams forming the second zone of complete saturation.

Analysis of filtration losses from canals in natural conditions shows that the smallest losses are observed in main canals and the largest ones in temporary irrigation canals and the furrows. Thus the filtration losses from the MC KIS are $q = 0.0046 \text{ m}^3/\text{day}$ with 1 m² of the channel surface, the distribution channels have

filtration losses equal to 0.064-0.147 m³/day, temporary irrigation channels $q = 0.280$ m³/day with 1 m² of channel surface and furrows $q = 0.480$ m³/day from 1 m² of furrow surface.

Studies of filtration losses from irrigation channels of various types (main channels, distribution channels, temporary sprinklers, distribution and irrigation furrows) show that the losses depend on the following factors: water-physical properties of the soil base of the channels, the presence of lining and its construction, the depth of water in the channel, stages of filtration, periodicity of channel operation, channel sizes, compatible interaction in the "lining-soil base" system, hydrogeological conditions, etc.

At the same time losses from lined and unlined channels indicate that unlined channels have filtration losses ten times greater than lined channels under the same conditions. Thus the filtration losses from the unlined channel P-4 of the North Rohachik system are equal to $q = 0.147$ m³/day from 1 m² of the channel which is quite significant ones. On the other hand at precast concrete lining $q = 0.06$ m³/day from 1 m² of the channel which is significantly less than losses from unlined ones.

As mentioned above the filtration losses for all cladding structures also depend on the depth of water in the channel. As the depth increases filtration losses also increase.

In addition to the above factors the size of the channels, dynamics of ground waters leakage, hydrogeological conditions, etc., affect on the amount of filtration losses. Thus according to S. F. Averyanov the dimensions of the channels affect on the first stage of filtration and at the second stage filtration losses depend on the dynamics of the outflow of filtered water (Averyanov, 1982).

Calculations of steady back water filtration in the presence of constant losses from channels and with a constant water horizon in them taking into account on the evaporation (infiltration) are based on filtration resistance methods (Telyma, 2022).

The necessity and expediency of using filtering resistance methods is determined by the existence near the channel of a zone of sharp flow deformation which as a rule does not extend beyond one or two flow thickness (provided that

$B_k \leq 0.25$ m, where B_k – channel width along the water front, m – thickness of the aquifer).

The effect of lining the channel is estimated by the equivalent effect which can be obtained by replacing the border of the wetted perimeter of the lining channel with a fictitious border of the unlined channel equivalent in terms of losses and the filtration pattern at some distance from the established border. In this case the calculation is performed as for an unlined channel but instead of the resistance Φ_k , the resistance $\Phi = \Phi_k + \Phi_{obl}$, where Φ_{obl} – filtration resistance due to the design of antifiltration lining.

Conducting numerous field experiments and theoretical studies showed that filtration losses decrease over time regardless of the depth of water in the channel and the head affects on the processes of free filtration in all cases but differently depending on the construction of the linings and the properties of the soil base.

In general the filtration losses from channels depend on the duration of the filtration process and on the following basic parameters of the soil: initial humidity, total moisture content, diffusion coefficient, porosity, filtration coefficient, capillary conductivity coefficient, suction pressure and bound moisture (Averyanov, 1982; Water exchange..., 1991; Telyma, 2022).

The results of numerical and analytical calculations of the impact of the operation of the main canals on the adjacent territories within the region and how it is redistributed in the presence of irrigation arrays are presented.

Inguletsky MC

The canal was built in 1951-1955, has a length of 53.35 km, including 24.2 km in the earthen channel, 21.09 km in the monolithic concrete-lined channel, and 8.06 km in the precast concrete-lined channel.

The engineering and geological conditions along the route of the canal are quite complex and are characterized by the presence of three layers of loess loam and two horizons of Quaternary soil (Water exchange..., 1991; Ecological passport..., 2012).

Water filtration partially occurs through the body of the dams on separate insufficiently compacted sections of the channel but it is insignificant since the soils in the body of the dams are sufficiently compacted and mainly occurs through the bottom of the channel (Telyma, 2006; Chernyshevskaya, 2006).

Based on the data of the experimental works the values of the filtration coefficients along the canal route were determined as: in the main and middle parts of the canal 0.25 m/day, in the tail part (the last 15 km of the canal) – 0.54 m/day and in the areas of the paddy lower reaches – 0.145 m/day.

Based on the analysis of the data of all field studies the following average values of filtration coefficients were obtained: for the soils of the main and middle part of the channel 0.2 m/day, for the soils of the tail part – 0.5 m/day, for glaucous rocks in the paddy areas – 0.15 m/day.

In connection with the fact that under natural conditions the water levels along the canal route were at depths of 10-25 m in the first years of the canal's operation the aquifer did not affect on the filtration of water from the canal and a regime of free filtration was observed.

The calculated losses for this filtration mode which were calculated according to Kostyakova's formula gave the following results (Averyanov, 1982):

- for the first 20 km of the route where the soil filtration coefficient was assumed equal to $K = 0.2$ m/day the amount of losses per 1 km was 5304.9 m³/day;
- in the area of the paddy drops at $K=0.15$ m/day – 3309.1 m³/day;
- in the tail part of the canal (the last 20 km) at $K = 0.5$ m/day – 8190.7 m³/day.

Total losses amount were approximately 58.83 million m³ of water per season (duration of canal operation 188 days).

The given data indicate that the losses from the Inguletsky Canal when its route was entirely in the dirt channel quite significant. After the reconstruction the route of the earth channel was 24.2 km, 21.09 km of the route was lined with monolithic concrete and 8.06 km with precast reinforced concrete. As a result the losses from the earth bed amounted to about 14.95 million m³ and from the lined part (28.15 km) – 3.5 million m³ and the total losses amounted to 18.45 million m³ which is almost

three times less compared to the total losses that were before when the entire track was only in the dirt channel.

In general by extrapolating the obtained data to the entire length of the channel it was determined that the losses are about 495,897 cubic meters/day which is 38 times less than the losses when the channel operated in free filtration mode without full lining.

To evaluate the influence of filtration from the canal on the rise of the ground waters levels (GWL) the filtration scheme of the sudden rise of water in the canal was used (Telyma, 2018). Since the filtration properties of the soil along the canal route differ among themselves which is reflected in the filtration coefficients the impact calculations in terms of distances L_0 from channel were carried out for three values of the filtration coefficients ($K = 0.2$ m/day, 0.15 m/day and 0.5 m/day). Forecast calculations were carried out for 5, 10 and 25 years. The year 2015 was chosen as the initial point in time. As a result of the calculations the following data were obtained: for the first section of the route 20 km long the influence of filtration will spread over a distance of 488, 631 and 856 m after 5, 10 and 25 years, respectively; for the second section 13.35 km long respectively 407,531 and 736 m and for the third section 20 km long 651, 822 and 1059 m respectively. In general the impact of losses from the canal on each side will spread along the route in a strip the width of which will vary from 407 to 651 m after 5 years and from 736 to 1059 m after 25 years.

Calculations of the direct tasks of estimating the rise of GWL at specified distances and at given forecast values of time gave values of GWL rise in the range from 0.1 to 0.6 m.

The performed predictive calculations evaluate the influence of filtration from the channel without taking into account on the infiltration w of the different origin. To assess the additional impact of irrigation occurring on irrigated lands located along the route of the canal appropriate predictive calculations of the rise in ground water levels ΔH on adjacent territories were carried out based on a formula of the type (Telyma, 2018):

$$\Delta H = \Delta H_0 \cdot R(\lambda) + \frac{wt}{\mu}(1 - R(\lambda)) \quad (1)$$

where $R(\lambda)$ special function: $R(\lambda) = (1 + 2\lambda^2) \operatorname{erfc}(\lambda) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \lambda e^{-\lambda^2}$,

ΔH_0 – level on the cut channel and μ -storage coefficient. If we take the characteristic value of infiltration supply for this region of 20 mm/year and the average value $\mu = 0.11$ then the forecast calculations of the rise of the GWL at the given distances and time will be: at $t = 5, 10$ and 25 years, $\Delta H = 0.9, 1.82$ and 4.6 m. At the same time as follows from (1) the component of the influence of the rise of the water level in the channel decreases with distance the general rise of the WGL to a greater extent begins to form the additional infiltration feeding and in our case on the territories adjacent to the channel their flooding at distances more than 1.5 km will be determined exclusively by the intensity of infiltration due to an unforeseeable increase in precipitation and irrigation.

Krasnoznamyanskiy MC

Krasnoznamyanskiy MC was built in 1962. Initially the route of the canal was made entirely in the ground bed in a half-dimmed-half-embankment. The length of the channel is 101.2 km. The width of the KMC along the bottom varies from 36 m in the main part to 2 m in the tail part. The depth of the channel is 3-4 m, the laying of slopes is 1:25. The through-put of the channel is from 64.4 m³/s at the head of the channel to 1.2 m³/s in its final part. The filling depth of the channel decreases from 3.5 to 0.9 m as it moves away from the main structure. The channel is seasonal in operation. Filling is carried out in April and emptying with the help of discharges into the sea – in October (Raybtsev, 2005; Telyma, 2006).

The canal affects on ground waters in the central elevated part of the irrigation massif and causes the rise of GWL to the north of the canal and in the central part of the massif.

According to the balance method the filtration losses for 1965 were determined as 0.213 million m³/day. The average value was taken for the entire channel as 0.2 million m³/day that is 1.98 m³/day for 1 m.

Long-term observations of the development of the flooding in the Krasnoznamyanskiy massif indicate that before the construction of the irrigation system flooding occurred only within a narrow (from 0.3 to 3.5 km) coastal strip along the sea where the absolute elevation of the land surface did not exceed 3 m.

To reduce the impact of losses it was lined with a total length of 58.8 km of which only 23 km were lined along the entire perimeter and 35.8 km were lined only along the slopes. Due to losses a dome of irrigation and ground waters was formed under the unlined part of the canal route. In general there was an increase in ground water supply in comparison with supply in natural conditions which led to the rise of GWL and the heads in the underlying Pliocene aquifer (Ryabtsev, 2005; Telyma, 2022).

Since the working water horizons in the canal due to its design features are forced to be maintained at high design levels the filtration losses from the canal bed under modern conditions remain the same as before.

The upper stratum of sedimentary rocks of the Quaternary age in which the channel is laid consists of the loams, fine and medium-grained sands, loams and loams and clays with a total thickness of up to 10 m. Under natural conditions GWL lay at depths of 4-5 m from the surface of the earth. Filtration coefficients of loams are 0.005 m/day and sands are 1-2 m/day. The amount of evaporation from the surface of the earth is about 150 mm/year (0.0004 m/day), the amount of infiltration supply is 25-60 mm/year (average value 30 mm/year = 0.000082 m/day), the coefficients of water conductivity T and storage μ respectively are 7.15 m²/day and 0.11.

Calculate losses from the channel for its average depth $H_0 = 2.0$ m for a site without an antifiltration screen the length 78.2 km (101.2-23.0=78.2) are $q = 0.06$ m³/day • 1 m. The amount of losses through the screen was 0.047 m³/day • 1 m that is the use of the screen reduced the amount of specific losses

by 1.3 times. The amount of losses from the section of the channel without a screen is 4692 m³/day and in the section with a screen – 1081 m³/day. If we take the data of field studies for comparison then they are close to the calculated ones (0.1 m³/day).

Based on the obtained calculations it can be concluded that in modern conditions the main filtration losses are formed in the system of distribution channels in the earthen channel.

The impact of losses from the MC on the adjacent territories was carried out similarly to the Inguletskiy MC. Since the water depth in the channel varies from 3.5 to 1.0 m the calculations of the impact distances were performed for crossings with a water depth in the channel of 3.5, 3.0, 2.0, and 1.0 m for a forecast period of 5, 10 and 25 years. As a result of the calculations the following data were obtained: for the intersection with $H_0 = 3.5$ m, $L_0 = 905, 1149.5$ and 1400 m respectively for a period of 5, 10 and 25 years; for the intersection with $H_0 = 3.0$ m, $L_0 = 866, 1084$ and 1363 m for the same time periods and for the intersection with $H_0 = 2.0$ m, $L_0 = 747.4, 889.1$ and 948 m.

In general the influence of filtration from the canal on both sides of the canal without taking into account the infiltration supply will spread in the form of a strip 907.0 m wide in the main part of the canal which decreases to 747.4 m in its tail part at the time after 5 years. After 25 years the width of the influence strip will be from 1400.0 to 948.0 m respectively in the main and tail sections of the channel.

The additional influence of infiltration feeding on the irrigation fields adjacent to the MC was estimated according to the formula (1). Calculations of the growth of GWL for the forecast period of 25 years for distances greater than the specified above when the rise of the GWL is formed entirely due to infiltration feeding was given the value of the increase $\Delta H = 6.8$ m.

Kakhovskyi MTC

The main trunk channel of the Kakhovska irrigation system is 130 km long, passes through the Dnipro-Molochna interfluvium in Quaternary deposits of loess rocks with a thickness of 15-20 m. The canal has a depth of 8 m, a width of 100 m at the

top and is designed for a water flow of 540 m³/s (Ecological passport..., 2012; Telyma, 2006).

A part of the channel route (about 30 %) passes through alluvial sediments. These soils are characterized by greater density, salinity, heavier mechanical silt and low filtration properties compared to the soils in the adjacent territories. Sandy-clay soils lie below ancient delta deposits with a total thickness of 18-25 m with filtration coefficients of 2.0-8.0 m/day. Beneath the sands are limestones and marls of the Neogene age with a thickness of 70-90 m in which the main aquifer of this region is spread (Water exchange..., 1991).

The construction of the canal was carried out in unwatered soils. Almost along the entire route of the canal with the exception of the section of the route in the puddly soil the canal has an antifiltration lining (soil film screen, lining with prefabricated reinforced concrete slabs on a polyethylene film or monolithic concrete). According to the observations the filtration losses from the canal vary from 0.005 to 0.120 m³/day * 1m² depending on the type of lining. As a result in comparison with other MC the dimensions of the irrigation-ground water dome under the canal are much smaller and reach the order of several hundred meters in plan. Thanks to antifiltration protection the losses from the MC are small. In addition the formation of irrigation-ground water domes is influenced by the lithological composition of rocks which determines the degree of connection of the water aquifer in the zone of influence of the channel with the underlying waterbearing horizons. With the presence and considerable thickness (4-6 m) of a poorly penetrated layer in the Pliocene-Quaternary sediments the flow into the Pliocene horizon is insignificant and the dome in the channel zone is widespread along the entire route of the channel.

In the absence or insignificant capacity of Pliocene-Quaternary clays the dome of irrigated – ground water decreases due to the flow of water into the underlying Pliocene aquifer. In this case the growth of the dome along the channel is slower and the width of the flooded strip of Quaternary sediments reaches the first hundreds of meters.

Two independent irrigation systems are allocated within the KIS: Kakhovska IS and Chaplinska IS (ChIS).

The irrigation system at ChIS was put into operation in 1965 and runs in an earthen channel without antifiltration protection. Water in the ChIS MC comes from the North- Crimean MC. As a result of the lack of anti-filtration protection on the MK ChZS filtration losses from the canal are the main source of ground waters feeding and form the flooding along the canal route.

Water balance calculations on the territory of the KIS show that the total losses from the MC of the KIS and MC of the ChIS amount to 18.0 million m³ or 6.1 % of all ground waters feeding (Ecological passport...,2012; Telyma, 2006).

At the same time up to 27 % of water losses in the system go to the rise of the GWL forming the flooding of the territory. Due to the low filtration properties of the rocks of the ground waters aquifer the main component of water exchange is the flow through the poorly permeable layer of loams and clays into the Pliocene aquifer and the horizontal component of the flow is insignificant and therefore the impact of losses from the specified channels on the adjacent territories is insignificant in the plan.

Filtration losses from MC KIS on a 39-km-long area of paddy soils amount to 0.0046 m³/day from 1 m² of the channel. The rest of the channel has an antifiltration lining in the form of a monolithic concrete lining and a film under precast monolithic concrete which has a filtration resistance of 95 and 72-80 m respectively. At the same time the amount of losses through the antifiltration screen on the MC is 0.004 m³/day • 1 m² and on the channel R-5-1 KIS – 0.0049 m³/day • 1 m² (Telyma, 2006). If we compare the losses from the MC with the losses on the temporary irrigation canals in the earth channel ($q = 0.0046$ and 0.28 m³/day • 1m²) then the losses on the MMC are more than 60 times smaller.

The calculation of the impact of the main trunk channel of the KIS showed that without taking into account on the infiltration feeding on the irrigation fields it will have a spread of 957, 1266 and 1802 m respectively after 5, 10 and 25 years.

Beyond these distances the rise of GWL will be formed only due to infiltration feeding during irrigation which has an average value of 0.000205m/day on the massif. At the same time the maximum increase in the GWL for the specified time periods will be 3.4, 6.8, and 17.0 m respectively without taking into account on the flow into the Pliocene aquifer if the ground flow is considered as unlimited in plane without the leakage to underlying aquifers. In reality the increase in ground waters levels will be much smaller depending on the specific irrigation area since the values of the leakage are of the same order as the values of infiltration feeding on irrigated lands.

North-Crimean MC

Self-flowing North-Crimean MC begins above the left abutment of the Kakhov reservoir dam. The length of the channel within the region is 206 km, the water consumption in the main part of the canal is 294 m³/s. The canal is designed to supply water for irrigation on an area of 296 thousand hectares including irrigation of 95.7 thousand hectares Krasnoznamyanskaya IS (Raybtsev, 2005; Telyma, 2006).

The main part of the canal was built in an earthen channel and was filled in 1958-1961. The engineering and geological conditions of the canal route are quite different but within the Kherson region the canal is laid in sedimentary uncemented rocks of the Quaternary age represented by loess soils plastered in places. In contrast to the Kakhovskiy MC this channel was built in an earthen channel without an antifiltration screen.

According to the relief conditions the route of the canal passes through different sections and in places of intersection with river valleys and in some sections the canal is laid in an artificial embankment or half-embankment-half-ditch. The main and middle sections of the canal located within the 206 km long area are self-flowing.

Before the start of construction the GWL was located at a depth of 5-10 to 20 m. After the canal was put into operation intensive filtering of water from the canal took place which led to the rise of the GWL in the adjacent zone by 2-8 m in a

strip 200 m wide, 1.5-2.0 m at distances up to 1 km and of the order of 0.5-1.0 m at distances of 3.0-4.0 km.

According to field studies, the average amount of losses from the channel in the earth channel was $1.91 \text{ m}^3/\text{day} \cdot 1 \text{ m}$, on the route where the loam screen was laid – $0.33 \text{ m}^3/\text{day} \cdot 1 \text{ m}$ and in the area of the loam tooth – $0.56 \text{ m}^3/\text{day} \cdot 1 \text{ pog. m}$ (Raybtsev, 2005; Telyma, 2006).

Relatively small losses of water due to filtration from the channel are explained by smaller gradients of filtration compared to the gradients in the protected sections of the channel which pass in a semi-embankment-semi-ditch.

The filtration coefficients of the compacted loamy screen determined on the basis of field work for the case of steady filtration are in average 0.009 m/day . At the same time the loss of water for filtration in the section of the channel with a loamy tooth is 3.5 times less than in the section of the channel without a protective screen.

As in the previous cases, the formula (1) was used to estimate the reduction of filtration losses due to the use of a loamy compacted screen on the channel.

Calculations showed that the use of a compacted loamy screen can reduce filtration losses by 6.8 times. According to the data of field work the losses decreased by 5.8 times that is the quite probable values of the filtration parameters were chosen for the calculations.

According to the data of field work the water losses from the channel with a screen are $0.33\text{-}0.53 \text{ m}^3/\text{day} \cdot 1\text{m}$ and according to calculations – $0.43 \text{ m}^3/\text{day} \cdot 1\text{m}$.

On the section of the channel route that runs through plastered soils a doublesided antifiltration tooth with a width of 3.5 m and the filtration coefficient $K_3 = 0.008 \text{ m/day}$ was used. As field studies showed the filtration losses decreased by 3.5 times ($0.63 \text{ m}^3/\text{day} \cdot 1\text{m}$).

The analysis of regime observations showed that on the route of the channel with the screen the maximum increase GWL for 7 months after its filling on the left side was 0.08 m and on the right side was 0.97 m; on the tooth on the left side of the canal – 0.65 m, on the right side – 1.57 m; on (cut) – 0.95 m on the left side,

1.13 m on the right side. The greater growth of GWL on the right side is due to additional infiltration due to irrigation.

If we consider the route of the canal within the region then the greatest losses were observed in the 50 km long section adjacent to the Kakhovskiy Reservoir. They reached an average of $3.4 \text{ m}^3/\text{day}$ per 1 linear meter of the channel (Balyuk et al., 2015; Ecological passport..., 2012).

The amount of losses in the area with a loamy screen 27 km long was $0.59 \text{ m}^3/\text{day} \cdot 1\text{m}$, in areas in a natural channel in soils without a screen – $30\text{-}55 \text{ m}^3/\text{day} \cdot 1\text{m}$ and in the area with plastered rocks – $24\text{-}35 \text{ m}^3/\text{day} \cdot 1\text{m}$.

In connection with large losses the antifiltration screens in the form of a compacted loam tooth with a length of about 83 km were built on the plastered sections of the MC route. At the same time the losses decreased by 20-35 times and amounted to about $1.75 \text{ m}^3/\text{day} \cdot 1\text{m}$.

In modern conditions a concrete-film antifiltration lining was built on the section of the route with a total length of about 100 km which allowed to reduce the losses by 80-115 times and the losses now amount to approximately $0.44 \text{ cubic meters}/\text{day} * 1\text{m}$.

Formula (1) was used to determine the maximum influence of the channel on the adjacent territories taking into account on the filtering resistance of the screen. The determined distances were $L_0 = 898, 1275.5$ and 2024.4 m respectively after 5, 10, and 25 years that is the effect of only purely filtering from the channel will be only 2 km after 25 years.

Analyzing the data obtained for all four MC it can be concluded that the filtration losses from them compared to the losses from temporary distribution channels and sprinklers are much smaller than previously predicted and the impact on the adjacent territories is limited to distances of up to 2-3 km.

The presented results indicate that in modern conditions and for the forecast period there are significant filtration losses from the network of main and distribution channels.

From the point of view of modern requirements for environmentally safe irrigation systems of the new generation they must meet three main requirements: minimize filtration losses, minimize surface runoff and minimize harmful effects on the environment.

With the beginning of operation of the Inguletska and Krasnoznamyanska IS which were built without antifiltration protection the profound changes in hydrogeological and reclamation conditions began to occur in the region, the processes of waterlogging and flooding of adjacent territories and settlements, salinization of irrigated and rainfed lands and the changes in the structure of the productive layer began. Especially vividly the indicated phenomena were manifested in the coastal zone with its weak drainage conditions where GWL are located at depths of 1 to 3 m from the surface of the earth although before the construction of these systems the natural conditions here were in relative equilibrium (Balyuk et al., 2015; Ryabtsev, 2005; Telyma, 2010, 2018).

Irrigation in the zone of the North- Crimean Canal led to a rise in ground waters from 2 to 8 m in Prysyvashsha due to filtration losses from the MC, inter-farm and intra-farm networks in the ground channel, infiltration of irrigation water, unproductive discharges, creation of irrigation areas without appropriate antifiltration measures in the earthen channels, etc.

In this regard the reconstruction of irrigation systems began in 1961 which consisted in the application of antifiltration lining on earthen channels and organization of the collector-discharge network and drainage.

In modern conditions within the region there is a need to reconstruct irrigation systems and land reclamation state on an area of more than 200 000 hectares (Telyma, 2020, 2022).

The analysis of filtration losses from channels of different levels shows that they depend on many factors, namely: channel structures and their lining, channel sizes, periodicity of their operation, stages of filtration, hydrogeological conditions, etc.

The trunk channels within the region operate mainly in the back water filtration regime when filtration losses are the lowest of all filtering stages. Therefore based on theoretical provisions and analyzing the data on filtration losses from the investigated MC during their operation it is possible to recommend the regime of their constant filling throughout the year. At the same time the closer the GWL is to the water horizon in the channel and the wider the channel itself the smaller filtration losses will be (Telyma, 2010, 2015). In addition with a constant water level in the channel more favorable conditions are created for the protective action of the lining.

Since the filtration losses from the channels depend on the stages of filtration the lowest water losses will be in the constantly operating channels which also corresponds to the most optimal operating conditions of the system "lining-ground base".

Distribution channels have smaller dimensions than MC and as a rule work intermittently which leads to significantly greater losses than the main permanent channels since during periodic operation of the channel with each filling a phase of free filtration is observed during which the losses are the largest. Based on this the use of lining screens is recommended for distribution channels. Since lining of irrigation canals works together with soil base then it is also necessary to choose a rational type of lining depending on the soil base under the bottom of the channel.

Lining with periodic filling of the channel with water operates in complex variable temperature conditions. During the annual cycle the changes in humidity and temperature occur for at least seven periods of changes in soil density under the channel bottom which contributes to the formation of cracks or leads to the complete destruction of some types of lining and as a result to decreasing the antifiltration effect of the lining itself.

When operating irrigation systems the special attention must be paid to the temporary irrigation network: temporary sprinklers for irrigation furrows have large filtration losses. Thus unit losses on temporary irrigators in an earthen channel are tens of times greater than those from permanently operating large lined channels and reach 50-70% of the water supply. They work periodically for 1-2 days in the mode

of free filtration which causes significant water losses. One of the measures to reduce losses on temporary sprinklers can be replacing them with permanent or mobile ones.

Thus the main measures that significantly reduce filtration losses from channels of different levels are the use of appropriate lining with the use of modern materials, as well as the selection of optimal designs of protective screens that allow minimizing losses through the system "lining-ground base".

If to analyze the hydrotechnical condition of the main trunk and distribution channels in the territory of the region we can draw general conclusions and recommendations for improving their operation and the entire water management complex in this area in order to reduce the harmful impact on the environment:

1. It is advisable to carry out the construction of antifiltration lining for all considered trunk channels;
2. To carry out the reconstruction of the domestic distribution system of channels with the organization of antifiltration tray lining to reduce water losses from such channels;
3. To organize control over irrigation regimes in order to reduce losses of irrigation water for additional infiltration feeding of groundwater;
4. To carry out the reconstruction of active and non-active rice systems based on modern water- saving technologies;
5. To develop measures to organize the diversion of surface runoff beyond the boundaries of populated areas based on scientifically substantiated decisions;
6. To reconstruct existing drainage systems that to reduce ground water supply from existing trunk and distribution channels and due to leakage from underlying head aquifers.

Conclusions

The conducted research made it possible to obtain the following results:

1. An analysis of the hydrogeological and meliorative conditions in the adjacent to channels areas was carried out based on modern concepts of water exchange between the main aquifers that forming the process of flooding of the lands

and taking into account on the existing water management technologies within the region. The data on the influence of filtration losses from main channels on the processes of formation of flooding on the adjacent territories are presented;

2. The substantiation of the forecasting problems was carried out and the calculation models of the influence of losses from canals as the main factor of rising levels on adjacent lands are considered;

3. An approximate assessment of the combined effect of filtration from canals and irrigation systems on adjacent territories in modern conditions was performed by means of numerical modeling and numerical-analytical calculations. Beside the main hydrophysical and hydrogeological parameters of the irrigation systems were specified and defined;

4. The forecast of the rise of ground waters levels in the territories adjacent to the main canals and the main irrigation systems of the region until 2040 has been carried out. It is shown that for a certain period one can expect the influence of water filtration from canals and the rise of water levels at distances of no more than 3-4 km from them which is due to the low filtration characteristics of the soils and ground waters aquifers in the plane;

5. The recommendations on the effective use of the existing water management complex on the territory of the region are offered.

Taking into account on the circumstances that part of Kherson region is temporarily occupied as a result of unleashed war by Russia many objects of infrastructure are destroyed. The dam of Kakhovka hydro-electric power station and almost all irrigation systems are destroyed. Water from Kakhovka reservoir is spreading in free regime over east part of region flooding the settlements and irrigation lands. At the same time the great filtration losses are observed. Therefore after as the war will be closed the reconstruction of the all economic system in region will start practically from the first and proposed in article recommendations and measures may be used in design, restoration of destroyed and construction of the new hydro-reclamation structures using of the modern technologies and materials.

References

- Averyanov, S. F. (1982). *Filtration from canals and its influence on the groundwater regime*. M. : Colos (in Russian).
- Balyuk, S. A., Romaschenko, M. I., & Truskavetskyi, R. S. (2015). *Land reclamation. Systematics, perspectives, innovations*. Kherson : Osnova (in Ukrainian).
- Bruyako, A. V., Krasova, T. V., & Tyuremnina, V. G. (2003). *Natural and man-made factors of flooding of the territory of the Kherson region. Newsletter on the state of the geological environment of Ukraine (2001-2002)*. K. : Udgri (in Ukrainian).
- Chernyshevskaya, L. Yu. (2006). Creation of water-saving constructions of channels of irrigation systems. *Abstract for obtaining the scientific degree of doctor of technical sciences*. K. : IGIIM (in Ukrainian).
- Ecological passport of the Kherson region*. (2012). Retrieved from: <http://www.Menr.gov.ua/protection/protection/Kherson>, (in Ukrainian).
- Levytska, V. D. (2018). Sustainable development of territories subject to flooding from the Dnieper reservoirs. *Collection of articles of the scientific and practical conference with international participation: Ecological scientific activity in the concept of sustainable development*. Zhytomyr : ZhNAU (in Ukrainian).
- Resolution of the Verkhovna Rada of Ukraine. On recommendations of parliamentary hearings. Actual problems of irrigation, flooding and floods in Ukraine. (2006). *Collection of scientific works: Ecology and resources*. K. : IPNS (in Ukrainian).
- Ryabtsev, M. P. (2005). Submergence and inundation territory settlements : problems that require a complex solution. *Interdepartmental thematic scientific and technical collection : Reclamation and water management*. K. : UAAN (in Russian).

- Telyma, S. V. (2006). Problems of groundwater flooding of the southern regions of Ukraine. Impact of the Kakhov reservoir, main canals and irrigation systems. *Scientific and technical collection: "Problems of water supply drainage and hydraulics"*. K.: KNUBA (in Ukrainian).
- Telyma, S. V. (2007). Modern trends in the evaluation of the regularities in the formation of land flooding processes in the southern regions of Ukraine. *Collection of scientific proceedings: Visnyk of RDTU*. Rovno : RDTU (in Ukrainian).
- Telyma, S. V. (2010). To justify the water and mass exchange on the irrigated lands of the south of Ukraine. *Scientific and technical collection: "Problems of water supply drainage and hydraulics", 14*. K. : KNUBA (in Ukrainian).
- Telyma, S. V. (2015). Prediction of the water-salt regime of groundwater on irrigated lands based on the data of field observations. *Scientific and technical collection: Urban planning and territorial planning, 57*. K. : KNUBA (in Ukrainian).
- Telyma, S. V. (2018). Calculations of systematic vertical drainage for protection against groundwater flooding of irrigated lands and built-up areas. *Collection of scientific works: Environmental safety and nature management*. K. : KNUBA (in Ukrainian).
- Telyma, S. V. (2022). Improvement of calculation methods of drainage systems in flooded territories. *Collective monograph " Ecologically oriented approaches to the restoration of technogenically polluted territories and the creation of sustainable ecosystems"*. Poltava : PVANTKA (in Ukrainian).
- Telyma, S., Voloshkina, O., Anpilova, Ye., Efimenko, V., & Yakovlev, Ye. (2020). Forecasting emergency situation connected with regional flooding by ground water in Southern Ukraine. *Abstracts of International May Conference on Strategic Management – IMCSM20*. Bora : Serbia.

- Trofimchuk, O. M., Yakovlev, E. O., & Hlebchuk, G. S. (2004). Regional flooding of lands in Ukraine as a factor of growing influence on the ecological and economic security of the state. *Collection of scientific works: Ecology and resources* .K. : KNUBA (in Ukrainian).
- Water exchange in hydrogeological structures of Ukraine. Water exchange in violated conditions.*(19 91). K. : Naykova dumka (in Russian).
- Yakovlev, E. O. (2005). *Analytical note "On the need to reduce ecological and social-economic threats of regional flooding lands in Ukraine"*. K. : IPNS (in Ukrainian).

РОЗДІЛ 3

ЕКОНОМІКО-УПРАВЛІНСЬКИЙ, ТУРИСТИЧНИЙ ТА ОСВІТНІ АСПЕКТИ У СИСТЕМІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В УМОВАХ ЕСКАЛАЦІЇ РОСІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКОЇ ВІЙНИ

Теребух А.А., Національний університет «Львівська політехніка», д.е.н., проф.,
завідувач кафедри туризму, Україна, Львів

Паньків Н.Є., Національний університет «Львівська політехніка», к.біол.н.,
доц., доцент кафедри туризму, Україна, Львів

Роїк О.Р., Національний університет «Львівська політехніка», к.е.н., доц.,
доцент кафедри туризму, Україна, Львів

Abstract

The article outlines topical issues of environmental security in the context of the escalation of the Russian-Ukrainian war. The purpose of the study is to determine theoretical approaches to the concept of environmental security and their grouping, as well as to assess risks related to environmental danger in the context of the escalation of the Russian-Ukrainian war. Theoretical and methodological approaches to the concept of environmental safety are substantiated. A study of environmental security as a component of national security was conducted. The facts of the occupying forces' environmental crimes on Ukraine's territory and their long-term consequences have been studied. The main factors influencing the environmental situation during the war have been identified. The possible key consequences for the economy of Ukraine are described. The plan for the recovery of Ukraine in the direction of "Ecological safety" and the conceptual principles of the green post-war recovery of Ukraine is also substantiated.

Вступ

На сучасному етапі все більше уваги приділяється екологічній безпеці у зв'язку з наявністю реальної екологічної небезпеки для довкілля внаслідок дії багатьох загроз природних, техногенних і соціально-політичних факторів. Слід підкреслити, що реалії буття свідчать про те, що характерними ознаками

сьогодення є техногенний розвиток, якому притаманні швидке і виснажливе використання невідновлюваних видів природних ресурсів і надмірна експлуатація відновлюваних із швидкістю, яка перевищує можливості їх відтворення і відбудови. Наслідком цього є значний економічний збиток, що є вартісною оцінкою деградації природних ресурсів і забруднення навколишнього середовища в результаті ескалації російсько-української війни у 2022 році. Тому екологічна безпека стає важливим пріоритетом, оскільки її завданням є визначити спосіб використання ресурсів природних ресурсів, який буде сприяти їх природному відновленню. Отже, актуальним на сучасному етапі є питання поглиблення теоретичних знань щодо визначення поняття екологічна безпека та їх систематизація. Російська збройна агресія проти України, яка розпочалась 24 лютого 2022 р., завдає значної шкоди не лише економіці та культурній спадщині, а й довкіллю нашої країни, а численні випадки цілеспрямованого знищення природних ресурсів та інфраструктурних об'єктів мають риси екоциду проти українського народу.

Про значну зацікавленість до дослідження екологічної безпеки свідчить значна кількість наукових праць, присвячених цій тематиці. Серед зарубіжних вчених, які зробили значний внесок у формування фундаментальних основ екологічної безпеки необхідно виокремити Hoffman A. (1999), Meadows, Meadows & Randers (2004), Третьак, Третьак, Трофименко, Прядка та Трофименко (2021) та інших. У працях вчених досліджено сутність поняття «екологічна безпека», визначено основні загрози екологічній безпеці, принципи її забезпечення та низку інших важливих теоретико-методологічних положень. Водночас поглиблення теоретичних аспектів дослідження поняття «екологічна безпека» та їх групування за певними критеріями потребує більш глибокого дослідження, деталізації та практичного аналізу в умовах ескалації російсько-української війни. Спираючись на те, що повномасштабна війна почалася не так давно, можна зробити висновок, що на даний час публікацій та досліджень з цієї теми є не досить багато, але ця тема починає активно вивчатися як вітчизняними, так і іноземними експертами. Серед них варто виділити

дослідників Київської школи економіки (KSE), що спільно з Офісом президента, Міністерством економіки України реалізують проєкт «Росія заплатить» та громадської організації Центр екологічних ініціатив «Екодія».

На основі викладеного можна сформулювати мету дослідження, що полягає у визначенні теоретичних підходів до поняття екологічна безпека та їх групуванні, а також оцінюванні ризиків щодо екологічної небезпеки в умовах ескалації російсько-української війни.

Екологічна безпека: теоретико-методичні підхід

Поняття «екологічної безпеки» є синтезом двох понять: «безпека» та «екологія». Як правило, поняття «екологія» ототожнюється з поняттям «навколишнє середовище», а безпеку ототожнюють із захищеністю. В реальності поняття «екологічна безпека» є більш ширшим і глибоким, оскільки охоплює не тільки навколишнє середовище, а й середовище існування людства загалом. Що стосується другої складової поняття, то зазначимо, що дефініція безпеки зводиться до стану захищеності життєво необхідних інтересів особи, суспільства, держави від внутрішніх і зовнішніх загроз.

У низці наукових праць екологічна безпека трактується в широкому плані й набуває соціально-економічного змісту. Так, Hoffman A. (1999) розглядає екологічну безпеку як «ступінь адекватності екологічних умов завданням збереження здоров'я населення і забезпечення тривалого стійкого соціально-економічного розвитку». Це широке тлумачення суті екологічної безпеки робить наголос на збереженні здоров'я населення і тривалому стійкому соціально-економічному розвитку. Але в ньому не акцентується увага на відтворенні й збереженні природних факторів (довкілля). Природа здатна перетворюватись на активну і небезпечну силу, руйнуючи людину і суспільство із середини. Вона – специфічний агент екополітики і, отже, також вимагає толерантного ставлення до неї.

В екологічному енциклопедичному словнику Дедю І. (1990) поняття «екологічна безпека» розглядається як будь-яка діяльність людини, що

виключає шкідливий вплив на навколишнє середовище. В даному визначенні повністю не відображені всі основні компоненти поняття «екологічна безпека».

На сучасному етапі поглиблюється розуміння того, що необхідно розглядати поняття «екологічної безпеки» з точки зору тріади «екологія – економіка – соціум».

Комплексним є підхід у Meadows et al. (2004), який розглядає трактування «екологічної безпеки» з точки зору трьох аспектів, а саме, як: забезпечення гарантії запобігання екологічно значимим катастрофам і аваріям унаслідок сукупності дій, станів і процесів, які прямо або опосередковано не призводять до цих подій; ступінь відповідності наявних або прогнозованих екологічних умов завданням збереження здоров'я населення і забезпечення тривалого й стабільного соціально-економічного розвитку; комплекс станів, явищ і дій, які забезпечують екологічний баланс на Землі й у будь-яких її регіонах на рівні, до якого фізично, економічно, технологічно й політично готове людство.

Для визначення поняття «екологічна безпека» слід враховувати те, що не можна ототожнювати поняття «екологічна безпека» з поняттям «охорона навколишнього природного середовища». Це призведе до вузького розуміння, адже «екологічна безпека» включає і соціально-економічний аспект в межах концепції сталого розвитку (Хвесик та ін., 2014).

Тому, на нашу думку, екологічну безпеку слід розглядати через вплив на соціально-економічну складову, тобто на основі «збалансування між цілями розвитку соціально-економічної системи та негативними наслідками від її дії на довкілля з урахуванням впливу дестабілізуючих факторів захищеності від негативного екологічного впливу з урахуванням досягнення економічних цілей соціально-економічної системи».

У літературних джерелах розповсюдженим є підходи до визначення категорії екологічної безпеки: антропоцентричний, ресурсно-антропоцентричний і антропо-біоцентричний (Хлобистов та Жарова, 2010).

З позицій антропоцентричного підходу екологічну безпеку розглядають як стан захищеності виключно людини і суспільства. В ресурсно-екологічному

підході об'єктами забезпечення екологічної безпеки є людина і природні ресурси. Це дає підстави вважати, що метою забезпечення екологічної безпеки є адекватне середовище проживання людини і забезпечення потреби в природних ресурсах. В антропо-біоцентричному підході об'єктами гарантування екологічної безпеки виступають людина і біоресурси. Існує також комплексний підхід до визначення екологічної безпеки, в якому враховуються три попередні підходи. Тут реципієнтами є екосистеми, людина та природні ресурси, що дозволяє акцентувати увагу на забезпеченні збалансованого розвитку складових екологічної безпеки (Хлобистов та Жарова, 2010).

Автори монографії «Екологічна і природно-техногенна безпека України в регіональному вимірі» (Александров, Половян, Коновалов, Логачова та Тарасова, 2010) пропонують наступне визначання цього поняття: «екологічна безпека – це здатність системи «довкілля – соціум – економіка» зберігати рівновагу і збалансованість на основі динамічного відновлення і самовдосконалення, протистояти зовнішнім і внутрішнім загрозам і викликам та забезпечувати прийнятні рівні ризику життєдіяльності населення і стійкості соціально-економічного розвитку, а також відтворення природного і соціально-економічного потенціалу.

Екологічна безпека розуміється як якісна характеристика системи, при якій відсутня загроза нанесення збитку природному середовищу і здоров'ю населення, нормальному розвитку соціально-економічних процесів, як прийнятний соціально-економічний рівень захищеності життєво важливих інтересів особистості, суспільства, держави, світової спільноти від загроз і негативних змін (деградації) навколишнього середовища антропогенного і стихійного характеру» (Александров та ін., 2010).

Крім того, в науковій літературі можна зустріти таку трактовку екологічної безпеки – соціально-економічно прийнятний рівень екологічної небезпеки. Іншими словами, екологічна безпека визначається прийнятним ризиком відхилення стану навколишнього середовища і здоров'я людини від норми. Природно, ризик великих відхилень буде знижуватися в міру

застосування превентивних заходів і все більш ефективних способів і засобів захисту, застосування яких вимагає певних витрат.

Таким чином, екологічна безпека визначається оптимізацією функцій корисності та небезпеки. Необхідно відзначити, що поняття «екологічна безпека» характеризує його сутність і володіє високим ступенем спільності. Запропоноване нижче визначення цього поняття більшою мірою конкретизовано адекватно нагоди оперативного реагування на наближення екологічної катастрофи й фокусує увагу на проблемах захисту від екологічних наслідків і загроз: екологічна безпека – прийнятна на даному етапі соціально-економічного розвитку ступінь захищеності життєво важливих інтересів особистості, суспільства, держави, світового співтовариства та екологічних систем біосфери від наслідків і загроз, що виникають у результаті антропогенного й природного впливу на навколишнє середовище.

Дослідження екологічної безпеки як складової національної безпеки

Протягом останніх років, Європейські країни приділяють максимальну увагу охороні довкілля, забезпеченню сталого розвитку країн і регіонів, захисту інтересів майбутніх поколінь. Одним з головних принципів внутрішньої та зовнішньої політики України є забезпечення екологічно та техногенно безпечних умов життєдіяльності громадян і суспільства, раціонального використання природних ресурсів та захисту навколишнього природного середовища від надмірного забруднення. Екологічна політика спрямована на розв'язання існуючих екологічних проблем та їх попередження, які можуть призвести до негативних екологічних, соціальних та економічних наслідків.

На національному рівні наша держава здійснює провідну роль у системі забезпечення безпеки, а охорону навколишнього середовища визначає одним з ключових положень української політики національної безпеки. Вона створює розгалужену законодавчу базу і виконавчі органи, підтримує силові структури на рівні, необхідному для виконання покладених на них завдань, створення системи попередження негативних наслідків екологічних та техногенних

катастроф, забезпечує розвиток економіки, політично-соціальну стабільність, участь опозиційних партій, громадських організацій, незалежних експертів у діяльності відповідних державних структур, що забезпечують безпеку, та сталість розвитку суспільства України.

Закон України «Про національну безпеку України» (2018) свідчить, що національна безпека України – захищеність державного суверенітету, територіальної цілісності, демократичного конституційного ладу та інших національних інтересів України від реальних та потенційних загроз. Національні інтереси України – життєво важливі інтереси людини, суспільства і держави, реалізація яких забезпечує державний суверенітет України, її прогресивний демократичний розвиток, а також безпечні умови життєдіяльності і добробут її громадян. Крім того, державна політика у сферах національної безпеки і оборони спрямована на захист: людини і громадянина – їхніх життя і гідності, конституційних прав і свобод, безпечних умов життєдіяльності; суспільства – його демократичних цінностей, добробуту та умов для сталого розвитку; держави – її конституційного ладу, суверенітету, територіальної цілісності та недоторканності; території, навколишнього природного середовища – від надзвичайних ситуацій.

Незважаючи на важливість терміну екологічна безпека він не широко висвітлений у правових документах України. Визначення екологічної безпеки міститься у статті 50 Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища», №. 1264-XII, 2021, згідно з якою екологічна безпека – це стан навколишнього середовища, при якому запобігається погіршення екологічної ситуації та виникнення небезпеки для здоров'я людини. Екологічна безпека гарантується громадянам України здійсненням широкого комплексу взаємопов'язаних політичних, економічних, технічних, організаційних, державноправових та інших заходів, а діяльність фізичних та юридичних осіб, що завдає шкоди навколишньому природному середовищу, може бути припинена за рішенням суду.

Відповідно до думки Горбуліна та Качинського (2007), з якою ми погоджуємося, екологічна безпека – це складова національної безпеки, яка забезпечує захищеність життєво важливих інтересів людини, суспільства, довкілля та держави від реальних або потенційних загроз, що створюються антропогенними чи природними чинниками стосовно навколишнього природного середовища та гарантується законодавчими актами держави.

Відповідно до думок багатьох вчених, екологічна безпека – створює механізми для запобігання деградації і оздоровлення навколишнього середовища, піклування про здоров'я народу, формування соціально-правових та економічних умов, що виключали б завдання збитків навколишньому середовищу з боку інших країн світу, їх державних структур, підприємців та окремих громадян, підтримання такого стану природного середовища, що забезпечує нормальні умови життєдіяльності населення і суспільного відтворення; запобігання виникненню екологічної загрози; упередження погіршення екологічної рівноваги і виникнення небезпеки для здоров'я людини, суспільства, нації; виявлення джерел екологічного ризику з боку техногенних, економічних, соціальних, політичних структур і шляхів його запобігання; захист природно ресурсного і людського потенціалу держави (Якібчу, 2014).

Узагальнюючи все вище перераховане, можна визначити мету національної політики екологічної безпеки, а саме це стабілізація і поліпшення стану навколишнього природного середовища України шляхом інтеграції екологічної політики до соціально-економічного розвитку України для гарантування екологічно безпечного природного середовища для життя і здоров'я населення, впровадження екологічно збалансованої системи природокористування та збереження природних екосистем.

Оцінювання ризиків щодо екологічної небезпеки в умовах ескалації російсько-української війни

Екологічна політика є головним критерієм в структурі екологічної безпеки України. Головним стратегічним документом щодо державної екологічної політики в Україні є «Основні засади (стратегія) державної екологічної політики України на період до 2030 року». Цим документом зазначається, що процеси глобалізації та суспільних трансформацій підвищили пріоритетність збереження довкілля, а отже, потребують від України вжиття термінових заходів.

Зокрема, започатковано плани щодо припинення видобутку вугілля у соціально відповідальний спосіб, що супроводжується роботою над підвищенням енергоефективності будівництва. Україна також досягла значного прогресу в частковій лібералізації тарифів на газ і скороченні субсидій на екологічно шкідливе викопне паливо. Також було створено комплексні системи оцінки прогресу в реалізації екологічної політики та озелененні економіки України. Зусилля України щодо переходу на більш зелену економіку підтримали міжнародні партнери, зокрема ОЕСР. Вжито важливих кроків для реформування сфери управління природоохоронною галуззю в Україні, а реформа екологічного законодавства передбачає чітке дотримання екологічного законодавства ЄС відповідно до положень Угоди про асоціацію. Докладено зусиль для залучення галузевих міністерств та бізнесу до переходу на зелену економіку. Важливим механізмом міжгалузевої координації зеленого порядку денного став міжміністерський орган із впровадження Європейського зеленого курсу в Україні. Ця реформаторська робота почала приносити відчутні результати (EU4Environment, 2021). Протягом 2010-19/20 рр. продуктивність використання енергії, CO₂, води зросла на 51, 42 та 28 % відповідно, а підключення до каналізаційних мереж зросло вдвічі і охопило 64 % населення. Частка відновлюваних джерел енергії в загальному обсязі первинного енергопостачання за цей період зросла більш ніж удвічі, як і частка відновлюваних джерел енергії в кінцевому споживанні енергії, яка становила

7,4 % від загального обсягу в 2019 році. Частка природоохоронних територій зростала і досягнула майже 7 % від загальної території країни у 2020 році (EU4Environment, 2022).

Цей економічний та екологічний прогрес перебуває під загрозою від початку широкомасштабної агресії з боку Росії, що гальмує сподівання на створення незалежної, зеленої та соціально-відповідальної України. Втрачено десятки тисяч життів. Пов'язана з нападом гуманітарна криза призвела до того, що велика кількість людей перебуває в окупації та переміщена як в межах України, так і за кордоном. Економічні наслідки також значні. За останніми оцінками Київської школи бізнесу (2022), збитки, завдані інфраструктурі, житловому та нежитловому фонду перевищують 100 мільярдів доларів США, при цьому значних руйнувань завдано будинкам, дорогам та залізниці, а також сільськогосподарським угіддям та іншим виробничим потужностям країни.

Війна не оминула навколишнє середовище, базу природних ресурсів та інфраструктуру. Обстріли лісів, наземних і морських екосистем, промислових об'єктів, транспортної інфраструктури та будинків, а також інфраструктури водопостачання, каналізації та утилізації відходів нанесли широкомасштабну та серйозну шкоду з негайними та довгостроковими наслідками для здоров'я людини та екосистем.

Через постійний шквал ударів по нафтопереробних заводах, хімічних заводах, енергетичних об'єктах, промислових складах чи трубопроводах повітря, вода та ґрунт країни забруднюються токсичними речовинами, що в сукупності становить серйозну небезпеку для здоров'я населення. Щодня українська влада реєструє випадки впливу токсичних газів, які виділяються під час вибухів, пожеж і обвалів будівель, що може спричинити довгострокові загрози здоров'ю, наприклад, ризики виникнення раку та респіраторних захворювань. Багато з цих проблем можна вважати транскордонними, тому вплив буде відчутним не лише в Україні, а й за її межами. Через пошкодження інфраструктури водопостачання приблизно 1,4 мільйона людей в Україні зараз

не мають доступу до безпечної води, а ще 4,6 мільйона людей мають обмежений доступ (РАХ, 2022).

Військові дії також призвели до різкого збільшення кількості відходів. Вони включають в себе пошкоджені або покинуті військові транспортні засоби та обладнання, уламки снарядів, цивільні транспортні засоби, будівельне сміття або незібрані побутові чи медичні відходи. Деякі з цих відходів є токсичними, включаючи уламки снарядів, медичні відходи або будівельне сміття, що містить азбест, ПХБ і важкі метали, і потребують спеціального поводження, транспортування та утилізації. Також страждає природа та екосистеми. За оцінками української влади, через військову діяльність Росії постраждали 900 заповідних природних територій України, а приблизно 1,2 мільйона гектарів, або близько 30 % усіх заповідних територій України, потерпають від наслідків війни (Міністерство охорони навколишнього середовища та природних ресурсів, 2022). Ліси знищуються пожежами внаслідок обстрілів і неналежного їх використання російськими військами, багато з них закидані знищеними або покинутими військовими транспортними засобами.

Серйозні негативні наслідки неминуче виникають внаслідок використання зброї, що може мати гострий і довгостроковий вплив на санітарний стан навколишнього середовища. Прямі ризики для здоров'я населення викликані впливом небезпечних речовин, що містяться в залишках боєприпасів, через які токсичні речовини потрапляють у ґрунт і впливають на якість поверхневих і ґрунтових вод. Ризики походять від пов'язаних із боєприпасами важких металів, енергетичних сполук, таких як тринітротолуол (тротил), гексоген (циклоніт) і палива для ракетних снарядів (Міністерство охорони навколишнього середовища та природних ресурсів, 2022). Велика кількість покинутих або пошкоджених військових транспортних засобів містить токсичні матеріали, які становлять небезпеку для цивільного населення та навколишнього середовища та вимагають обережного поводження під час збору та утилізації.

Злочини проти довкілля в умовах війни в Україні

На даний час третина об'єктів природно-заповідного фонду України пошкоджено через повномасштабну, загарбницьку війну, яку 24 лютого 2022 року російська федерація засобами підрозділів збройних сил, важкого наземного озброєння, у тому числі далекобійної артилерії, ракет, морських кораблів та військової авіації розпочала проти України на суші, морі та в повітряному просторі. Вторгнення вже призвело до значних жертв серед мирних мешканців та пошкодження природної спадщини України.

Відповідно до I Протоколу до Женевських конвенцій від 12 серпня 1949 року, який стосується захисту жертв міжнародних збройних конфліктів, прийнятого у 1977 році, від держав, які ведуть війну, вимагається захищати природне середовище від «масштабних, довготривалих і серйозних уражень», та забороняються методи чи засоби ведення війни, «які мають на меті або можуть призвести до заподіяння такої шкоди». 24-й Принцип Декларації Ріо про навколишнє середовище та розвиток проголошує, що війна за своєю суттю є руйнівною для сталого розвитку. Тому, держави поважають міжнародне право, що забезпечує захист довкілля під час збройного конфлікту, і, якщо необхідно, а також співпрацюють заради його подальшого розвитку (Збережемо природно-заповідний фонд України. Верховна Рада України, 2022).

У результаті вторгнення російських військ наша природна спадщина зазнає значної шкоди, зокрема, пошкодження екосистем та плундрування Рамсарських угідь. Сьогодні в Україні 14 Рамсарських угідь площею 397,7 тис. га використовуються російськими загарбниками під час бойових дій проти українського народу. Це стосується узбережжя Азовського та Чорного морів, а також територій у нижній течії річок Дунаю та Дніпра. Російські окупаційні війська не мали і не виявляють жодної поваги до природи. Зокрема, для військових навчань постійно використовувалися окуповані з 2014 року Рамсарські угіддя «Крива затока та Крива коса» на Донбасі та «Водно-береговий комплекс мису Опук» у Криму. Наразі внаслідок російської агресії постраждали понад 20 природно-біосферних заповідників і національних

природних парків, що становить близько третини площі природно-заповідного фонду України.

Російська збройна агресія на сході України впродовж 8 років призвела до серйозних пошкоджень об'єктів природно-заповідного фонду, зокрема, Національних парків «Святі гори» та «Меотида», відділення Українського степового заповідника Кальміуське, «Крейдяна флора», регіональних ландшафтних парків «Донецький кряж» і «Слов'янський курорт». На території низки об'єктів природно-заповідного фонду зведено фортифікаційні споруди, наприклад, в національному парку «Дворічанський» що знаходиться на кордоні з Харківською областю. Схід України є одним з небагатьох місць, де збереглися унікальні типчаково-ковиліві цілинні степи, байрачні та заплавні ліси. Цінним природно-ландшафтним спадком є крейдяні скелі, які потрапили в Топ-100 всеукраїнського конкурсу «Сім природних чудес України». Важливо, що на територіях Донецької та Луганської областей, де ведуться бойові дії, знаходиться велика кількість об'єктів природно-заповідного фонду (Паньків, 2022).

Природно-заповідний фонд вздовж Азово-Чорноморського узбережжя, а також вздовж східного і північного кордонів України зазнає особливих уражень. Крім того, частина національних парків опинилася в зоні гуманітарної кризи. Деякі природоохоронні території позбавлені можливості отримати фінансування. До прикладу, в об'єктах природно-заповідного фонду, де є велике поголів'я диких тварин, зокрема біосферний заповідник «Асканія-Нова» (тут зібрані і живуть на волі різноманітні види тварин, деякі в дуже обмеженій кількості у світовому масштабі, унікальні для всього світу), національні природні парки «Азово-Сиваський», «Джарилгацький», природний заповідник «Єланецький степ». Нищівних руйнувань внаслідок варварських обстрілів рашистів зазнав регіональний ландшафтний парк у Дергачівському районі Харківської області «Фельдман-Екопарк».

На даний час багато регіонів України, зокрема Харківська, Чернігівська, Сумська, Житомирська, Луганська, Донецька та Херсонська області, охоплені

воєнними діями унаслідок російської агресії. Реальний рівень шкоди об'єктам природно-заповідного фонду через війну оцінити не можливо. Адже в багатьох місцях тривають активні бойові дії, створюються численні обмеження для природоохоронної діяльності на тимчасово окупованих територіях.

Російські війська руйнують природні території, які забезпечували середовище існування рідкісних видів та оселищ, які знаходяться під загрозою зникнення. За даними Української природоохоронної групи, 44 % найцінніших територій природно-заповідного фонду опинилися в зоні бойових дій, під тимчасовим контролем російських загарбників або є недоступними для України. На цих територіях ростуть тисячі видів рослин, які занесені до Червоної книги України і охороняються законом. Бойові дії порушують спокій тварин. Вони або гинуть, або намагаються втекти з гарячих точок. За підрахунками науковців, під загрозою знищення перебувають майже 200 територій Смарагдової мережі. Це 2,9 мільйона гектарів, які потребують охорони на загальноєвропейському рівні та важливі для рідкісних у Європі видів і природних оселищ. Наразі деякі з таких ареалів рідкісних і ендемічних видів і оселищ опинилися в зоні активних бойових дій. Наприклад, це цілинні нерозорані степи, крейдянні схили на Донеччині, приморські екосистеми в південних областях, болота на півночі.

Проблеми із фінансуванням мають і зоопарки, зокрема, Миколаївський, Київський та Харківський зоопарки на разі не мають змоги купувати корми тваринам. Проведення тендерних процедур та доставка за договорами кормів для тварин зараз неможлива або вкрай обмежена. Проте, злагоджена робота волонтерів та громадських організацій допомагає закладам оперативно зібрати кошти для найбільш кричущих потреб та здійснити першочергову доставку кормів.

До прикладу, Одеський зоопарк, закритий через війну, зібрав упродовж другої декади березня близько пів мільйона гривень від благодійників та отримав від європейських колег гуманітарну допомогу, скоординовану зоопарком міста-побратима Лодзь. Окрім того, концентровані корми для

тварин, ветеринарні препарати та біодобавки надійшли від інших зоопарків Польщі, Чехії, Німеччини, Естонії, Нідерландів, а також із Рівного, Львова та Луцька. Київський зоопарк отримав близько 12 тонн гуманітарної допомоги від міжнародного благодійного фонду FOUR PAWS International. А берлінськими зоопарками – Зоологічним садом Берліна (Zoologischer Garten Berlin) та Берлінським зоопарком (Tierpark Berlin) – зібрано понад 320 тис євро пожертв для зоопарків у Києві, Харкові, Одесі, Луцьку, Черкасах та інших містах України. Миколаївський зоопарк отримав від Праги фінансову допомогу у розмірі 10 тис євро, а також концентровані корми для різних видів тварин, біодобавки, ветпрепарати та інше від зоопарків Європи. Команда громадської організації ГО UAnimals займається допомогою для тварин в усіх областях, питаннями організації евакуації тварин та іншими гуманітарними завданнями. За кордону волонтери отримують гуманітарну допомогу для тварин, які наразі потребують допомоги в умовах війни. Та найгірша ситуація у зоопарку «ХІІ місяців», що розташований у Демидові Вишгородського району Київської області. Зоопарк на межі гуманітарної катастрофи, звірі там голодні та замерзають від холоду. Їм критично потрібна їжа та дизельні генератори для обігріву. Без гуманітарної допомоги та зеленого коридору усі 300 тварин приречені на загибель.

Нищівних руйнувань внаслідок варварських обстрілів рашистів зазнав регіональний ландшафтний парк у Дергачівському районі Харківської області «Фельдман-Екопарк». Основною складовою екопарку є зоопарк, в якому налічувалось близько 2 000 тварин. Як повідомляє прес-служба екопарку, на превеликий жаль в екстремальних умовах тварини гинуть не тільки від отриманих ушкоджень, а й від розриву серця. Тварини, які постійно перебувають на лінії вогню, відчувають постійний стрес, що надає великий негативний вплив на їх психічний стан і поведінку. Однак, працівники, ризикуючи власним життям, продовжують боротися за кожне життя тварини. Між обстрілами намагаються годувати та вивезти тих, кого можливо (Збережемо природно-заповідний фонд України, 2022).

Від початку повномасштабного вторгнення рф на територію України у Чорному морі, загинули кілька тисяч дельфінів, як наслідки війни рашистських варварів, які використовують потужні гідролокатори й дезорієнтують тварин. Окрім того, дельфіни підриваються на мінах, що дрейфують узбережжям, зокрема у парку «Тузлівські лимани», що на Одещині. Внаслідок активних бойових дій на території України зменшується популяція птахів, виникають пожежі екосистем та викидаються на берег дельфіни. Крім того, солдати рф захоплюють національні парки та встановлюють своїх «начальників».

Території, які завжди були під особливою охороною держави, зазнають варварського використання або прямого знищення. Наприклад, на території Чорнобильського радіаційного екологічного біосферного заповідника, який віднесено до території Смарагдової мережі (Chornobylskyi Biosphere Reserve, UA0000046), було виявлено 31 осередок пожеж на площі 10 111 га. Внаслідок пожеж на цій території пошкоджено цінні оселища на відтворення яких потрібно час.

Ще в перші дні вторгнення в Україну російські війська захопили північ Київської області. Українська влада повністю втратила контроль над територією Чорнобильської зони відчуження. Це створило значні ризики, пов'язані з радіаційним забрудненням. Один з яких виник наприкінці березня. Згідно з даними European Forest Fire Information System, тоді відбувалися масштабні пожежі у західній частині Чорнобильської зони. Було зафіксовано 31 пожежу, що спричинило підвищений рівень радіоактивного забруднення повітря. Загальна площа території, що горіла була понад 7 600 га. Переважно це ліси або перелоги. Ще понад 6 400 гектарів лісів горіло біля населених пунктів Народичі та Радча, дещо західніше від Чорнобильської зони. Ці дані підтверджуються і Міністерством захисту довкілля України.

Ці пожежі спричинили забруднення атмосферного повітря, крім речовин у вигляді твердих суспендованих частинок, азоту діоксиду, вуглецю оксиду, метану, діоксиду вуглецю, оксиду діазоту, що потрапили у повітря, є загроза підвищення рівня радіації, яка й так піднялась внаслідок руйнування рослинно-

ґрунтового шару важкою військовою технікою, яка рухалась через уражені лісові масиви, піднявши разом з пилом радіоактивні частки.

Тут ми підійшли ще до одного аспекту екологічного геноциду – міжнародного тероризму на ядерних об'єктах: захоплення, пошкодження, вплив на функціонування ядерних об'єктів, що може призвести до виникнення аварій глобального масштабу. Зокрема, агресор тривалий час контролював майданчик Чорнобильської АЕС, де розташовані виведені з експлуатації ядерні реактори та об'єкти з радіоактивними відходами.

26 лютого 2022 року внаслідок обстрілу в Дергачівському районі Харківської області було пошкоджено трансформатор, що забезпечує електроенергією пункт зберігання радіоактивних відходів Харківського міжобласного відділення Асоціації «Радон». 27 лютого в результаті ракетного обстрілу стався потужний вибух близько місця зберігання радіоактивних відходів Центрального виробничого об'єднання «Радон» (Київ). За спостереженнями викиду радіонуклідів у навколишнє середовище не відбулося.

Вночі 4 березня російські окупанти обстріляли перший енергоблок Запорізької АЕС (ЗАЕС) – найбільшої у Європі АЕС. В результаті на станції спалахнула пожежа, яку вдалося загасити – було зруйновано учбово-тренувальний центр, пошкоджено лінії електропередачі. На майданчику енергоблоку № 1 окупанти здійснюють підрив боєприпасів. За оцінками фахівців, техногенна аварія на Запорізькій станції може в 10 разів бути більшою ніж Чорнобильська катастрофа, ураження зазнає в тому числі територія країни загарбника аж до Уралу та країни Чорноморського узбережжя (Екоцид: наслідки і ціна російської агресії, 2022).

За допомогою СППР JRODOS в ЦПНРА УкрГМЦ ДСНС України обраховано проєкт можливого поширення протягом 72 годин радіоактивного забруднення у разі руйнування одного із блоків Запорізької АЕС. Розповсюдження радіоактивно забрудненого атмосферного повітря в разі руйнування одного із ядерних блоків АЕС за результатами моделювання імовірно відбуватиметься за складними траєкторіям і охопить у разі радіаційної

аварії на ЗАЕС за добу (з викидом з 07:56 (UTC) 03/04/2022) близько 0,8 млн. кв. км території України та Росії (Інформаційна довідка). Радіаційна ситуація в Україні станом на 08:00(UTC) 03/04/2022) (рис. 1).

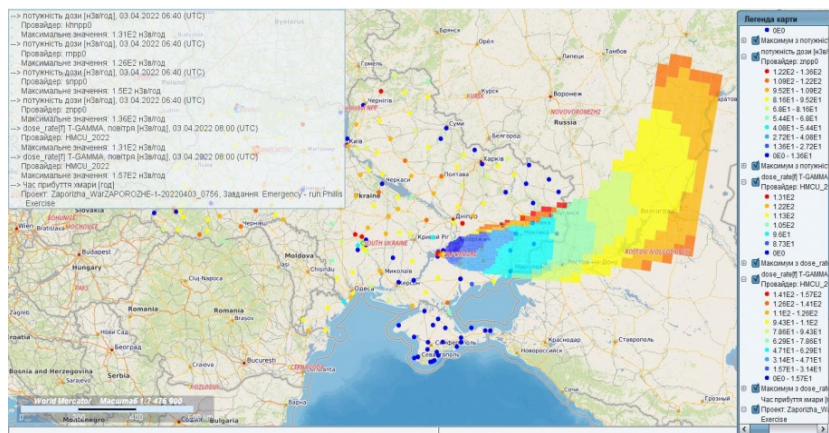


Рис. 1. Динаміка переміщення викидів ЗАЕС в атмосфері

Джерело: (Екоцид: наслідки і ціна російської агресії, 2022).

6, 26 та 28 березня російські війська обстріляли з реактивної артилерії територію Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут», де розташована ядерна пускова установка «Джерело нейтронів» (ЯПУ «Джерело нейтронів»). Реактор завантажено 37 ядерними паливними збірками, наявні пошкодження, нанесені установці (підстанція РУ-0,4 кВ повністю зруйнована), системі охолодження, будівлям та теплотрасі, наявні значні пошкодження теплоізоляційної обшивки будівлі ЯПУ, часткове осипання матеріалів облицювання в експериментальній залі установки.

Зазначені вище екологічні ризики є наслідком військової інтервенції. У сукупності ці ризики завдають значного впливу на природні ландшафти в межах яких, за даними Української природоохоронної групи (UNCG), 44 % найцінніших природних територій України охоплені війною.

Від середини квітня лісові пожежі тривали також і на території Херсонської області, зокрема, біля сіл Геройське та Іванівка, які було проблемно загасити через тимчасову окупацію області. Станом на 5 травня Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України звітувало, що пожежі охопили 130 га лісу на Херсонщині: 70 га – у Геройському та 60 га – в

Іванівському лісництвах. Через дії окупантів, суху та вітряну погоду вчасна локалізація пожеж ускладнювалась, адже росіяни не пропускають лісову охорону до осередків загорянь. Таким чином, вогонь знищив цілі екосистеми українських лісів, які потім важко буде відновити (Pankiv, 2022).

В районі Херсону окупанти підпалили також Дніпровські плавні, які також входять до територій Смарагдової мережі – Нижній Дніпро (Lower Dnipro, UA0000192). Всі ці дії призводять до порушення спокою диких тварин, зменшення біорізноманіття, пошкодження або знищення цінних біотопів, оселищ, які занесено до Резолюції 4 та 6 Бернської конвенції – конвенції про охорону дикої флори і природних середовищ існування в Європі.

Через обстріли російських окупантів в Донецькій області також масштабно зайнялися ліси. Зокрема, від них потерпали ліси державного підприємства «Лиманське лісове господарство». Станом на 05.05.2022 року площа лісових пожеж досягла 935 гектарів. Спостерігалися масштабні пожежі в Лиманському та Ямпільському лісництвах, гасіння яких унеможливлювалось бойовими діями і постійними обстрілами лісу та лісгосподарської інфраструктури. Моніторинг стану лісів ведеться за допомогою продукту FIRMS від NASA. Природні території України, охоплені війною, позначено на рис. 2.

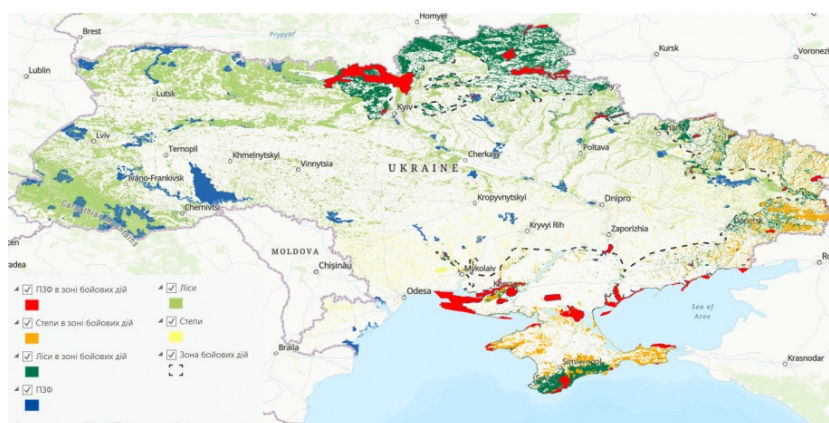


Рис. 2. Природні території України, охоплені війною

Джерело: (Екоцид: наслідки і ціна російської агресії, 2022).

Значних збитків завдається атмосферному повітрю, ґрунтам, водам внаслідок ракетних ударів по об'єктах інфраструктури: нафтобази (Луцьк, Дубно, Львів, Чернігів – 6 резервуарів по 5 тис. м³, Охтирка, Житомир – 2 резервуари по 10 тис. м³, с. Черняхів Житомирської області – 3 резервуари по 2 тис. м³, с. Крячки Васильківський район – 10 резервуарів по 2 тис. м³ тощо), очисні споруди (Василівка, Запоріжжя та ін.), резервуари зберігання хімічних сполук (резервуари з аміаком – Кременецький район Тернопільська область; витік аміаку – ПАТ «Суміхімпром») тощо.

Зокрема, при ураження резервуарів нафтобаз у навколишнє середовище потрапляють продукти згорання світлих нафтопродуктів (бензин, дизпаливо), проходить забруднення та вигорання ґрунтів на прилеглих територіях, можливе потрапляння нафтопродуктів у ґрунтові води. Так, при згоранні 1 тис. м³ бензину та дизпалива в атмосферне повітря викидається: сажі - 5,9 т; оксиди азоту (у перерахунку на діоксид азоту [NO + NO₂]) – 41,3 т; азоту (1) оксид (N₂O) – 0,1 т; аміаку – 0,003 т; сірки діоксид – 4,4 т; оксид вуглецю – 265,0 т; вуглецю діоксид – 5022,7 т; НМЛОС (вуглеводні граничні) – 28,0 т; метан – 1,1 т; бенз(а)пірен – 0,026 т. Це призвело до екологічних збитків (крім збитків для ґрунту, води та втрати інших матеріальних ресурсів), які орієнтовно становлять 330 тис. грн. (Екоцид: наслідки і ціна російської агресії, 2022).

Разом із забрудненням атмосферного повітря під час війни відбувається забруднення ґрунтового покриву. Зокрема, внаслідок переміщення важкої військової техніки, вибухів та пожеж в природних, селітебних та агроєкосистемах виникають різні види деградації ґрунтового покриву: перемішування ґрунтових горизонтів, порушення верхнього родючого шару, переущільнення ґрунтових горизонтів, хімічна деградація, вигорання (пірогенна деградація) ґрунтів, фортифікаційна деградація тощо.

Як наслідок підризу резервуарів з паливом відбувається забруднення нафтопродуктами ґрунтів. Таке ж забруднення відбувається в місцях технічного обслуговування військової техніки. При вибухах ґрунти зазнають забруднення вибуховими речовинами та засмічення залишками засобів ураження,

різноманітної військової техніки та уламковим матеріалом який роками будемо збирати на українській землі.

Окупанти свідомо здійснюють ураження інфраструктурних об'єктів, зокрема, каналізаційно-насосних станцій та очисних споруд при чому відбувається забруднення поверхневих вод стоками. Потрапляння у води річок неочищених господарсько-побутових та виробничих стоків, які містять велику кількість органічних речовин, яйця гельмінтів, патогени, фосфати, хлориди, сульфати, поверхнево-активні речовини у подальшому активізує процеси цвітіння води в річках басейну Дніпра та акваторії Чорного моря.

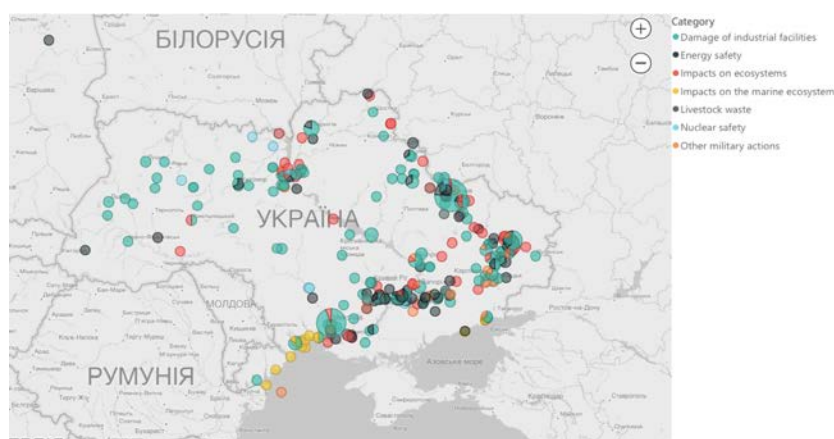
З часу окупації півдня України загарбники контролюють гідротехнічні споруди Північно-Кримського каналу, яким здійснювалось водопостачання до Криму. З 27 лютого, зруйнувавши перегороджувальні споруди, ворог проводить неконтрольований водозабір вод з Каховського водосховища. За даними Державної екологічної інспекції пропускна спроможність Північно-Кримського каналу становить 4,32 млн. м³/добу. За день Україна зазнає збитків на 32,63 млн. грн.

Ще одну загрозу, яку принесла війна – це мінування території населених пунктів, сільськогосподарських угідь, транспортної інфраструктури, тощо. За даними Асоціації саперів України понад 80,5 тис. км² території України заміновано, що спричинило до часткового або повного вилучення земель (грунтів) з господарського використання до повного розмінування (Екоцид: наслідки і ціна російської агресії, 2022).

Актуальною залишається проблеми затоплення шахт і забруднення питної води в межах Донецької і Луганської областей. Основний негативний вплив на довкілля має рівень підземних шахтних вод, який постійно піднімається на ліквідованих і діючих підприємствах, створюючи загрозу затоплення інфраструктурних об'єктів та цілих населених пунктів на сході України, а також забруднення мереж водних джерел. Обтяжуючим фактором у цій ситуації слугують умови маловоддя, що спостерігається по всій території країни. Особливе занепокоєння викликає відсутність конкретної інформації

щодо стану вугільних шахт, розташованих на тимчасово окупованих територіях України. Унаслідок російської збройної агресії багато шахт опинились за межами контролю української влади. Порушення гідрологічного балансу та припинення відкачування підземних вод водовідливними комплексами цих шахт створює високий ризик техногенної та екологічної катастрофи. Конкретними прикладами можливих таких ризиків є: виділення вибухонебезпечного газу-метану та вихід шахтних вод на поверхню, забруднення верхніх водоносних горизонтів, погіршення якісного складу води у водозабірних спорудах (свердловинах, колодязях тощо), просідання поверхні з деформацією розташованих на ній будівель, інфраструктурних об'єктів тощо. На сьогодні під прямим або опосередкованим контролем РФ відбувається масовий незаконний видобуток вугілля в Луганській та Донецькій областях, у тому числі відкритим способом, про що свідчать космічні знімки. Ведеться хаотичне розграбування природних ресурсів, руйнуються природні екосистеми, забруднюється навколишнє середовище. Це екоцид у його найжорстокішій формі (Усі заповідні наші довілля збитки ворог має обов'язково відшкодувати, 2022).

На даний час зафіксовано понад 500 екоцидів та виявлено близько 2 тисячі фактів знищення українського довкілля внаслідок військової агресії російської федерації. Найбільше число цих злочинів сталося на Київщині, Слобожанщині, Донеччині та півдні України (рис. 4). Однак, від дій російських військових страждають практично всі регіони України, а повну картину шкоди екології можна буде отримати лише після війни.



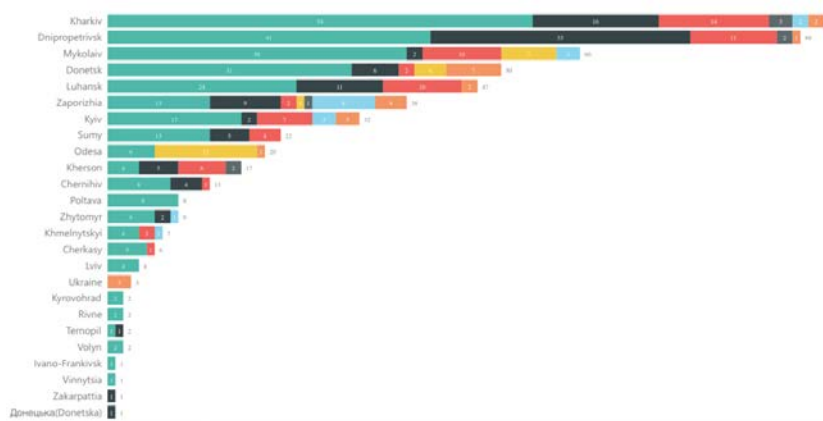


Рис. 4. Екологічні злочини проти довкілля спричинені російською війною

Джерело: (Спустошені землі, 2022).

У статті 441 Кримінального кодексу України визначено дане поняття «екоцид» – масове знищення рослинного або тваринного світу, отруєння атмосфери або водних ресурсів, а також вчинення інших дій, що можуть спричинити екологічну катастрофу, а у статті 241 КК України визначено відповідальність за забруднення атмосферного повітря або інша зміна природних властивостей атмосферного повітря шкідливими для життя, здоров'я людей або для довкілля речовинами, відходами або іншими матеріалами промислового чи іншого виробництва внаслідок порушення спеціальних правил, якщо це створило небезпеку для життя, здоров'я людей чи для довкілля.

Ці ж діяння агресора підпадають під юрисдикцію Міжнародного кримінального суду, діяльність якого ґрунтується на Римському статуті, у якому визначено такі злочини: геноцид, проти людяності, військові злочини, агресії (Екоцид: наслідки і ціна російської агресії, 2022).

Окрім того, військові дії російської федерації впливають на кліматичні зміни в Україні та в світі, які варто розглядати у трьох аспектах. Передусім це ядерно-енергетичний вимір, по-друге – знищення промислових об'єктів та інфраструктури загалом. А третій аспект полягає у зникненні частини біофонду України.

Європейський Союз ще у 2019 році проголосив вкрай амбітну мету:

континент стане кліматично нейтральним до 2050 року. Останнє означає істотне зменшення парникових викидів в атмосферу, поступову відмову від вугілля та природного газу, а також більшу увагу до відновлювальних джерел енергії. Іншими словами, відбудеться зелений перехід, відповідальним за який є Франс Тіммерманс.

Україна, яка прагне стати членом ЄС, теж взяла на себе певні зобов'язання, затвердивши восени минулого року «Стратегію екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату до 2030 року». Окремим пунктом у цьому документі було відзначено стабілізацію екологічної рівноваги на тимчасово окупованих територіях. Щоправда, відновлювальні джерела енергії, наприклад вітряки та сонячні батареї на Півдні України, зазнали збитків через російську збройну агресію. Остаточну суму важко назвати, але на відновлення підуть роки. Війна лише загострила наявні виклики із зеленим переходом України з подальшим зменшенням використання вугілля та відмови Європи від російських енергоносіїв.

У коментарі АрміяInform магістр політики з навколишнього середовища в Кембриджі та менеджерка зі сталого розвитку компанії «Кернел» Марта Трофімова зазначила, що міжнародним організаціям необхідно діяти тут і тепер у питанні кліматичних злочинів кремля проти України. В іншому разі наслідки впливу російської агресії в Україні будуть більш масштабними: «Проводячи аналогії між впливами війни та змін клімату на національну безпеку, важливо розуміти основну відмінність: чинник контролю ситуацією. Якщо бути відвертим, світ не був готовий до таких наслідків російського вторгнення в Україну, як ризик глобального голоду. Події розвиваються швидко, потребуючи швидких рішень, але разом з тим існує перелік реальних дій, які можна зробити для того, щоб ці ризики мінімізувати. У випадку зі змінами клімату горизонт планування набагато довший, але йдеться про невідворотні зміни у природних системах, на які людство матиме обмежений вплив».

На міжнародній конференції Організації Об'єднаних Націй з питань кліматичних змін, яка тривала 6-16 червня 2022 року в Бонні (Німеччина),

спецпредставник США з клімату Джон Керрі заявив, що війна в Україні не може бути виправданням для подальшої залежності світу від вугілля. У листопаді цього року в Шарм-ель-Шейху (Єгипет) відбудеться вже 27-ма конференція ООН з питань клімату та кліматичної безпеки COP27. Там стане зрозуміло, наскільки боротьба за спільні цілі в цьому контексті є можливою на світовому рівні (Екоцид України та загроза голоду у світі, 2022).

Зібрана інформація є тільки першим етапом для оцінки злочинів проти довкілля, скоєних росією. У розпал бойових дій, важко побачити реальний масштаб та рівень забруднення навколишнього середовища. Навіть за таких умов вже маємо більше двох сотень зафіксованих злочинів тільки за три місяці. Реальну оцінку вдасться зробити після завершення активних бойових дій, а наслідки українці та українки будуть відчувати роками. Тому, зараз важливо фіксувати злочини проти довкілля, але не відкрито, аби не коригувати вогонь противника, щоб далі мати змогу судити росію і за них. Для цього створено низку безпечних інструменти, що дозволяють збирати свідчення і документувати злочини проти довкілля: Телеграм-бот “ЕкоШкода”; SaveEcoBot у Вайбер; Сторінка Українського еколого-інформаційного штабу з аналітичної обробки та ліквідації наслідків бойових дій; Анкета для збору інформації про заподіяння збитків довкіллю внаслідок вторгнення російської федерації на територію України (Pankiv, 2022).

До прикладу, Система SaveEcoBot, розроблена громадською організацією SaveDnipro, – єдиний в Україні екологічний чатбот та мапа, які поєднують дані про забруднення, забруднювачів та інструменти захисту довкілля, – автоматично збирає дані про стан атмосферного повітря з майже всіх наявних онлайн-систем в Україні й надає зручний доступ до даних на мапі, а також через повноцінний API, яким також користуються РНБО та Міндовкілля. Таким чином ми маємо вже багато підтверджень воєнних злочинів проти довкілля і населення України – забруднення повітря внаслідок авіаударів та пожеж, зафіксоване приладами громадського моніторингу якості повітря (Як у Дніпрі фіксують воєнні злочини проти довкілля, 2022).

24 червня 2022 року Україна приєдналась до природоохоронної програми LIFE, в межах якої зможе отримати ресурси та фінансування для усунення довгострокових наслідків російської агресії, а також відновлення довкілля в цілому. LIFE є єдиною програмою Європейського Союзу, яка присвячена виключно питанням збереження природи та кліматичних дій. За 30 років у її рамках успішно реалізовано понад 5 600 проєктів у Євросоюзі та за його межами. Бюджет програми на 2021-2027 роки становить 5,43 млрд євро, що відповідає 0,48 % загального бюджету ЄС. Для України реалізація проєктів у рамках програми LIFE стане дієвим інструментом у сфері захисту довкілля та відновлення в післявоєнний час. Зокрема, наразі вже розглядається близько 15 ідей, які пов'язанні з відновленням річок, розвитком заповідного фонду, а також з очищенням територій, засмічених російськими загарбниками (Україна приєдналась до європейської природоохоронної програми LIFE, 2022).

Наслідки збройного вторгнення матимуть тривалий негативний вплив на здатність національної економіки запобігати та адаптуватися до зміни клімату.

Стратегічна ціль повоєнного відновлення – чисте та безпечне довкілля згідно проекту Плану відновлення України Матеріали робочої групи «Екологічна безпека»:

- інтеграція кліматичних цілей в усі сектори економіки та суспільного життя;
- мінімізація ризиків для екологічної безпеки (хімічна та радіаційна);
- зменшення та запобігання промислового забруднення та запровадження принципу «забруднювач платить»;
- ефективне управління відходами;
- збалансоване використання природних ресурсів та забезпечення їх належної якості;
- збереження біорізноманіття, відновлення та розвиток природоохоронних територій;

– досягнення європейських стандартів державного управління у галузі охорони довкілля.

Для досягнення зазначених цілей необхідно впровадити ключові реформи:

- інтегрована кліматична політика;
- екологічна безпека (хімічна та радіаційна);
- реформа регулювання промислового забруднення;
- ефективне управління відходами;
- збалансоване використання природних ресурсів;
- управління природоохоронними територіями для збереження ландшафтного та біологічного різноманіття;
- ефективне державне управління в галузі охорони довкілля;
- екологічний контроль та юридична відповідальність;
- комплексний моніторинг довкілля.

План відновлення України за напрямом «Екологічна безпека»

На Україну очікує наймасштабніша після Другої світової війни в Європі відбудова. Основа майбутньої стратегії повоєнної відбудови – зелене або стале відновлення, тобто таке, що не шкодить людям, природі і клімату.

Відновлення України не стане поверненням до довоєнного стану. Це буде повноцінна розбудова на засадах сталого розвитку та з урахуванням європейського зеленого курсу. Перед Україною стоять масштабні та важливі задачі: відновлення критичної інфраструктури, забезпечення енергетичної безпеки країни, прискорена імплементація законодавства ЄС щодо боротьби зі зміною клімату та адаптації до неї тощо.

Крім того, розбудова зеленої економіки в Україні є основою Угоди про Асоціацію з ЄС. Зелена економіка – це ефективне використання ресурсів, які зменшують рівень забруднення навколишнього середовища, дозволяють більш ефективно використовувати енергію та ресурси, зберігають природу, а в результаті – сприяють зростанню зайнятості та доходів.

Експерти впевнені, що модернізація української економіки та інфраструктури в спосіб, що підтримує та розвиває природні екосистеми, а не вичерпує їх, створить чимало переваг для української економіки та суспільства. Зокрема, посилить безпеку країни при зменшенні залежності від імпорту викопного палива, прискорить економічний розвиток та допоможе створити робочі місця, зменшить забруднення, що буде корисним для здоров'я населення.

Про це йдеться у звіті «Україна: стале економічне відновлення для людей і природи», який підготували WWF Центральної та Східної Європи, WWF-Україна спільно з Бостонською консалтинговою групою (Boston Consulting Group (BCG)), який було презентовано під час онлайн конференції, організованої за медійної підтримки Медіацентру Україна – Укрінформ.

За даними звіту, через війну понад 6 мільйонів українців не мають або мають обмежений доступ до чистої води, мільйони українців змушені були покинути свої домівки. Люди мають обмежений доступ до лісів, бо ті заміновані. Шкода, яку війна завдала природі, оцінюються в мільярди доларів. Житловому та нежитловому комплексу інфраструктурі надано збитків на суму 110 мільярдів доларів станом на серпень 2022 року. Тому екологічна безпека як основа економічного розвитку, добробуту і виживання має стати частиною безпекової парадигми України.

План відновлення України має бути орієнтований на майбутнє. Це означає, що всі інвестиції мають сприяти трансформаціям і нести в собі чіткі вимоги щодо сталого розвитку, збереження і бережливого поводження з природними ресурсами (Відбудова України для людей і природи, 2022).

Розділ «Екологічна безпека» Плану відбудови України у воєнний і повоєнний період включатиме такі пріоритетні напрями: реформування державного управління у сфері охорони навколишнього природного середовища; кліматична політика: запобігання та адаптація до зміни клімату; екологічна безпека та ефективне поводження з відходами; збалансоване використання природних ресурсів в умовах підвищеного попиту та обмежених

можливостей; збереження природних екосистем і біологічного різноманіття, відновлення та розвиток природоохоронних територій та об'єктів. Також робота над планом базується на принципі відкритого діалогу влади та суспільства. Залучення всіх зацікавлених сторін дає змогу комплексно розглядати питання, враховувати різні інтереси та позиції для формування спільного бачення «зеленого» відновлення України.

Загалом, план відновлення за напрямом «Екологічна безпека» від Професійної Асоціації Екологів України (ПАЕУ) включає 10 головних кроків до держави зеленої економіки:

1. Переробка, повторне використання відходів, у т.ч. відходів руйнувань, спричинених бойовими діями, як складова циркуляційної економіки та частина Європейського зеленого курсу.

2. Вирішення питання промислового забруднення, у т.ч. впровадження найкращих доступних технологій та методів керування (НДТМ) при відновленні інфраструктурних та промислових об'єктів, зруйнованих війною.

3. Енергетична безпека, енергоефективність.

4. Зелена енергетика: відновлювана енергетика в Україні (ВДЕ) та атомна енергетика.

5. Фіскальна політика, екологічний податок.

6. Запровадження системи екологічного контролю на основі ризико-орієнтованого підходу та результатів державної системи моніторингу довкілля.

7. Запровадження екологічного страхування як прогресивного інструменту для управління екологічними ризиками.

8. Усунення зайвих регуляторних процесів в процесі оцінки впливу на довкілля.

9. Адаптація до змін клімату в умовах децентралізації та збереження води.

10. Забезпечення сталого кадрового потенціалу для післявоєнного відновлення.

З боку держави в частині екобезпеки пропонується нарешті перейти від функції контролю до функції управління, сформувати надійне державно-

приватне партнерство в модернізації основних сфер (План відновлення за напрямом «Екологічна безпека», 2022).

Концепція зеленого відновлення базується на цілісному баченні розвитку суспільства, економіки та держави в цілому. Україна може скористатись можливостями, що створює повоєнне відновлення, для того, щоб закласти основи майбутнього зеленого зростання. Ця, цілком раціональна мета, може бути досягнута, якщо візія повоєнного відновлення буде зеленою.

В аналітичній записці «Зелене післявоєнне відновлення України: візія та моделі» міститься обґрунтування концепції зеленого повоєнного відновлення України та можливих моделей її втілення. Запропоновано розглянути дві моделі зеленого відновлення: амбітну та прагматичну. Обидві моделі спрямовані на забезпечення сталого повоєнного розвитку України, а також екологічно та кліматично стійкої відбудови зруйнованих та пошкоджених війною об'єктів.

Амбітна модель передбачає, що наші основні цілі – зелені (кліматично нейтральна чи зелена економіка, зелене зростання, стає сільське господарство тощо), як і процеси їх досягнення. Амбітну модель повоєнного відновлення можна коротко описати як Зелений [повоєнний] курс України. Її візія – «Зелена Україна як частина глобальної кліматично нейтральної економіки» (рис. 5).



Рис. 5. Архітектура амбітної моделі зеленого відновлення України

Джерело: (Зелене післявоєнне відновлення України, 2022)

Загальні та секторальні засади амбітної моделі зеленого відновлення повинні/можуть включати:

- побудова економіки майбутнього: економічне зростання на засадах декаплінгу (макроекономічні показники зростають, тиск на природний капітал знижується). Зокрема, це передбачає зростання показників вуглецевої продуктивності економіки (декарбонізація), водної продуктивності, зменшення питомих показників утворення відходів та забруднення вод і повітря, розвиток циркулярної економіки;
- збереження природного капіталу, включаючи управління водними, земельними ресурсами та збереження біорізноманіття;
- підвищення якості життя, включаючи екологічну якість життя населення;
- створення умов для зелених інвестицій та інновацій, державна підтримка зелених секторів у пріоритетних сферах, створення зелених робочих місць.

Прагматична модель – це зелений інструмент досягнення цілей, які не завжди можна віднести до «зелених» (наприклад, енергетична незалежність, енергетична безпека тощо). Ключова функція прагматичної зеленої моделі відновлення України – «озеленити» процес відновлення, запобігти довгостроковим негативним наслідкам з точки зору зеленого зростання України (build back better) та забезпечити реалізацію окремих, пріоритетних стратегічних ініціатив у цій сфері (рис. 6).



Рис. 6. Архітектура прагматичної моделі зеленого відновлення України

Джерело: (Зелене післявоєнне відновлення України, 2022)

З точки зору елементів прагматичної моделі зеленого відновлення, вони мають характер наскрізної інтеграції зелених питань у повоєнне відновлення через включення відповідних засад.

Основними інструментами прагматичної зеленої моделі мають бути (а) ефективні механізми врахування екологічних міркувань під час прийняття рішень, особливо на I та II етапах відновлення та (б) чіткі зелені умови фінансування для обраних об'єктів чи напрямів. Саме ці елементи, як і вдосконалені механізми ОВД та СЕО, повинні створювати ефективні «червоні лінії», щоб забезпечити реалізацію принципу «відбудовувати краще та зеленіше» (Зелене післявоєнне відновлення України, 2022).

Отже, військові дії росії, безперечно, є невинуватим і неспровокованим актом агресії проти незалежної і суверенної України, а також порушенням усіх існуючих норм міжнародного права щодо охорони природи, сталого розвитку, гуманітарного права, основних норм моралі та принципів людського співіснування. Окрім найочевидніших наслідків війни у багатьох регіонах України, таких як загибель людей, знищення домівок, загальної руйнації та злиднів, війна призводить до погіршення економічного стану країни, загрожує оточуючому середовищу та погіршує соціальні умови життя. Після війни ми будемо пожинати плоди бойових дій – руйнування екосистем, забруднення ґрунтів, зменшення біорізноманіття, зростання кількості шкідників у лісах. Крім того, відбудова країни потребуватиме значної кількості природних ресурсів. Також є ризик невиконання Україною вже поставлених кліматичних цілей, адже війна – це внесок у зміну клімату, а відновлення країни неминуче буде супроводжуватись значними викидами парникових газів (Паньків, 2022).

Висновки

На основі проведеного дослідження можна підсумувати, що існує значна кількість теоретичних підходів до визначення поняття «екологічна безпека», які стосується різних аспектів аналізу цієї категорії. Але спільним є те, що на сучасному етапі екологічна безпека стає об'єктом пильної уваги у наукових

дослідженням, оскільки пріоритетними напрямками майбутнього розвитку системи екологічної безпеки в нових інтеграційних умовах є активізація співпраці всіх країн світу щодо збереження навколишнього середовища та системна екологізація світового економічного простору на засадах стійкого розвитку. Детальний аналіз теоретичних підходів дозволяє визначити екологічну безпеку як здатність зберігати рівновагу і збалансованість у тріаді «екологія-економіка-соціум», що створює потенційні можливості для протистояння зовнішнім і внутрішнім загрозам і викликам, забезпечує стійкість соціально-економічного розвитку.

Узагальнюючи все вище перераховане, можна визначити мету національної політики екологічної безпеки, а саме це стабілізація і поліпшення стану навколишнього природного середовища України шляхом інтеграції екологічної політики до соціально-економічного розвитку України для гарантування екологічно безпечного природного середовища для життя і здоров'я населення, впровадження екологічно збалансованої системи природокористування та збереження природних екосистем. Екологічна політика є головним критерієм в структурі екологічної безпеки України. Головним стратегічним документом щодо державної екологічної політики в Україні є «Основні засади (стратегія) державної екологічної політики України на період до 2030 року». Цим документом зазначається, що процеси глобалізації та суспільних трансформацій підвищили пріоритетність збереження довкілля, а отже, потребують від України вжиття термінових заходів. Основною метою державної екологічної політики є досягнення доброго стану довкілля шляхом запровадження екосистемного підходу до всіх напрямів соціально-економічного розвитку України з метою забезпечення конституційного права кожного громадянина України на чисте та безпечне довкілля, впровадження збалансованого природокористування і збереження та відновлення природних екосистем.

У короткостроковій перспективі Україна повинна зосередитися на усуненні та зменшенні безпосередніх ризиків для здоров'я людей та

навколишнього середовища. Підготовка та проведення комплексних заходів з очищення навколишнього середовища, особливо пов'язаних зі збором, безпечною утилізацією та обробкою величезної кількості військових та інших відходів, допоможе зменшити безпосередні ризики для здоров'я.

Також виникне нагальна потреба у ремонті та реконструкції більш ефективної екологічної інфраструктури, яка забезпечуватиме постачання безпечної питної води, адекватні санітарні умови та належний збір, зберігання та обробку відходів. При визначенні пріоритетності заходів необхідно керуватись існуючими та потенційними наслідками для здоров'я людей.

У довгостроковій перспективі процес післявоєнного економічного розвитку має бути використаний для фундаментальної трансформації України у зелену економіку з чистим нульовим рівнем шкідливих викидів. Перехід на зелену економіку забезпечить більшу економічну ефективність, сильнішу конкурентоспроможність України на європейському та світовому ринках та добробут її людей.

Екологічні норми, стандарти та технічні правила, а також ретельна трансформація регуляторних процесів є ключовими для забезпечення ефективного досягнення екологічних цілей та одночасного зменшення адміністративного навантаження та перешкод для інвестицій та інновацій. Вони також мають передбачати ширше використання Принципу платності за забруднення ОЕСР.

Оскільки очікується, що для роботи з реконструкції будуть доступні значні кошти, акцент повинен робитись на те, щоб фінансові потоки сприяли досягненню екологічних і зелених цілей.

Україні також слід продовжити модернізацію природоохоронних установ на національному та місцевих рівнях для забезпечення високого адміністративного потенціалу з метою планування та впровадження екологічно стійкої реконструкції, а також запровадження регулювання у прозорий, професійний, оснований на оцінці ризиків та орієнтований на результати спосіб.

Список літератури

- EU4Environment (2022). *Towards green transformation of Ukraine: State of Play in 2021. Monitoring progress based on the OECD green growth indicators*. Retrieved from: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.eu4environment.org/app/uploads/2022/04/Towards-green-transformation-of-Ukraine-State-of-Play-in-2021-ENG.pdf>
- EU4Environment. (2021). *На шляху до зеленої економіки в Україні: робота триває – 2019-20*. Retrieved from <https://www.eu4environment.org/app/uploads/2021/05/Ukraine-country-profile-2020-21-second-edition.pdf>
- Hoffman, A. (1999). Institutional evolution and change: Environmentalism and the U.S. chemical industry. *Academy of Management Journal*, 42, 351-371.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., & Randers, J. (2004). *The Limits to Growth: The 30-Year Update*. Chelsea. Green Publishing. London Sterling VA : Earthscan
- Pankiv, N. (2022, травень). Crimes against the environment in the conditions of war in Ukraine. *Збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної конференції «Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022»* (pp. 49-53). Полтава : НУПП
- PAX. (2022). *Environmental Threat from Conflict in Ukraine: A First Glimpse of Environmental Damage Caused by Russia's Invasion of Ukraine*. Retrieved from <https://paxforpeace.nl/news/overview/environment-and-conflict-alert-ukraine-a-firstglimpse-of-the-toxic-toll-of-russias-invasion-of-ukraine>
- Александров, І. О., Половян, О. В., Коновалов, О. Ф., Логачова, О. В., & Тарасова, М. Ю. (2010). *Стратегія сталого розвитку регіону. Монографія*. Донецьк : Вид-во Ін-та економ. пром-сті

- Відбудова України для людей і природи: чому зелене відновлення важливе на шляху інтеграції до ЄС.* (2022). URL: <https://gre4ka.info/zhyttia/71191-vidbudova-ukrainy-dlia-liudei-i-pryrody-chomu-zelene-vidnovlennia-vazhlyve-na-shliakhu-intehratsii-do-yes>
- Горбулін, В, & Качинський К. (2007). *Системно-концептуальні засади стратегії національної безпеки України. Монографія.* ДП «Євроатлантикінформ», НВЦ
- Дедю, І. Й. (1990). *Екологічний енциклопедичний словник.* Кишинів : Ч. вид. ІТУ.
- Екоцид України та загроза голоду у світі: як російська агресія впливає на кліматичні зміни.* (2022). URL: <https://armyinform.com.ua/2022/06/20/ekoczyd-ukrayiny-ta-zagroza-golodu-u-sviti-yak-rosijska-agresiya-vplyvaye-na-klimatychni-zminy/>
- Екоцид: наслідки і ціна російської агресії.* (2022). URL: <https://eco.rayon.in.ua/topics/506221-ekotsid-naslidki-i-tsina-rosiyskoi-agresii>
- Збережемо природно-заповідний фонд України.* (2022). Верховна Рада України. URL: <https://www.rada.gov.ua/news/razom/220659.html>
- Зелене післявоєнне відновлення України: візія та моделі.* Аналітична записка. (2022, серпень). URL: https://dixigroup.org/wp-content/uploads/2022/08/green_recovery.pdf
- Паньків, Н. Є. (2022). *Характеристика екотуристичного потенціалу України в умовах війни.* Креативний простір України та світу. Харків : СГ НТМ «Новий курс», 154-162
- План відновлення за напрямом «Екологічна безпека» від ПАЕУ: 10 головних кроків до держави зеленої економіки.* (2022). URL: <https://ecolog-ua.com/news/plan-vidnovlennya-za-napryamom-ekologichna-bezpeka-vid-paeu-10-golovnyh-kroktiv-do-derzhavy>

- Приседська В., Шрамович В. (2022) *Спустошені землі. Якою буде природа України після війни*. BBC News Україна. (2022). URL: https://www.bbc.com/ukrainian/extra/mwu5sxghvc/ukraine_war_damaged_nature
- Третяк, А. М., Третяк, В. М., Трофименко, П. І., Прядка, Т. М., & Трофименко, Н. В. (2021). Стале (збалансоване) землекористування: понятійний базис та методологія інституціалізації. *Агросвіт*. № 24. 11-22. DOI: 10.32702/2306-6792.2021.24.11
- Україна приєдналася до європейської природоохоронної програми LIFE* Укрінформ. (2022). URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-uarazom/3514127-ukraina-priednalasa-do-evropejskoi-prirodoohoronnoi-programi-life.html>
- Усі заподіяні нашому довкіллю збитки ворог має обов'язково відшкодувати*. Голос України. (2022). URL: <http://www.golos.com.ua/article/360514>
- Хвесик, М. А., Степаненко, А. В., Обиход, Г. О. та ін. (2014). *Екологічна і природно-техногенна безпека України в регіональному вимірі. Монографія*. К. : ДУ «Інститут економіки природокористування та сталого розвитку НАН України»
- Хлобистов, Є. В., & Жарова, Л. В. (2010). Екологічна безпека просторового розвитку продуктивних сил України. *Механізм регулювання економіки*, 3(2), 182-188.
- Як у Дніпрі фіксують воєнні злочини проти довкілля*. Українська Правда. (2022). URL: <https://www.pravda.com.ua/columns/2022/04/29/7342967/>
- Якібчу, О. В. (2014). Особливості екологічної безпеки України в системі національної безпеки. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*, 100-104.

ВПЛИВ РАДІАЦІЙНОГО ОПРОМІНЕННЯ ТА ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ РАДІАЦІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

Синельніков О.Д., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, к.т.н., доцент, ст. викладач кафедри ЦЗтаКМЕП, Україна

Лоїк В.Б., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, к.т.н., доцент, доцент кафедри ЦЗтаКМЕП, Україна

Бабаджанова О.Ф., Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, к.т.н., доцент, доцент кафедри ЦЗтаКМЕП, Україна

Abstract

Types of ionizing radiation and their impact on the human body are considered. The dependence of the intensity of ionizing radiation (radiation dose) on the distance to the radiation source was established. Various types of ionizing radiation and materials for effective radiation protection have been studied according to the type of radiation they must absorb. The harmfulness of various types of ionizing radiation for living organisms has been revealed. Dose limits and the effective dose of exposure to the human body have been established as the sum of weighted equivalent doses absorbed from external and internal sources of radiation. Limit values and limits of radiation doses and their permissible levels are given. The principles of radiation safety and radiation protection are defined for the effective organization of population protection in conditions of radiation danger, namely: the principle of justification, the principle of non-exceedance, and the principle of optimization.

Вступ

Життєдіяльність населення в умовах війни в Україні постійно пов'язана з можливістю виникнення різноманітних загроз. В останні декілька тижнів лунають погрози застосувати ядерну зброю. Радіація і випромінювання

з'явилися відразу ж при виникненні Всесвіту та живих організмів, і люди навчилися з нею жити швидше ніж з бактеріями і вірусами.

Метою роботи є дослідження впливу джерел іонізуючого випромінювання на організм людини та принципи захисту. Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити ряд завдань, а саме:

- розглянути типи іонізуючого випромінювання та матеріали ефективного захисту;
- шкідливість різних видів іонізуючого випромінювання для живих організмів;
- шляхи ефективного захисту організму людини від іонізуючого випромінювання.

До іонізуючих відносять всі види випромінювання, які викликають іонізацію середовища (речовини), з якою вони взаємодіють. Іонізація заснована на від'єднанні принаймні одного електрона від атома або молекули з утворенням пари іонів: позитивних і негативних. Таким чином, іонізуюче випромінювання повинно нести більше енергії, ніж сила зв'язку електронів в атомі, щоб мати можливість вибивати електрони з їх валентних оболонок. В результаті такої взаємодії атом стає позитивно зарядженим іоном, тоді як випущений електрон захоплюється іншим, електрично нейтральним атомом або молекулою, утворюючи негативний іон. Тому іонізуюче випромінювання призводить до утворення в опромінюваній речовині пар іонів з протилежними електричними зарядами (Лоїк та ін., 2022).

Більшість видів іонізуючого випромінювання виникає внаслідок спонтанних змін, які відбуваються в ядрах атомів (це явище називають радіоактивністю), за винятком ультрафіолетового і рентгенівського випромінювання.

Ультрафіолетове випромінювання походить від оболонки електронів, яка оточує ядро атома, а рентгенівське випромінювання утворюється в результаті взаємодії електронів високої енергії з електричним полем важких ядер

елементів з великим атомним номером Z (рентгенівські промені є штучно створеним іонізуючим електромагнітним випромінюванням).

Загалом ми розрізняємо два види іонізуючого випромінювання:

✓ електромагнітне випромінювання – потік фотонів з енергіями, вищими за енергію фотона видимого світла – гамма (γ), рентгенівське та ультрафіолетове (УФ) випромінювання; гамма, рентгенівське та ультрафіолетове випромінювання є більш енергійною частиною всього енергетичного спектра електромагнітного випромінювання (рис. 1);

✓ корпускулярне випромінювання: частинки α (альфа – ядро 4He), частинки β (бета – електрони або позитрони), протони (p), нейтрони (n) та осколки поділу важких атомних ядер.

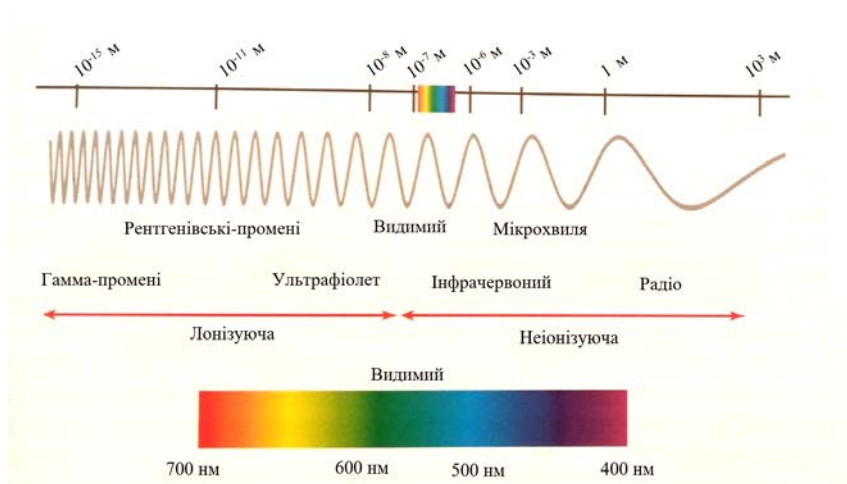


Рис. 1. Енергетичний спектр електромагнітного випромінювання

Тіло людини абсолютно нормально витримує помірні дози радіації та може нормально з ними справлятися. Проте, через утворення в опромінюваній речовині високореактивних іонів іонізуюче випромінювання дуже шкідливе для живих організмів, особливо для людей. Наприклад, великі дози іонізуючого випромінювання будь-якого типу викликають опік шкіри, схожий на термічний, що проявляється почервонінням, пухирцями та некрозом тканин. У свою чергу, великі дози електромагнітного випромінювання можуть викликати глаукому, запалення рогівки ока або катаракту (Лоїк та ін., 2022).

Не менш небезпечним наслідком опромінення організму іонізуючим випромінюванням є порушення синтезу та пошкодження дезоксирибонуклеїнової кислоти – ДІМА, наявної в кожній клітині і необхідної для їх правильного відтворення в організмі. Порушення в синтезі ДНК мають особливо згубний вплив на кров, репродуктивні органи і молоді клітини.

Виклад основного матеріалу

Радіоекологічна ситуація на території України формується під впливом глобальних викидів внаслідок аварійного опромінення, спричиненого вибухом ядерного реактора на Чорнобильській АЕС. Природні процеси розпаду радіонуклідів за роки після аварії на Чорнобильській АЕС внесли істотні корективи до структури розподілу радіонуклідів на території України.

За цей період майже вдвічі скоротилася площа території, де рівні забруднення ^{137}Cs перевищують 10 кБк/м². Більш ніж у 3 рази зменшилася територія, де рівень забруднення ^{90}Sr перевищував 4 кБк/м², тобто, майже на 90 % території України спостерігаються доаварійні рівні забруднення ^{90}Sr (Сукач & Бабаджанова, 2016).

Різні види іонізуючого випромінювання мають різний потенціал іонізації речовини. Корпускулярне випромінювання має найвищу потужність іонізації; чим більша маса частинки і вищий її електричний заряд, тим більша іонізуюча здатність випромінювання. Іонізуюча здатність корпускулярного випромінювання зменшується в порядку: осколки поділу важких атомних ядер, частинок, протонів, нейтронів.

Однак іонізаційна здатність не повністю визначає ступінь радіаційної небезпеки від окремих видів іонізуючого випромінювання. Не менш важлива його проникність, тобто здатність випромінювання проникати в матерію. Враховуючи загальне правило, що чим вище іонізуюча здатність того чи іншого виду випромінювання, тим менше його проникнення, то очевидно, що цілком достатньо для зупинки α -частинки аркуша паперу або роگیвки епідермісу.

Отже, якщо ми матимемо справу із зовнішньою загрозою іонізуючого випромінювання, корпускулярне випромінювання (крім нейтронного випромінювання) буде зупинено одягом і не завдасть радіаційного ураження організму. Таким чином, у випадку зовнішнього джерела випромінювання реальну радіаційну небезпеку становить лише електромагнітне випромінювання рентгенівського та гамма-типу (і нейтронне випромінювання), незважаючи на його відносно низьку іонізаційну здатність.

Ситуація різко змінюється, коли всередину організму потрапляють речовини, які випромінюють іонізуюче випромінювання (так звані радіоактивні речовини). У цьому випадку між живою тканиною та іонізуючим випромінюванням немає поглинаючих бар'єрів. Не тільки електромагнітне випромінювання, але й кожна випромінювана частинка, що характеризується високою іонізаційною здатністю, досягає живих клітин організму і завдає значних радіаційних пошкоджень. Для заряджених частинок радіаційне ураження організму може бути в кілька десятків разів більше, ніж для електромагнітного випромінювання такої ж інтенсивності. Це може статися у випадках, коли радіоактивні речовини (так звані відкриті радіоактивні джерела) можуть внутрішньо забруднити організм (зараження після вибуху брудної бомби, пожежі на сховищі радіоактивних відходів тощо). Тоді основним і необхідним захисним заходом є перекриття шляхів надходження радіоактивних речовин в організм, тобто захист дихальних шляхів протигазом або протипиловою маскою, а також захист шкіри від аерозолів і пилу.

Під час внутрішніх радіологічних забруднень додатковим фактором опромінення є можливість поглинання радіоактивних ізотопів, які вибірково накопичуються лише в деяких тканинах або органах організму. Так відбувається, наприклад, в разі потрапляння в організм радіоактивних ізотопів йоду, заліза, кальцію чи стронцію. Радіоактивна речовина в організмі поширюється не рівномірно, а накопичується в тканинах і органах, до яких окремі ізотопи мають особливу спорідненість: йод накопичується в щитовидній залозі, залізо – в еритроцитах, а кальцій і стронцій – в кістках. В результаті

поглинений радіоактивний матеріал не розподіляється по всьому тілу, а концентрується в невеликій масі/обсязі тканини або органу-мішені, багаторазово збільшуючи кількість іонізуючого випромінювання, що поглинається в цих частинах тіла. І, отже, значно збільшуючи радіаційне ураження органів.

Інтенсивність джерела іонізуючого випромінювання (або активність радіоактивного ізотопу) безпосередньо впливає на радіаційну небезпеку, викликану цим джерелом; чим нижча інтенсивність джерела випромінювання, тим потенційно нижча отримана доза поглиненого випромінювання.

Отримана доза опромінення строго і прямо пропорційна часу, проведеному в області іонізуючого випромінювання. Тривалість впливу радіаційної небезпеки завжди повинна бути обмежена мінімальним необхідним; контроль часу впливу дозволяє контролювати кількість отриманої дози опромінення.

Інтенсивність іонізуючого випромінювання, а отже і доза випромінювання, швидко знижується зі збільшенням відстані від джерела випромінювання. Це відношення характеризується зворотним квадратним законом: інтенсивність випромінювання (швидкість дози) обернено пропорційна квадрату відстані від джерела випромінювання, що математично ілюструє рівняння:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

де: I_1, I_2 – інтенсивність випромінювання на відстанях (відповідно r_1 і r_2) від джерела випромінювання; r_1, r_2 – відстань від джерела випромінювання.

Рівняння – це силова функція з експонентою «2», і означає, що інтенсивність випромінювання, а значить і радіаційна небезпека, швидко знижується зі збільшенням відстані від джерела випромінювання. Якщо відстань збільшується в два рази, інтенсивність випромінювання знижується в чотири рази, збільшується в три рази – знижується в дев'ять разів і так далі. Наприклад, при 10-кратному збільшенні відстані від джерела, інтенсивність

випромінювання знижується в 100 разів. Пояснення принципу зниження інтенсивності випромінювання зі збільшенням відстані за оберненим квадратом наочно проілюстровано на рис. 2.

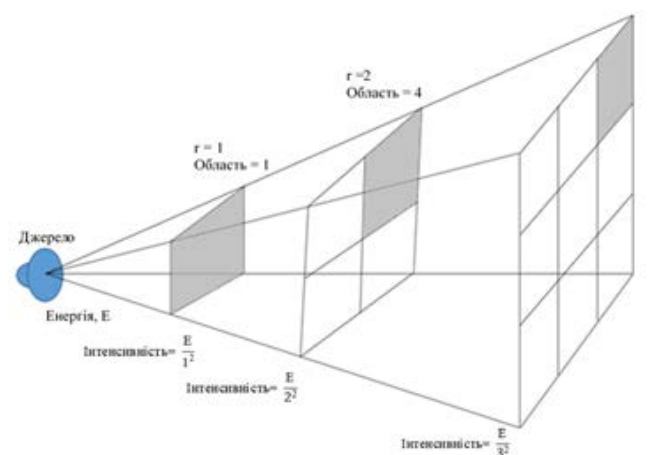


Рис. 2. Ілюстрація зворотного квадратного закону

Дотримання якомога більшої відстані від джерела випромінювання є одним з найпростіших, але дуже ефективних способів контролю і мінімізації дози опромінення, поглиненої під час роботи в умовах радіаційної небезпеки.

Ефективним і часто використовуваним методом захисту від іонізуючого випромінювання є використання протирадіаційного захисту. Хороший екран повинен ефективно поглинати випромінювання. Оскільки різні типи іонізуючого випромінювання по-різному взаємодіють з матерією, матеріал ефективного радіаційного захисту повинен бути підібраний відповідно до типу іонізуючого випромінювання, яке він повинен поглинати.

На рисунку 3 показано матеріали радіаційного захисту, адекватні для захисту від основних видів іонізуючого випромінювання.

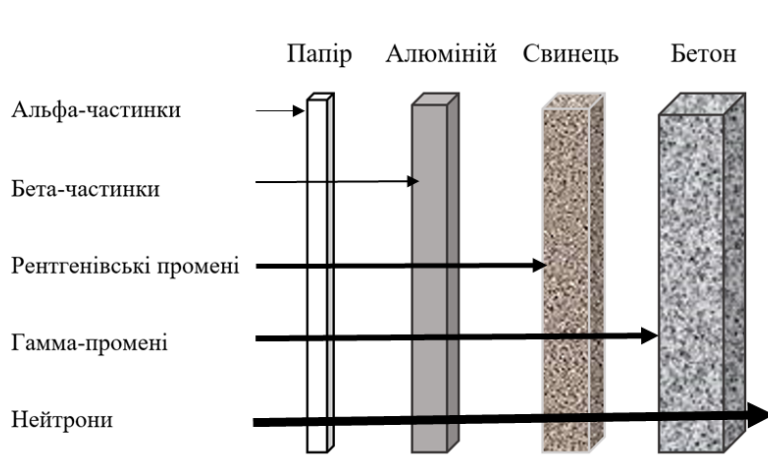


Рис. 3. Типові матеріали радіаційного захисту від різних видів іонізуючого випромінювання

Аналіз рисунку 3 свідчить, що аркуш паперу є достатній для захисту від альфа-випромінювання, а бета-випромінювання буде зупинене листом алюмінію. Більші вимоги ставляться до захисту від рентгеновського і гамма-електромагнітного випромінювання. Таке екранування повинно складатися з матеріалів, що містять елементи з високим атомним номером. Найчастіше використовується свинець, елемент з атомним номером 82, дешевий і легкодоступний матеріал. Свинцевого щита достатньо, щоб повністю поглинати рентгеновські промені і гамма-випромінювання низької та середньої інтенсивності, тоді як гамма-випромінювання з високою інтенсивністю, наприклад, що генерується в ядерних реакторах, вимагатиме використання товстого шару бетону. Нейтронне випромінювання вимагає специфічного екранування, так як нейтрони неефективно утримуються важкими матеріалами з високим атомним номером. Від нейтронного випромінювання ефективно захищає екранування з матеріалів з підвищеним вмістом водню, таких як вода, поліетилен або парафін.

Корпускулярне випромінювання (альфа, бета, протони) відносно легко зупинити простим і не товстим екрануванням. Тільки нейтронне випромінювання важко послабити, але більшість працівників зустрічають нейтронну небезпеку відносно рідко. Таким чином, найбільш важливим є

захист від рентгенівського і гамма-електромагнітного випромінювання. Таке випромінювання послаблюється і поглинається матерією через взаємодію з хмарами електронів атомів опроміненого середовища. Математичні ефекти загасання і поглинання електромагнітного випромінювання (для умов вузького пучка) описує експоненціальний закон поглинання: вузький пучок електромагнітного випромінювання послаблюється експоненціально при проходженні через матерію. Спрощена формула експоненційного закону представлена рівнянням:

$$\frac{I}{I_0} = 2^{-\frac{x}{H\Pi}} = \frac{1}{2^{\frac{x}{H\Pi}}}$$

де: I , I_0 – початкова (випадкова) і ослаблена (після проникнення товстого шару матеріалу) інтенсивність випромінювання; x – товщина радіаційного захисту; $H\Pi$ – половина значення шару – товщина екранування зниження інтенсивності електромагнітного випромінювання в два рази.

Завдяки експоненціальному характеру загасання і поглинання електромагнітного випромінювання в матерії, збільшення товщини нанесеного екранування швидко знижує інтенсивність випромінювання за екрануванням. Половина шару – значення, для якого інтенсивність випромінювання падає рівно наполовину по відношенню до початкової інтенсивності випромінювання, визначається для конкретного матеріалу екранування і для строго визначеної електромагнітної енергії випромінювання. Зміна енергії випромінювання або матеріалу екранування вимагає розрахунку нового значення $H\Pi$. Як показано на рисунку 4, п'яти $H\Pi$ достатньо, щоб послабити інтенсивність початкового випромінювання більше ніж у 30 разів, в той час як в разі семи $H\Pi$ інтенсивність випромінювання падає нижче 1 %.

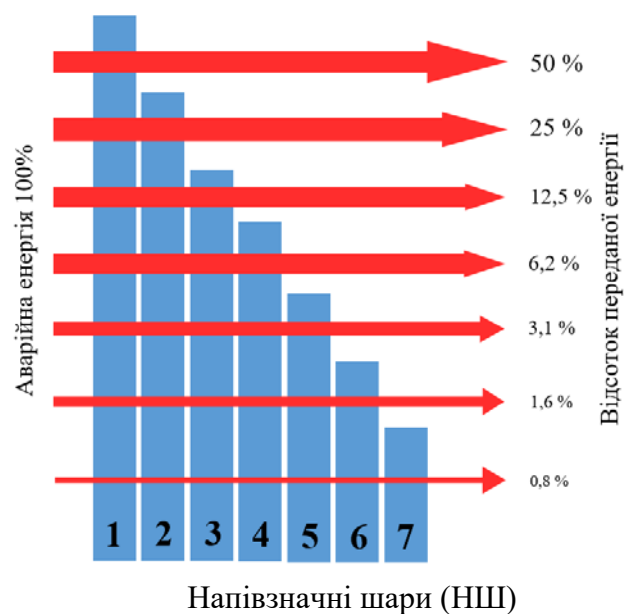
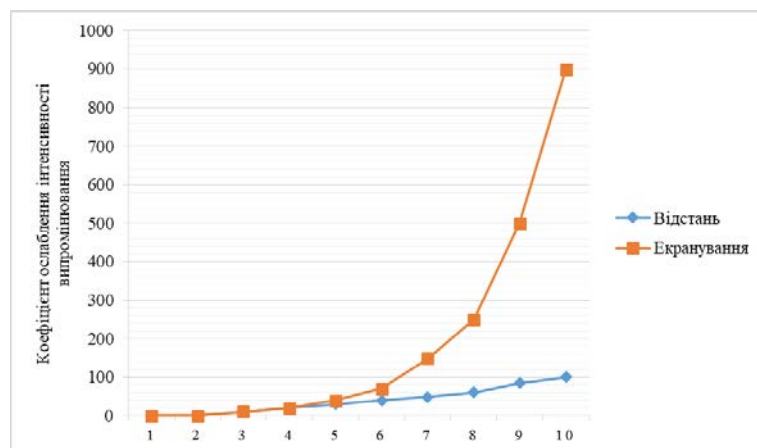


Рис. 4. Зниження інтенсивності електромагнітного випромінювання

Порівняння ефективності зниження інтенсивності іонізуючого випромінювання за рахунок збільшення відстані від джерела випромінювання та за рахунок використання екранування, яке поглинає таке випромінювання (рис. 5), показує, що застосування екранування дає кращі результати.



Кратність напівзначного шару (кратність відстані від джерела)

Рис. 5. Зниження інтенсивності іонізуючого випромінювання за рахунок збільшення відстані від джерела випромінювання

Ефекти ослаблення випромінювання близькі приблизно до 5-кратного збільшення відстані від джерела і до п'яти захисних шарів НШ, але далі ефективність екранування швидко зростає і для 10 НШ вже в 10 разів вище, ніж при 10-кратному збільшенні відстані від джерела випромінювання.

Таким чином, захист від електромагнітного випромінювання є більш ефективним, коли вища щільність захисного матеріалу і вищий середній атомний номер елементів, які містяться в ньому. Товщина половинного шару, і, таким чином, необхідна товщина екранування може бути меншою. Підвищення енергії електромагнітного випромінювання призводить до збільшення відповідного значення НШ і для підтримання однакових захисних значень товщина радіаційного екранування повинна бути більшою.

Ефективна доза іонізуючого випромінювання – це сума всіх доз від усіх видів випромінювання і всіх видів виконуваних видів діяльності, встановлених по відношенню як до працівників різних категорій, так і до населення в цілому. Межі дози опромінення визначаються в еквівалентній дозі, перераховуються для всього тіла людини і виражаються в зівертах (Зв). Дозвільні ефективні межі дози не включають вплив будь-якого природного випромінювання і доз, отриманих в результаті опромінення в медичних цілях.

Вперше визначили межу дози іонізуючого випромінювання на початку минулого століття. З тих пір граничні дози, рекомендовані для працівників і населення в цілому, а також їх обов'язкові значення, включені в нормативно-правові акти, постійно зменшуються. В даний час є переконання про неможливість встановлення порогових доз іонізуючого випромінювання, нижче яких не буде відбуватися ніяких індивідуальних ефектів опромінення.

Рекомендовані значення дозвільної дози встановлюються міжнародними органами; їх висновки потім переходять в національні законодавчі акти і стають законом даної країни. Останні межі дози радіації були визначені Директивою ЄС № 96/29/ЄВРОАТОМ. Правові механізми окремих країн ЄС не повинні бути більш ліберальними, ніж ті, що наведені в Директиві № 96/29, але можуть бути більш суворими. Інші європейські країни (та інші країни світу) можуть розглядати міжнародні директиви як керівні принципи, без зобов'язання приймати їх у своєму законодавстві, але на практиці більшість з них приймають такі рекомендації. Граничні значення, рекомендовані ЄС, перераховані в таблиці 1.

Річні межі дози іонізуючого випромінювання

Особи, які зазнають опромінення	Ефективна доза Е [мЗв]	Додаткові обмеження на еквівалентну дозу для окремих частин тіла [мЗв]		
		Очі	Шкіра (1см ²)	Кінцівки
Категорії А (працівники)	20 ^d	150	500	500
Категорії Б (працівники)	6	50	150	150
Категорії В (населення)	f	15	50	50

Дозвільні дози не включають вплив природних джерел випромінювання і доз, отриманих в результаті медичних досліджень та терапії.

Ефективна доза Е ілюструє вплив всього тіла як суми зважених еквівалентних доз, абсорбованих із зовнішніх і внутрішніх джерел випромінювання, визначених з урахуванням відповідних вагових факторів органів або тканин. Значення ефективної дози з позначкою ^d може бути перевищено до значень 50 мЗв/рік, якщо в найближчі 5 років його загальна кількість не перевищує 100 мЗв. Вона може бути перевищена, якщо середня ефективна доза протягом наступних 5 років не досягне значення 5 мЗв.

Ефективна межа дози визначається за умови впливу всього тіла або його частини в однорідному полі іонізуючого випромінювання. Ситуація ускладнюється, коли ми маємо справу з внутрішнім забрудненням організму радіоізотопами, які демонструють особливу спорідненість до конкретних органів або тканин організму. Потім переважна більшість загального поглинання радіоізоотопу вибірково накопичується в такому органі/тканині, названому органом-мішенню. Поглинена ефективна доза, яка випромінюється специфічним радіоізотопом, не поширюється по всьому тілу, тому розраховується відносно ваги органу-мішені, який становить лише частку від загальної маси тіла. Тому радіаційне опромінення органу-мішені набагато вище, чим більший вплив, тим нижча його маса відносно до ваги всього тіла.

Типовим прикладом вибірково кумулятивних радіонуклідів є

радіоактивні ізотопи йоду, які практично повністю всмоктуються в щитовидній залозі (маса 15-30 г, близько 0,03 % від маси тіла). У разі небезпеки інгаляції радіонукліду йоду засобом захисту є пероральне введення нерадіоактивного йоду в організм. Додатково введені нерадіоактивні ізотопи йоду також накопичуються в щитовидній залозі і, виходячи з принципу іонообміну, витісняють з цільового органу більшу частину радіоактивного йоду, раніше поглиненого в ньому, тим самим знижуючи ризик радіаційного випромінювання щитовидної залози. Надлишок введених в організм нерадіоактивних ізотопів йоду разом з переважною більшістю витісненого радіоактивного йоду виводиться з організму.

Швидкість дози іонізуючого випромінювання ілюструє миттєву і точкову (в місці вимірювання) радіаційну небезпеку для живих організмів. Для того, щоб встановити обмеження швидкості дози, необхідно звернутися до законодавчо встановлених конкретних меж дози опромінення. Тому межі швидкості дози будуть тісно пов'язані з певним типом осіб та частин тіла, для яких встановлені межі дози опромінення.

У свою чергу, для населення в цілому річна ефективна доза для всього організму становить 1 мЗв. Для працівників, які перебувають в установі з використанням джерел іонізуючого випромінювання, час впливу радіації також повинен становити 2000 годин. Тому гранична норма дози для таких працівників розраховується як 0,5 мЗв на рік, і вона в 20 разів нижча, ніж для працівників категорії А.

Однак, якщо розрахувати граничне значення норми дози для загального населення, яке проживає поблизу об'єкта, який створює радіаційну небезпеку, наприклад, атомної електростанції, то потенційний час впливу слід взяти як цілий рік, тобто 8760 годин. Тоді граничне значення норми дози складе лише приблизно 0,1 мЗв. Це значення дози близьке до значення природного рівня радіації в більшості країн.

Числові значення лімітів доз встановлюються на рівнях, що виключають можливість виникнення детерміністичних ефектів опромінення і, одночасно,

гарантують настільки низьку імовірність виникнення стохастичних ефектів опромінення, що вона є прийнятною як для окремих осіб, так і для суспільства в цілому.

Для осіб категорій А і Б (табл. 2) ліміти доз встановлюються в межах індивідуальної річної ефективної дози зовнішнього та внутрішнього опромінення та еквівалентних доз зовнішнього опромінення (ліміт річної ефективної дози та ліміти еквівалентної дози зовнішнього опромінення). Обмеження опромінення осіб категорії В (населення) здійснюється введенням лімітів річної ефективної та еквівалентних доз у критичній групі осіб категорії В. Останнє означає, що значення річної дози опромінення осіб, які входять в критичну групу, не повинно перевищувати ліміту дози, встановленого для категорії В.

Таблиця 2

Ліміти доз опромінення (мЗв за рік)

	Категорія осіб, які зазнають опромінення		
	А ^{а)б)}	Б ^{а)}	В ^{а)}
DL _E (ліміт ефективної дози)	20 ^{в)}	2	1
Ліміти еквівалентної дози зовнішнього опромінення:			
- DL _{lens} (для кришталика ока)	150	15	15
- DL _{skin} (для шкіри)	500	50	50
- DL _{extrim} (для кистей та стоп)	500	50	-

а) - розподіл дози опромінення протягом календарного року не регламентується;

б) - для жінок дітородного віку (до 45 років), та для вагітних жінок діють обмеження;

в) - в середньому за будь-які послідовні 5 років, але не більше 50 мЗв за окремий рік (DL_{max}).

Висновки

Проведеними дослідженнями різних типів іонізуючого випромінювання встановлено основні матеріали радіаційного захисту відповідно до типу випромінювання. Виявлено шкідливість різних видів іонізуючого випромінювання для населення.

Для ефективної організації захисту населення в умовах радіаційної небезпеки необхідно дотримуватись принципів радіаційного захисту. До основних принципів забезпечення радіаційної безпеки та радіаційного захисту необхідно віднести:

Принцип виправданості – будь-яка практична діяльність, що супроводжується опроміненням людей, не повинна здійснюватися, якщо вона не приносить більшої користі людям, що опромінюються, або суспільству загалом порівняно зі шкодою, яку вона заподіює.

Принцип не перевищення – рівні опромінення від всіх, що потрапляють під регулювання видів практичної діяльності, не повинні перевищувати встановлені межі доз.

Принцип оптимізації (принцип ALARA – As Low As Reasonably Achievable) – рівні індивідуальних доз і/або кількість осіб, що опромінюються, стосовно кожного джерела випромінювання повинні бути настільки низькими, наскільки це може бути досягнуто з урахуванням економічних і соціальних факторів.

Список літератури

- Лоїк В. Б., Ратушний Р. Т., Синельніков О. Д., Довгановський М. О., Яковчук Р. С., & Тарнавський А. Б. (2022). *Радіаційний, хімічний та біологічний захист. Частина 2. Радіаційний захист: Навчальний посібник*. Львів : ЛДУБЖД.
- Сукач Ю. Г., & Бабаджанова О. Ф. (2016). Радиоэкологическая ситуация на территории Украины. *Чрезвычайные ситуации: Теория, практика, инновации: материалы Международной научно–практической конференции* (pp. 497-498). Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого.

ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ОСВІТИ УКРАЇНИ НА ШЛЯХУ ДО СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Корольчук Л.В., Луцький національний технічний університет, к.е.н., доцент
кафедри міжнародних економічних відносин, м. Луцьк,
Україна

Abstract

The article is devoted to the study of the process of greening education in Ukraine within the framework of the sustainable development concept implementation, as part of which the essence of the concept of greening education is clarified; the experience of Ukraine in the formation of education for sustainable development was studied; ways of greening Ukraine's education in the context of EU integration and the mechanism of global integration of sustainable development into the education system of Ukraine were investigated.

The author's definition of this concept is given on the basis of the theoretical analysis of the definitions of greening education, as well as the rational processing of empirical data on the issue. The current trends of the internal political situation in Ukraine and its foreign economic orientation, as well as the geopolitical situation in the world, gave an opportunity to determine the key factors that have a significant impact on the need to intensify the process of greening education in our country. The mechanisms and measures for the formation of sustainable development education in Ukraine in the context of its foreign economic course and foreign policy interests were studied, for which the main international documents in this field were examined in detail.

It was emphasized that the education of sustainable development should be considered as an invisible weapon against the enemy, which will be passed down from generation to generation of Ukrainians as the strongest armor, as it is capable of deepening the mental gap between the Ukrainian nation and our terrorist neighbor,

cultivating empathy, moral values, intelligence, cultural behavior, national consciousness and patriotism.

Вступ

В умовах сьогодення ми є свідками багатьох природних катаклізмів, кліматичних змін, зникнення біологічних видів та інших екологічних метаморфоз зі знаком мінус. Ще у другій половині XX ст з'явилися свідчення вичерпності глобальних природних ресурсів та обмеженості асимілюючих можливостей планетарної екосистеми. Революційною працею нового бачення стала перша доповідь Римського клубу «Межі зростання» (1972 р.), яка дала серйозний привід задуматись над фізичними межами економічного зростання людства (Meadows D.H., Meadows D.L., Randers & Behrens, 1972). Відсутність глобального мислення, оперування лише видимими, осяжними для ока та людського розуму частинами цілого при прийнятті управлінських рішень створюють ілюзорне відчуття безмежності світу та його ресурсів, у зв'язку з чим економічне зростання за своєю суттю передбачало максимізацію масштабів переробки природних ресурсів капіталістичними мануфактурами.

Не дивлячись на велику кількість скептиків, які піддають сумніву глобальний характер екологічних проблем, світова спільнота здійснила перехід до моделі сталого розвитку, що ґрунтується на одноіменній концепції, яка становить собою сукупність ідей, положень та постулатів різних наук, зокрема філософії, соціології, економіки, екології, що визнана як домінантна ідеологія розвитку людської цивілізації у XXI ст. Термін «сталий розвиток» (sustainable development) трактується, як процес економічних і соціальних змін, при якому експлуатація природних ресурсів, напрямки інвестицій, орієнтація науково-технічного розвитку, розвиток особистості та інституційні зміни узгоджені між собою і зміцнюють нинішній і майбутній потенціал для задоволення людських потреб і який спрямований на поліпшення якості людського життя при збереженні сталості екосистеми.

Концепція сталого розвитку стала питанням номер один на порядку денному в ООН, що відображено у «Декларації тисячоліття» ООН, прийнятій у 2000 році 189-ма країнами на Саміті тисячоліття ООН, де визначено Цілі Розвитку Тисячоліття, тобто всеосяжні рамки цінностей, принципів і ключових чинників розвитку до 2015 року, а також у Підсумковому документі Саміту ООН зі сталого розвитку та прийняття Порядку денного розвитку після 2015 року в рамках 70-ї сесії Генеральної Асамблеї ООН у Нью-Йорку у вересні 2015 року «Перетворення нашого світу: порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року», де було затверджено 17 цілей сталого розвитку та 169 завдань (Transforming our World, 2015).

Україна, як і інші країни-члени ООН, приєдналася до глобального процесу забезпечення сталого розвитку. Для встановлення стратегічних рамок національного розвитку України на період до 2030 року на засадах принципу «Нікого не залишити осторонь» було започатковано інклюзивний процес адаптації Цілей сталого розвитку. Кожну глобальну ціль було розглянуто з урахуванням специфіки національного розвитку (Наша робота..., б.д.). Сталий розвиток було визначено глобальною метою національної стратегії нашої держави до 2020 року. Україна посіла 36 місце в рейтингу 165 країн світу за індексом сталого розвитку, який щорічно складається ООН і Фондом Bertelsmann (Sachs, Kroll, Lafortune, Fuller & Woelm, 2021).

Одним із найважливіших аспектів ефективної реалізації концепції сталого розвитку є відповідна якісна освіта, яка становить собою фундамент для трансформації світової економічної системи до більш стійкого та екологічно відповідального зразка – зеленої, циркулярної, замкненої економіки, адже такий перехід вимагає спеціальних знань про навколишнє середовище та його взаємодію з усіма сферами людського життя. Такі знання вже не обмежуються освоєнням лише природничих наук, а повинні інтегруватися в усі без винятку науки, що створює серйозний виклик для усіх рівнів освіти, адже вимагає тотальної екологізації освіти та навчання і, як результат, переходу до освіти сталого розвитку.

Мета дослідження: з'ясувати сутність поняття екологізації освіти; вивчити досвід України у формуванні освіти для сталого розвитку; дослідити шляхи екологізації освіти України в контексті інтеграції до ЄС та механізм глобальної інтеграції сталого розвитку в систему освіти України.

1. Сутність поняття екологізації освіти

Актуалізація освіти сталого розвитку підсилила науковий інтерес до дослідження процесів екологізації освіти. Розглянемо визначення поняття екологізації освіти у авторській інтерпретації українських та зарубіжних вчених, щоб з'ясувати його суть.

Так, Дубович І. під екологізацією освіти розуміє: «систему заходів, спрямованих на забезпечення у навчально-виховному процесі всіх рівнів освіти (початкова, середня, вища) належними екологічними знаннями та їх практичним застосуванням. А шляхами її реалізації – фундаменталізацію екологічних дисциплін та екологізацію всіх інших навчальних предметів» (Дубович, 2006).

Лук'янова Л. у своїх наукових дослідженнях дає визначення екологізації освіти, як: «фундамента вирішення проблем екологічної освіти у конкретному сенсі даного поняття та орієнтира змін у викладанні всіх інших дисциплін. З огляду на це її провідним завданням є формування поведінки, яка не знищує природу, не спростовує культуру особистості, не перетворює дух на розум, а людину на пересічного споживача» (Лук'янова, 2012).

Крім того, автор пропонує не брати до уваги екологічну освіту, як окремий вид освіти, що передбачає затрати додаткового часу на освоєння знань раціонального природокористування, або професійної екології тощо, а зосередитись на екологізації всієї системи освіти в цілому на шести рівнях: інформаційно-пізнавальному, підготовчому, структурно-логічному, конструктивно-екологічному, професійно-екологічному, свідомо-етичному, у відповідності до яких забезпечувати відповідними навчальними компонентами навчальний процес.

Схожої думки притримуються Крисаченко В. та Хилько М., вважаючи, що: «екологізація сучасної науки має відбуватися у двох напрямках: шляхом розширення предмета екологічної науки та шляхом наповнення екологічним змістом вже відомих наук» (Крисаченко та Хилько, 2002).

Стецула Н. вважає, що: «у наш час екологічна освіта стала одним із інтегральних чинників розвитку наукових галузей, адже вона настільки розкриває фундаментальні сторони існування людства, що змушує науковців розглядати її як постійну проблему з єдиною методологічною орієнтацією, достатньо вираженими тенденціями до синтезу усього розмаїття знань про природу і навіть залученням основних законів соціального розвитку» (Стецула, 2020). Екологізація освіти та формування екологічної культури молоді, на думку автора, є беззаперечними умовами трансформації сучасної цивілізації до моделі сталого розвитку.

Схожий підхід і у Мелаш В., Гнатів О., Варениченко А., які розуміють екологізацію навчально-виховного процесу як: «систематизовану педагогічну діяльність, що передбачає шляхи формування інтелектуального розвитку на засадах морально-етичного виховання та екологізацію практичної діяльності майбутніх фахівців» (Мелаш, Гнатів та Варениченко, 2014).

Про формування комплексного міжгалузевого правового інституту екологізації освіти йдеться у дослідженнях Анісімова Г. та Донець О., які розглядають екологізацію як: «багатоаспектне та складне соціально-правове явище комплексного характеру; складову національної безпеки; основоположний елемент державної екологічної політики; вид екологічних прав громадян; складник формування екологічної свідомості суб'єктів суспільних відносин; принцип екологічного права; тип освітніх відносин; вид реформаційної освітньої діяльності тощо» (Анісімова та Донець, 2016).

Туниця Ю. та ін. дають наступну дефініцію поняття екологізації освіти: «це процес насичення навчальних програм підготовки фахівців усіх напрямів екологічними аспектами з метою формування еколого-економічного способу мислення, замість однобокого традиційного економічного мислення, а освіту

для сталого розвитку розглядають як розширення процесів екологізації освіти з урахуванням соціального виміру суспільного розвитку, яка формує глибинне, цілісне розуміння взаємозумовленості та взаємозалежності економічних, екологічних і соціальних систем. Освіту визнано найбільш ефективним інструментом імплементації стратегії сталого розвитку» (Туниця, Лиско, Загвойська та Соловій, 2019).

Зарубіжна вчені також трактують екологічну освіту, як всеохоплююче, глобальне поняття, яке далеко виходить за межі навчальної програми з екології і, насправді, є широким загальним терміном, що може інтегруватись практично у будь-який процес навчання. Так, Самуель Дей Фасбіндер пов'язує сутність та актуальність екологізації освіти із загостренням глобальних проблем людства та вважає, що: «довкілля – це те, де ми живемо: воно охоплює весь світ, а не тільки зовнішнє середовище; освіта ж охоплює практично будь-який процес викладання та навчання, і ми вчимося весь час» (Fassbinder, 2012).

Франческа Боргонові, Оттавія Бруссіно, Хельке Зайц і Сара Уайлді переконані, що захист нашого довкілля має стати спільною культурною та соціальною нормою, якій навчають з раннього віку. Це вимагає загальношкільного та міждисциплінарного підходу, що охоплює викладання та навчання, активну участь учнів і батьків, а також партнерство з місцевими громадами. Своєчасна та ефективна освітня орієнтація також мають вирішальне значення для того, щоб студенти зробили правильний вибір, який дозволить їм максимально використати цю компетенцію (Borgonovi, Brussino, Seitz & Wildi, 2022).

Узагальнюючи розглянуті вище визначення, можна констатувати, що екологізація освіти – це процес перетворення освіти сьогодення на освіту для сталого розвитку, який носить міждисциплінарний комплексний характер, основою якого є екологічні науки.

В свою чергу, Концепція освіти для сталого розвитку (ОСР) започаткована Йоганнесбурзьким самітом 2002 року, де розглядалася як необхідність переосмислення і реформування всієї суспільної практики і освіти

в тому числі задля розширення можливостей людей різного віку брати на себе відповідальність за створення сталого майбутнього (UNESCO. Education for Sustainability, 2002).

В наступних документах ЮНЕСКО ОСР характеризують як:

- 1) інноваційну концепцію, яка пропонує новий сенс для викладання і навчання у різноманітному освітньому середовищі (Education for Sustainable Development Goals, 2017);
- 2) ключовий інструмент досягнення Цілей сталого розвитку;
- 3) цілісну (holistic) та трансформаційну освіту, що враховує зміст і результати навчання, педагогіку і навчальне середовище;
- 4) невід’ємну частину якісної освіти у рамках концепції безперервної освіти (A Decade of Prog., 2017).

Ісаєнко В. та ін. визначають освіту для сталого розвитку, як таку, що: «спрямована на набуття знань і навичок, що сприяють формуванню нового екологічно свідомого суспільства, формування нових світогляду, позицій, цінностей, сприяють розвитку, який є соціально бажаним, економічно життєздатним і екологічно збалансованим» (Ісаєнко та ін., 2016).

Сказане вище, а також раціональна обробка емпіричних даних з проблематики, що досліджується, дають можливість зробити висновок, що екологізація освіти – це сукупність механізмів, методів та засобів, направлених на трансформацію системи освіти на освіту для сталого розвитку, яка має сприяти досягненню Цілей сталого розвитку із максимальним залученням всіх верств та категорій населення, що в результаті дозволить сформувати нове екологічно свідоме суспільство.

2. Досвід України у формуванні освіти для сталого розвитку

Ознаки екологічної освіти в Україні з’являються у середині-кінці 70-х років минулого століття, коли питання охорони навколишнього природного середовища стали актуальними для розвитку держави. Після Стокгольмської конференції ООН з навколишнього середовища (1972 р.) були прийняті законодавчі та нормативні акти, спрямовані на організацію охорони та контролю стану довкілля, почала розвиватись науково-дослідницька робота. У

2001 році на Колегії МОН України була затверджена Концепція екологічної освіти, у відповідності до якої: «Збалансований, екологічно безпечний (гармонійний) розвиток повинен бути базисною, вихідною ідеєю, методологічною основою екологічної освіти згідно з міжнародними вимогами» (Про концепцію еколог., 2001).

Міністри охорони навколишнього середовища країн-членів ЄЕК ООН на П'ятій Конференції «Довкілля для Європи», що відбулась у Києві 23 травня 2003 року, ухвалили «Заяву про освіту для сталого розвитку» (Заява Міністрів охор., 2003). Україна стала однією з 55-ти країн, які підписали Стратегію освіти для сталого розвитку. У заяві йдеться про рішення розробити регіональну Стратегію в галузі освіти для сталого розвитку. Зокрема, було визнано, що освіта є одним із головних інструментів, які забезпечують охорону навколишнього середовища та сталий розвиток, і що в рамках екологічної освіти все більше приділяється уваги широкому колу питань, включених до «Порядку денного на XXI сторіччя».

Як результат, у Стратегії розвитку освіти в Україні на 2012-2021 роки одним із стратегічних напрямів визнано екологізацію освіти та її переорієнтацію на Цілі сталого розвитку, що актуалізувало тему становлення та розвитку ОСР в нашій державі (Про Національну страт., 2013).

Процес «Довкілля для Європи» являє собою унікальне партнерство держав-членів Європейської Економічної Комісії Організації Об'єднаних Націй (ЄЕК ООН) та організацій системи ООН (Освіта для стал., б.д.). Це важлива платформа для забезпечення діалогу і співробітництва не тільки між урядами, але і з міжнародними структурами, неурядовими організаціями і приватним сектором у галузі охорони довкілля та сталого розвитку. Функції секретаріату цього Процесу виконує ЄЕК ООН. Процес «Довкілля для Європи» розпочався із Першої Пан-Європейської Конференції міністрів охорони навколишнього середовища, яка відбулася у замку Добржиш біля Праги 21-23 червня 1991 року. З того часу було проведено вже вісім таких конференцій міністрів. За 25 років діяльності ми завдячуємо процесу «Довкілля для Європи» цілим

рядом досягнень та здобутків, серед основних із них варто відзначити Рамкову конвенцію про охорону та сталий розвиток Карпат, Орхуську конвенцію, Протоколи до Конвенції про транскордонне забруднення повітря на великі відстані, Загальноєвропейську стратегію поступового припинення використання етильованого бензину, Протоколи щодо захисту атмосферного повітря, Протокол про реєстри викидів і перенесення забруднювачів до Орхуської конвенції, Протокол про стратегічну екологічну оцінку до Конвенції Еспоо, Стратегію ЄЕК ООН щодо освіти для сталого розвитку тощо. В цьому (2016) році в м. Батумі (Грузія) було проведено Восьму конференцію міністрів, де обговорювалися такі питання як екологізація економіки в загальноєвропейському регіоні, підвищення якості повітря в інтересах поліпшення стану навколишнього середовища і здоров'я людини, освіта в інтересах сталого розвитку та інші.

Разом з тим, в закладах освіти України всіх рівнів, від садочків і загальноосвітніх шкіл до вищих навчальних закладів, в навчальну програму вводять спеціалізовані курси, що знайомлять слухачів із принципами сталого розвитку. Розвивається в Україні і неформальна освіта у даній галузі, провідну роль у впровадженні якої займають громадські організації та об'єкти природно-заповідного фонду. Хотілося б зазначити, що в Україні також існує партнерська мережа «Освіта в інтересах сталого розвитку в Україні» яка офіційно була створена у 2014 році за підтримки Програми малих грантів Глобального екологічного фонду (Партнерська мережа). Серед основних завдань Мережі: об'єднати всі зацікавлені сторони у єдину Мережу; забезпечити обмін досвідом, інформацією, матеріалами та корисними контактами; забезпечити доступ та збір наявних нормативних національних та міжнародних документів, навчальних матеріалів, інформацію про міжнародний досвід тощо у галузі ОСР; сприяти навчанню українського суспільства навичкам будувати власне життя з урахуванням потреб сталого розвитку. За два роки функціонування Мережа об'єднала близько 100 учасників, серед яких громадські організації, школи, заклади освіти, органи державної влади та інші партнери.

Попри наявний позитивний досвід розвитку ОСР в Україні, поточні тенденції внутрішньої політичної ситуації в Україні та її зовнішньоекономічної спрямованості, а також геополітична обстановка в світі дають підстави вважати, що сьогодні важливо інтенсифікувати даний процес з погляду на три ключових фактори:

1. Заявлені наміри України стати повноправним членом ЄС вимагають активізації процесів конвергенції української соціально-економічної системи до стандартів Союзу і освіти зокрема, як фундаменту для переходу до зеленої економіки.

2. Складна політична ситуація в Україні, спровокована російсько-українською війною, вимагає глибокого переосмислення ролі нашої держави на світовій арені і, як результат, якомога глибшої інтеграції до цивілізованого демократичного світу, як засіб протидії ворогу та наближення нашої перемоги.

3. Загострення економічної кризи в Україні, розгром енергетичної, транспортної та громадянської інфраструктури у зв'язку з військовими баталіями, що ведуться на нашій території, вимагають вжиття негайних дієвих заходів зі швидкого економічного відновлення та розвитку, спрямованих на посилення конкурентних позицій нашої держави на світових ринках, що передбачає переймання провідних прогресивних практик в усіх сферах життя суспільства, зокрема і в освіті.

3. Екологізація освіти України в контексті інтеграції до ЄС

Заявка на вступ України до ЄС вимагає безперервної підготовки задля приведення української нормативно-інституційної та соціально-економічної бази у відповідність до європейських стандартів і критеріїв. В галузі освіти пріоритетним напрямом в даному контексті є, безумовно, її екологізація та формування ОСР. З огляду на це, в процесі поточного єврореформування освіти України на шляху до її інтеграції в ЄС важливим документом для вивчення та освоєння є Рекомендації Ради ЄС щодо навчання екологізації та сталому

розвитку від 25 травня 2022 року, я якому запропоновано наступне (Proposal for a Coun., 2022):

- активізувати та зміцнити зусилля для підтримки системи освіти та навчання у прийнятті заходів для екологізації та сталого розвитку, щоб усі здобувачі освіти будь-якого віку мали доступ до високоякісної, справедливої та інклюзивної освіти сталого розвитку, яка передбачає освоєння знань про зміну клімату, захист навколишнього середовища та біорізноманіття, розвиток умінь належного екологічного, соціального та економічного мислення.

- визначити навчання екологізації та сталому розвитку як один із пріоритетів у сферах політики та освіти з метою формування цілісної освіти сталого розвитку, як запоруки благополучного життя наступних поколінь людства.

- впроваджувати та розвивати комплексні та спільні підходи до викладання та навчання екологізації та сталому розвитку із залученням усіх зацікавлених сторін із системи освіти, а також зацікавлених стейкхолдерів з інших відповідних секторів.

- надати низку можливостей для навчання у формальному та неформальному середовищі, щоб люди будь-якого віку могли готуватися до екологізації та активно сприяти розвитку екологічно безпечної, сталої, замкнутої та кліматично нейтральної економіки.

Згідно Документа на рівні держави рекомендуються наступні заходи:

- У тісній співпраці з відповідними зацікавленими сторонами узгодити стратегії та плани в освіті та навчанні з переходом на зелений і сталий розвиток, в тому числі пов'язані з навчальними програмами та оцінюванням, а також початковою підготовкою та підвищенням кваліфікації педагогів. Підтримувати розробку національних та інших стратегій державної політики через призму сталого розвитку.

- За необхідності інвестувати в екологічне обладнання та проводити навчання на ньому, в ресурси та інфраструктуру (будівлі, майданчики та технології) для сталого навчання, спілкування та відпочинку заради

забезпечення здорового, безпечного, інклюзивного, творчого навчального середовища.

- Підвищувати обізнаність про переваги та можливості навчання екологізації та сталому розвитку, а також підтримувати формальну та неформальну освіту та відповідні інституції, включаючи дошкільну освіту, щоб розвивати актуальні навички для повсякденного життя здобувачів освіти, виховувати культуру сталого розвитку.

- Розвивати знання, навички та ставлення здобувачів освіти будь-якого віку жити довше, дотримуватись сталих моделей споживання та виробництва, переймати здоровіший і більш екологічно свідомий спосіб життя та сприяти індивідуальній та колективній екологічній трансформації суспільства.

- Підтримувати та вдосконалювати викладання і навчання для сталого розвитку шляхом розбудови відповідної інфраструктури, цифрових інструментів і ресурсів, а також підтримки цифрової компетентності освітян.

- Скоординовано залучати всіх здобувачів вищої освіти до спільної розробки пропозицій та підходів до екологізації і сталого розвитку. Заохочувати гендерно збалансовану участь учнів будь-якого походження, включаючи тих, хто має менші можливості. Надати всім здобувачам освіти можливість брати участь у прийнятті рішень на рівні свого навчального закладу, а також на рівні місцевих громад.

- Розробляти та підтримувати у тісній співпраці з відповідними зацікавленими сторонами навчальні програми для розвитку навичок сталого розвитку з раннього віку.

- Підтримувати співпрацю та створення мереж у питаннях сталого розвитку, захисту навколишнього середовища та біорізноманіття, залучаючи місцеву владу, молодіжні організації, центри екологічної освіти, центри глобального навчання, парки, ферми, музеї, бібліотеки, неурядові організації, споживчі організації та бізнес, таким чином зміцнюючи зв'язки між формальним та неформальним навчанням.

- Сприяти розширенню передового досвіду та педагогічних досліджень у сфері викладання і навчання для екологізації та сталого розвитку на всіх рівнях професійної підготовки.

В свою чергу, підтримка здобувачів освіти передбачає наступні заходи:

- Надання учням, починаючи з дошкільного віку, можливості взаємодіяти з природним світом і його біорізноманіттям, цінувати його, створювати почуття цікавості та здивування, а також вчитися діяти заради сталого розвитку, індивідуально та колективно.
- Зміцнення шляхом фінансової підтримки високоякісного навчання впродовж життя для екологізації та сталого розвитку, включаючи стажування, волонтерство, позакласну діяльність, роботу з молоддю та інші форми формального та неформального навчання.
- Надання учням практичних можливостей, щоб спостерігати за природою та піклуватися про неї, а також вчитися зменшувати споживання, ремонтувати, повторно використовувати та переробляти, тим самим допомагаючи їм зрозуміти важливість сталого способу життя та циркулярної економіки.
- Забезпечення доступу до релевантної інформації про кліматичну кризу, стан навколишнього середовища та біорізноманіття відповідно до Конвенції про доступ до інформації, участь громадськості в процесі прийняття рішень і доступ правосуддя у справах навколишнього середовища.
- Розвиток у здобувачів освіти навичок вирішення екологічних проблем, критичного мислення, навичок медіаграмотності та системного мислення, щоб мінімізувати відчуття безпорадності перед обличчям планетарної кризи.

Згідно Документа передбачено всесторонню підтримку вчителів для сприяння навчанню екологізації і сталого розвитку завдяки наступним підходам:

- ✓ Необхідно визнати, що всі педагоги, незалежно від їхньої дисципліни чи сектора освіти, є викладачами сталого розвитку, які повинні підтримувати своїх учнів у підготовці до екологізації. Слід дати їм змогу підвищити обізнаність своїх учнів щодо Цілей сталого розвитку. Важливо консультувати та

підтримувати освітян щодо розробки навчальних планів і програм та інших освітніх реформ, пов'язаних із переходом на сталий розвиток, а також щодо планування належного професійного розвитку.

✓ Підтримувати інтеграцію екологізації та сталого розвитку в початкові програми навчання вчителів та інструкторів, у програми безперервного професійного розвитку, а також у професійні стандарти для педагогів.

✓ Розробляти програми професійного розвитку на рівні навчальних закладів. Заохочувати викладачів використовувати цифрові інструменти і технології у їхній практиці для покращення викладання та навчання екологізації і стійкому розвитку.

✓ Розвивати та досліджувати можливості і стимули для викладачів брати участь у програмах професійного розвитку, пов'язаних із екологізацією, наприклад, надаючи викладачам статусу координатор сталого розвитку тощо.

✓ Підтримувати педагогів в освоєнні нових прогресивних педагогічних методів, які покращують викладання та навчання для екологізації та сталого розвитку міждисциплінарними способами та розвивають соціально-емоційні аспекти навчання, щоб усі учні могли стати агентами змін, навчитися міркувати і діяти, як індивідуально, так і колективно, локально та глобально для більш стійкого світу.

✓ Заохочувати трансформаційне та міждисциплінарне викладання та навчання з використанням як традиційних, так і інноваційних підходів до навчання, включаючи практичне навчання, підхід STEAM (Наука, технології, інженерія, мистецтво та математика), хакатони, сервісне навчання та гейміфікацію.

✓ Розробити та надати ресурси для підтримки педагогів у процесі оцінювання результатів навчання. Підтримувати викладачів у використанні традиційних і нових інструментів та навчальних матеріалів для підготовки до екологізації та сталого розвитку як очно, так і у цифровому форматі. Забезпечити доступ до експертних центрів, в тому числі до центрів екологічної освіти та навчання.

✓ Заохочувати дослідницьку та інноваційну спільноту до співпраці з формальними та неформальними освітніми установами, щоб підтримати освітян у переході до сталого розвитку. Підтримувати участь у дослідницьких проектах, пов'язаних із надзвичайною кліматичною ситуацією, екологічною кризою та стійкістю.

Має місце також підтримка формальних та неформальних освітніх закладів в ефективній інтеграції у процесі навчання екологізації та сталому розвитку, що передбачає:

- Заохочення та сприяння ефективним загальноінституційним підходам до сталого розвитку, які охоплюють викладання та навчання; бачення, планування та управління; активну участь учнів і персоналу; залучення сімей; управління будівлями та ресурсами; партнерство з місцевими громадами; дослідження та інновації.

- Підтримку освітніх закладів у розробці, моніторингу та оцінці їхніх стратегій сталого розвитку та/або впровадженні сталого розвитку в існуючі процеси та заходи.

- Мотивацію та підтримку центрів ранньої освіти та догляду за дитиною, шкіл, ЗВО, закладів професійно-технічної освіти, навчальних закладів для дорослих та ін. брати участь в екологічних ініціативах, які можуть принести екологічну, соціальну, освітню та економічну вигоду.

- Зосередження освітніми закладами частини внутрішнього та/або зовнішнього аналізу забезпечення якості навчальних послуг на стійкості. Визначення ефективності участі вищих навчальних закладів за допомогою механізмів фінансування.

- Подальше впровадження екологізації та сталого розвитку в програми, навчальні плани та модулі професійно-технічної та вищої освіти у низці дисциплін, включаючи бізнес-дослідження, соціальні науки, педагогічні науки, гуманітарні науки, мистецтво, архітектуру та інженерію, землеустрій та

управління. Використання ресурсів та матеріалів, розроблених екологічними та освітніми неурядовими організаціями та іншими відповідними органами.

- Підтримку закладів вищої освіти, професійно-технічної освіти у розробці невеликих та спеціалізованих навчальних курсів щодо екологізації та сталого розвитку, для поглиблення, розширення та оновлення професійних компетенцій.

- Сприяння партнерству з усіма дисциплінами та учасниками, включаючи бізнес, мистецтво, ферми, культурну спадщину, спорт, молодь, науково-дослідні інститути, організації громадянського суспільства, галузь освітніх ресурсів та освітні дослідження. Підтримка розвитку позакласних, літніх та інших програм стажування у лабораторіях, на підприємствах, в дослідницьких установах та неурядових організаціях.

- Підтримку програм, які сприяють сталому розвитку, інноваціям і підприємництву. Зміцнення закладів вищої освіти та професійно-технічної освіти, створення центрів сталого розвитку, які сприятимуть інноваціям і підприємництву, ефективному переходу до циркулярної економіки.

Важливо зазначити, що для підтримки системи освіти у прийнятті заходів для екологізації та сталого розвитку можливо мобілізувати національні кошти та кошти ЄС для інвестицій в інфраструктуру, навчання, інструменти та ресурси для підвищення стійкості та готовності формальної та неформальної освіти до екологізації, зокрема Erasmus+, Фонду відновлення та стійкості, Європейського корпусу солідарності, Європейського соціального фонду плюс, Європейського фонду адаптації до глобалізації, Європейського фонду регіонального розвитку, Інструмента технічної підтримки, програми Цифрової Європи, Horizon Europe та InvestEU.

4. Глобальна інтеграція сталого розвитку в систему освіти України

Ключове місце у глобальній інтеграції сталого розвитку в систему освіти національних держав займає Програма «Освіта для сталого розвитку: на шляху до досягнення Цілей сталого розвитку» – це глобальна рамкова програма на

продовження Глобальної програми дій по освіті в інтересах сталого розвитку (2015-2019 рр.) на період 2020-2030 років (Education for Sust., 2020), прийнята на 40-й сесії Генеральної конференції ЮНЕСКО, і затверджена 74-ю сесією Генеральної Асамблеї ООН у 2019 році.

У резолюції 72/222 (2017 р.) Генеральної Асамблеї ООН освіту для сталого розвитку визначено як «невід’ємний елемент» Цілей сталого розвитку № 4 «Освіта» та «одним з ключових факторів, що сприяють досягненню всіх інших цілей у галузі сталого розвитку», що знайшло додаткове підкріплення в резолюції 74/233 (2019 р.) у заклику до країн активізувати зусилля щодо формування системи освіти для сталого розвитку. Такий стан речей зумовлюють наступні причини:

1. ОСР сприяє підвищенню поінформованості про 17 Цілей сталого розвитку в освітніх середовищах, дозволяє здобувачам освіти і широкому загалу краще зрозуміти, що таке Цілі сталого розвитку і як ці цілі пов’язані з життям індивіда та суспільства.

2. ОСР сприяє критичному і контекстно-зумовленому розумінню Цілей сталого розвитку, часто вимагає знаходження балансу між різними поглядами та пріоритетами, порушує питання про взаємозв’язки та протиріччя між різними Цілями сталого розвитку і, за допомогою цілісних і трансформаційних підходів, надає здобувачам освіти можливість орієнтуватися у необхідних компромісах.

3. ОСР сприяє мобілізації діяльності з досягнення Цілей сталого розвитку, зокрема – подальшій мобілізації діяльності із забезпечення сталого розвитку у навчальних середовищах, наприклад на місцях, за допомогою загальноінституційних підходів.

Розробники Програми переконані, що для переходу до сталого майбутнього необхідно переосмислити та зорієнтувати освітню систему на розвиток знань, навичок, цінностей і поведінкових установок, які дозволять молодому поколінню приймати обґрунтовані рішення, здійснювати індивідуальні та колективні дії для вирішення місцевих, національних і

глобальних невідкладних проблем, а також необхідно вчитися приймати обґрунтовані рішення та відповідально діяти в інтересах збереження цілісності навколишнього середовища, забезпечення економічної рентабельності та дотримання принципів справедливого суспільства на благо живих і майбутніх поколінь при повазі культурного розмаїття. Програму визнано ключовим фактором, що сприяє досягненню всіх Цілей сталого розвитку шляхом перетворення суспільства.

Як бачимо з рисунка 1, Програма передбачає навчання протягом усього життя, являючись невід'ємним компонентом якісної освіти, який покращує когнітивні, соціальні, емоційні та поведінкові аспекти навчання, відрізняється цілісним і спрямованим на перетворення підходом, що охоплює зміст навчальних програм, результати навчання, використовувані методи викладання та освітнє середовище. Так як Програма орієнтована на сталий розвиток, вона передбачає перетворення суспільства у відповідності до Цілей сталого розвитку, що, у свою чергу, вимагає оновлення навчальних програм: включення в усі види навчальних програм питань забезпечення сталого розвитку, зокрема тих, що закріплені у 17ти Цілях сталого розвитку. Здійснення перетворення всіх аспектів навчального середовища передбачається за допомогою загальноінституційного підходу до ОСР, щоб дати учням можливість жити тим, чого вони навчаються, і вчитися тому, чим вони живуть, а також з застосування інтерактивних, практично направлених та орієнтованих на інтереси здобувачів освіти методів викладання. В результаті навчання здобувачі отримають здатність брати на себе відповідальність за життя нинішнього та майбутніх поколінь, а також активну участь у перетворенні суспільства.



Рис. 1. Логічна структура Програми «Освіта для сталого розвитку»
на шляху до досягнення Цілей сталого розвитку» ЮНЕСКО

Недавнє дослідження ЮНЕСКО, в рамках якого розглядалися директивні документи десяти країн, показує, що Програма в основному асоціюється з викладанням наукових знань про навколишнє середовище. Проте цього недостатньо, щоб перетворювальна сила освіти проявилася повною мірою. Освіта повинна трансформуватися повністю, всеціло орієнтуватися на сталий розвиток, як синонім до суспільного добробуту. Тотальна інтеграція концепції сталого розвитку в освіту усіх рівнів дозволить досягнути наступних результатів:

- забезпечити здатність людей розуміти проблеми сталого розвитку, усвідомлювати їх актуальність для навколишньої дійсності і вживати заходів для досягнення змін;
- ініціювати структурні перетворення в сучасних економічних і соціальних системах шляхом просування альтернативних ідеалів і методів, адаптованих до існуючих умов;
- використовувати нові можливості та усувати ризики для сталого розвитку, що виникають у зв'язку з появою нових технологій.

Основна увага Програми зосереджена на здійсненні великих перетворень, необхідних для сталого розвитку, і забезпеченні відповідних освітніх заходів. Свої головні акценти Програма робить на наступному:

✓Перетворювальна діяльність. Фундаментальні зміни, необхідні для побудови стійкого майбутнього, починаються з окремих людей. У рамках Програми акцент повинен робитися на тому, щоб кожен здобувач освіти вживав перетворюючих заходів для забезпечення сталого розвитку. Особливу важливість мають можливості для ознайомлення учнів з реаліями життя і тим, як вони самі можуть впливати на хід процесів перетворення суспільства в напрямку досягнення сталого майбутнього. Реалізація Програми по суті передбачає формування активної громадянської позиції.

✓Структурні зміни. В рамках Програми слід приділяти увагу глибоким структурним причинам нестійкого розвитку. Необхідно знайти баланс між економічним зростанням і сталим розвитком, для чого Програма має спонукати здобувачів освіти до дослідження альтернативних цінностей для споживачів, а також формувати структурну точку зору щодо забезпечення сталого розвитку в умовах крайньої бідності та соціальної незахищеності.

✓Технологічне майбутнє. Програма має реагувати на можливості та виклики, що виникають у зв'язку з науково-технічним прогресом. За допомогою технологій будуть вирішені деякі «старі» проблеми, але виникатимуть нові труднощі та ризики. Критичне мислення та цінності сталого розвитку стають дедалі актуальнішими, так як і завдання формування ОСР може стати більш складним через ілюзію, що технології можуть вирішити більшість проблем сталого розвитку.

Слід зазначити, що реалізація Програми вимагає залучення органів влади усіх рівнів, а також розробки та реалізації відповідної політики соціально-економічного розвитку держави. Необхідним є реформа сфери навчання, підвищення професійного рівня педагогічних працівників, розширення прав та можливостей для молоді, постійний моніторинг прогресу у формуванні ОСР. Важливо залучити всі зацікавлені сторони. З огляду на багатогранний характер Програми рекомендується мобілізувати і надавати підтримку різним зацікавленим сторонам у рамках скоординованої стратегії. Такий формат

багатостороннього взаємодії актуальний на місцевому, національному, регіональному та глобальному рівнях для забезпечення партнерства та співпраці між усіма зацікавленими сторонами. Ключовим моментом у даному випадку виступає здійснення інформаційно-пропагандистської роботи, в контексті чого важливо звернутися до широкої громадськості за допомогою в організації активних інформаційно-просвітницьких і пропагандистських заходів.

Передбачається, що через 10 років реалізації Програми уряди країн забезпечать впровадження принципів освіти сталого розвитку у національні стратегії соціально-економічного розвитку з метою трансформації системи освіти; здобувачі освіти з усіх верств суспільства в усьому світі матимуть можливість набути знання, навички, ціннісні орієнтири та поведінкові настанови, необхідні для сприяння сталому розвитку та досягнення 17-ти Цілей сталого розвитку, а також скористатися досягненнями сталого розвитку на практиці завдяки загальноінституційному підходу до формування ОСР; населення міст і регіонів по всьому світу мають побачити у принципах ОСР найважливіший інструмент і можливість навчання протягом усього життя в інтересах забезпечення сталого розвитку на місцевому рівні; викладачі у всьому світі зможуть підвищувати свою кваліфікацію з метою сприяння перетворенню суспільства в інтересах стійкого майбутнього. Навчальні заклади для підготовки педагогічних працівників на систематичній основі впроваджуватимуть принципи ОСР; молодь розвиватиметься і міцнішатиме, стане рушійною силою змін, а молодіжні організації на систематичній основі проводитимуть навчання молоді та підготовку інструкторів з ОСР серед молоді.

Для досягнення очікуваних результатів Програма «Освіта для сталого розвитку: на шляху до досягнення Цілей сталого розвитку» передбачає кілька пріоритетних областей діяльності, до яких належать:

1. Підтримка на рівні політики.
2. Реформа системи освіти.
3. Підвищення кваліфікації педагогічних працівників.

4. Розширення прав і можливостей молоді та мобілізація їх зусиль.
5. Прискорення процесу вживання заходів на місцевому рівні.

Розглянемо перелічені нами вище пріоритетні області діяльності Програми, як її основні стратегічні цільові орієнтири, детальніше.

1. Підтримка на рівні політики відіграє важливу роль у створенні сприятливого середовища для успішного широкого впровадження принципів ОСР в навчальних закладах, серед населення та інших місцях, де відбувається навчання. Підтримка на рівні політики однаково важлива для сфер формальної та неформальної освіти, а також для створення синергії між цими сферами. Більше того, проведення політики на підтримку освіти сталого розвитку стосується не лише сектору освіти, а й усіх інших сфер діяльності, залучених до процесів сталого розвитку.

Основними суб'єктами підтримки освіти сталого розвитку в області політики виступають директивні органи в галузі освіти на інституційному, місцевому, національному, регіональному та глобальному рівнях, зокрема, міністерства освіти; директивні органи у сфері сталого розвитку, наприклад, міністерства з охорони навколишнього середовища та ін.; організації громадянського суспільства, приватні компанії та наукові кола, які роблять внесок в обговорення заходів політики у сфері сталого розвитку та освіти; ЮНЕСКО та її партнери.

Програма рекомендує міністерствам освіти переглянути цілі своїх систем освіти у світлі Цілей сталого розвитку, у відповідності до яких і визначати програмні результати навчання. Директивні органи у сфері освіти на місцевому, національному, регіональному та глобальному рівнях мають інтегрувати концепцію ОСР в освітню політику, у тому числі щодо освітнього середовища, програм навчання, підготовки викладачів, а також методів оцінювання здобувачів освіти.

Директивні органи в галузі освіти мають закріпити принципи освіти сталого розвитку в критеріях оцінки якості освіти, щоб забезпечити моніторинг та оцінку прогресу навчальних закладів щодо розвитку ними потенціалу

здобувачів освіти як рушійної сили змін, а також у співпраці з іншими міністерствами, організаціями громадянського суспільства, приватними компаніями та науковими колами повинні розробити стратегію систематичного зміцнення синергетичних зв'язків між сферами формальної та неформальної освіти.

Крім того, директивним органам у сфері сталого розвитку слід інтегрувати принципи ОСР у всі політичні заходи, які прямо спрямовані на досягнення Цілей сталого розвитку, у співпраці з директивними органами в галузі освіти, організаціями громадянського суспільства, приватними компаніями та науковими колами.

З метою підтримки цих заходів ЮНЕСКО та її партнери ООН, окрім іншого, розробили програму підтримки ініціатив країн за Програмою «Освіта для сталого розвитку на період до 2030 року» в частині інтеграції концепції освіти сталого розвитку у заходи політики в галузі освіти та сталого розвитку, сприяння багатосторонній міжсекторальній та міжурядовій партнерській взаємодії за допомогою глобальної платформи для директивних органів, а також пропаганди ОСР на глобальному рівні разом з партнерами по ООН.

2. Реформа системи освіти покликана спонукати здобувачів освіти стати рушійною силою змін, що володіє знаннями, засобами, готовністю та мужністю для здійснення перетворень на користь сталого розвитку.

Уся сфера навчання має бути приведена у відповідність до принципів сталого розвитку, щоб зміст освітніх програм та методи викладання підкріплювалися тим, як здійснюється управління навчальними закладами та як приймаються рішення в них. Такий загальноінституційний підхід до освіти сталого розвитку вимагає створення таких умов навчання, в яких учні навчаються того, чим вони живуть, і живуть тим, чого вони навчаються.

До основних суб'єктів реформування системи освіти відносяться керівники навчальних закладів, включаючи директорів шкіл, президентів та ректорів університетів і коледжів, керівників центрів підготовки педагогічного персоналу у приватних компаніях; викладачі, учні та адміністративний

персонал навчальних закладів; лідери місцевих спільнот, суб'єкти неурядового та приватного сектору, які здійснюють діяльність на користь сталого розвитку; директивні органи освіти; ЮНЕСКО та її партнери.

Керівники навчальних закладів, включаючи директорів шкіл, президентів та ректорів університетів і коледжів, керівників центрів підготовки педагогічного персоналу в приватних компаніях мають розробити конкретні, з чіткими термінами реалізації плани щодо впровадження загальноінституційного підходу до розвитку ОСР спільно з представниками різних груп своїх установ та місцевою громадянською.

Керівники навчальних закладів мають переконатися, що адміністративна система та культура навчальних закладів відповідають принципам сталого розвитку. Одним із можливих заходів є забезпечення демократичних процесів прийняття рішень «знизу-вгору», за яких усі представники різних груп навчального закладу та інші зацікавлені сторони можуть висловитися щодо конкретних проблем сталого розвитку, які потребують вирішення в рамках навчального закладу. Необхідно докласти зусиль до того, щоб культура установ була спрямована на забезпечення співпраці, досягнення солідарності та залучення людей різної статі та походження.

Адміністративний персонал навчальних закладів повинен докладати всіх зусиль до того, щоб самі установи та їх робота втілювали принципи сталого розвитку. Прикладами такого ставлення можуть бути: будівлі з низьким споживанням енергії, використання персоналом та учнями стійких та безпечних видів транспорту, закупівля екологічно чистих продуктів місцевого виробництва та проведення аудитів щодо відповідності принципам сталого розвитку.

Викладачі, учні та адміністративний персонал повинні співпрацювати з місцевими лідерами, сім'ями, а також неурядовими та приватними організаціями, що діють на користь сталого розвитку, у залученні місцевої громадянськості в якості цінного середовища для реалізації принципів

міждисциплінарного проектного навчання та вжиття заходів на користь сталого розвитку.

Директивні органи в галузі освіти мають створювати сприятливі умови для інтеграції загальноінституційного підходу до формування ОСР освітніми установами: визначити освіту сталого розвитку як основний пріоритет, надати більшій гнучкості, сприяти співпраці та відображати критерії загальноінституційного підходу до організації ОСР у процесах оцінки діяльності навчальних закладів.

З метою підтримки таких заходів ЮНЕСКО та її партнери в ООН докладають цілеспрямованих зусиль щодо розробки та розповсюдження покрокових методичних посібників про впровадження загальноінституційних підходів до формування ОСР, а також створення глобальної платформи для відповідних зацікавлених сторін з метою забезпечення обміну інформацією, досвідом та налагодження партнерських відносин, зокрема через такі глобальні мережі, як Мережа асоційованих шкіл ЮНЕСКО («ASPnet»), центри ЮНЕСКО ЮНЕВОК та кафедри ЮНЕСКО.

3. Підвищення кваліфікації педагогічних працівників. Поскільки, викладачі всіх освітніх середовищ можуть допомогти учням осмислити складний вибір, якого вимагає необхідність сталого розвитку, і спонукати їх до перетворення себе та суспільства, спрямовувати учнів та розширювати їхні права та можливості, необхідно спочатку наділити такими знаннями самих викладачів, навчити дотримуватися ціннісних орієнтирів та моделей поведінки, які необхідні для здійснення такого переходу. Сюди входить розуміння ключових аспектів кожної з 17-ти Цілей сталого розвитку та їх взаємозв'язку, а також уміння застосовувати відповідні методи, що найкращим чином сприятиме ефективному засвоєнню знань здобувачами освіти.

Керівники та співробітники педагогічних навчальних закладів мають передбачати систематичний та всебічний розвиток потенціалу щодо ОСР у програмах базової підготовки, підвищення кваліфікації та атестації викладачів сфер дошкільної, початкової, середньої та вищої освіти, включаючи

освіту дорослих. Важливо привести у відповідність до кожної з Цілей сталого розвитку зміст навчальних матеріалів, а також розробити відповідні ефективні методики викладання перетворювального характеру. Викладачі повинні бути наставниками, які направляють учнів у процесі перетворень, а також спеціалістами, які створюють і передають знання на користь стійкого майбутнього, вони мають використовувати інноваційні педагогічні методи, щоб допомогти учням стати рушійною силою змін.

Фахівці з підготовки викладачів мають систематично надавати можливості для навчання за принципом «рівний – рівному», в ході якого педагоги-першопрохідці зможуть поділитися своїми успіхами та невдачами і тим самим продемонструвати, що, незважаючи на амбітність цілі, принципи ОСР можна крок за кроком впроваджувати у повсякденну практику викладання.

У свою чергу, директивним органам слід створювати умови, мотивувати та заохочувати педагогічних працівників, які успішно інтегрують принципи ОСР у викладання, щоб зробити освіту більш актуальною до вимог сучасного світу. Це може бути зроблено, наприклад, шляхом стимулювання та визнання ініціатив щодо ОСР в рамках інституційного аналізу якості освіти.

4. Розширення прав і можливостей молоді та мобілізація їх зусиль.

Адже саме сьогоднішній молоді та наступним поколінням доведеться зіткнутися з наслідками несталого розвитку. Саме їхнє сьогодення та майбутнє поставлено на карту. У свою чергу, саме молоді люди стають все активнішими та діяльнішими, вимагаючи термінових та рішучих змін, покладаючи на світових лідерів відповідальність, зокрема, за подолання кліматичної кризи. Вони пропонують найкреативніші та винахідливі рішення проблем сталого розвитку. Крім того, молоді люди є важливою групою споживачів, і те, як розвиватимуться їх моделі споживання, вплине на траєкторію сталого розвитку їхніх країн.

Молодь у всьому світі, яка є як бенефіціарами, так і рушійною силою цієї пріоритетної галузі діяльності, творчим та активним носієм передових

соціальних ідей, а також підприємцями, які здатні очолити процес змін на користь стійкого майбутнього. Молоді люди можуть використовувати онлайн спільноти та інші канали для передачі ідеї про невідкладний характер проблем сталого розвитку, виступати за впровадження принципів сталого розвитку у рідне їм освітнє середовище, самі розширювати свої можливості і вживати конкретних дій заради суспільних перетворень.

Молодіжні та орієнтовані на молодь групи, організації та мережі повинні створювати можливості для взаємопідтримки та взаємодопомоги серед молодих людей за допомогою орієнтованих на перетворення знань, навичок, ідеалів та поведінкових установок. Сюди входять навички ведення інформаційно-пропагандистської роботи та відстоювання інтересів молоді, а також донесення до політичних кіл та інших груп населення розуміння невідкладної необхідності сталого розвитку.

Директивні органи та співробітники державних та приватних установ мають визнати молодь основними учасниками та суб'єктами всіх заходів, спрямованих на досягнення стійкого розвитку. Зокрема, молодь має бути повноправним учасником процесів розробки, реалізації та моніторингу стратегій та програм у галузі освіти та сталого розвитку. Одним із способів досягнення цієї мети є надання представникам молоді гарантованих місць у директивних органах установ усіх рівнів.

5. Прискорення процесу вживання заходів на місцевому рівні. Значні перетворення на користь сталого розвитку, швидше за все, відбуватимуться на місцях. Саме в повсякденному житті на місцевому рівні учні та звичайні люди роблять свій вибір на користь сталого розвитку та діють відповідно.

Крім того, саме у своєму оточенні люди знаходять партнерів по діяльності у сфері сталого розвитку. Тому, необхідно розвивати активну співпрацю між навчальними закладами та місцевою громадськістю, щоб забезпечити застосування новітніх знань та практики сталого розвитку для просування місцевого порядку денного.

Місцеві органи влади, включаючи муніципальні органи, міські ради та управління освіти, у координації з усіма місцевими зацікавленими сторонами повинні розробити план дій по тому, як всій місцевій громаді стати навчальною лабораторією в галузі стійкого розвитку та важливим компонентом місцевих ініціатив за Програмою.

Місцеві органи влади в координації з усіма зацікавленими сторонами, включаючи громадські організації, приватні компанії та місцеві ЗМІ, повинні забезпечити підвищення кваліфікації місцевих керівників та авторитетних громадських діячів, а також розкривати та конкретизувати цілі сталого розвитку для широкого загалу, щоб чітко розуміти конкретні наслідки їх реалізації на місцях.

Мова йде про неформальну освіту у повсякденному житті, наприклад, створення інфраструктури, необхідної для безпечного використання громадського транспорту, та максимальне поширення на місцевих каналах інформації про процеси сталого розвитку, що відбуваються.

Місцеві освітні установи у сфері формальної та неформальної освіти повинні координувати свої програми таким чином, щоб у сукупності вони сприяли узгодженому вирішенню завдань усіх цілей сталого розвитку і пов'язаних з ними проблем сталого розвитку на місцевому рівні.

Директивні органи національного рівня мають заохочувати та підтримувати зусилля на місцях та координувати їх у рамках загальнонаціональних заходів за Програмою. Сюди входить стимулювання місцевих органів влади до інтеграції принципів сталого розвитку у навчальні програми, а також впровадження концепції цілей сталого розвитку у систему навчання протягом усього життя.

Все місцеве населення має активно цікавитися ключовими проблемами сталого розвитку, мати змогу розвивати навички порівняння різних сценаріїв майбутнього для свого співтовариства, приймати ідеали та погляди, що сприяють більш стійкому майбутньому, брати участь у процесах прийняття громадських рішень і робити конкретні дії як відповідальні члени суспільства.

Важливо зазначити, що при здійсненні заходів у пріоритетних сферах діяльності державам-членам пропонується мобілізувати різні зацікавлені сторони, зайняті в усіх п'яти сферах, і підтримати їх співробітництво в рамках скоординованої стратегії, пов'язаної з національною стратегією щодо цілей сталого розвитку. Крім цього, слід робити більш конкретні зусилля з розробки інформаційно-роз'яснювальних та пропагандистських заходів з метою забезпечення моніторингу цілей сталого розвитку у практичній роботі та стратегіях у галузі освіти. На підтримку здійснення Програми на державному рівні можуть бути розроблені загальнонаціональні багатосторонні ініціативи.

Висновки

Україна, яка завжди була активним учасником міжнародних економічних відносин, а сьогодні стала лідером на тлі світового політикуму, очоливши боротьбу цивілізованого світу за демократичні цінності, має активно переймати сучасні тенденції світової економіки задля швидкого економічного відновлення, посилення своєї конкурентоспроможності, забезпечення авторитету у міжнародному бізнес середовищі, підвищення рівня життя населення країни. Освіта вільної потужної нації має відповідати найкращим зразкам у відповідності до глобальної концепції сталого розвитку та вимог сьогодення. Відштовхуючись від концептуальних ідей сталого розвитку, можна стверджувати, що його мета: краща якість життя для кожного тепер і для поколінь, що приходять, співпадає з образом правової держави, якою прагне стати Україна.

ОСР дозволить нашій державі стати на рейки інноваційного розвитку, подолати наслідки екоциду після варварської російської навали, зменшити вплив антропогенного фактора на навколишнє середовище, збільшити розрив між економічним зростанням та екологічною шкодою, зберегти нашу планету для наступних поколінь. Адаптація до механізмів, способів та засобів екологізації освіти провідних економік світу дозволить в найближчі строки здійснити відповідні реформи для переходу до ОСР.

Крім того, ОСР поглибить ментальну прірву між українською нацією та нашим сусідом-терористом, культивуватиме емпатію, моральні цінності, інтелект, культурну поведінку, національну свідомість та патріотизм, ставши невидимою зброєю проти ворога, яка передаватиметься з покоління в покоління українців як найміцніший обладунок.

Список літератури:

- Borgonovi, F., Brussino, O., Seitz, H., & Wildi, S. (2022). How can education systems advance the green transition? *OECD Education and Skills Today*. September 6. URL: <https://oecdeditoday.com/education-green-transition-skills/>
- Council of the European Union. (2022). *Резюме: Proposal for a Council recommendation on learning for the green transition and sustainable development*. URL: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-9242-2022-INIT/en/pdf>.
- Fassbinder, S. D. (2012). Greening Education. *Greening the Academy. Ecopedagogy. Through the Liberal Arts*, 1-22. Sense Publishers. URL: link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-6209-101-6_1#citeas.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., Behrens, W. W. (1972). *The Limits to Growth. A report for the club of Rome's project on the predicament of mankind*. New York : Universe Books. URL: <https://donellameadows.org/wp-content/userfiles/Limits-to-Growth-digital-scan-version.pdf>.

- Michelsen, G., and Wells, P. J. (Eds). (2017). *A Decade of Progress on Education for Sustainable Development: Reflections from the UNESCO Chairs Programme*. URL: <http://unesdoc.unesco.org/images/0025/002523/252319e.pdf>.
- ООН Україна. Офіційний сайт. (б.д.). *Ресурс: Наша робота над досягненням Цілей сталого розвитку в Україні*. URL: <https://ukraine.un.org/uk/sdgs>.
- Sachs, J. D., Kroll, C., Lafortune, G., Fuller, G., and Woelm, F. (2021). *Sustainable development report. Includes the SDG Index and Dashboards. The Decade of Action for the Sustainable Development Goals*. University Printing House, Cambridge CB2 8BS, United Kingdom. URL: <https://s3.amazonaws.com/sustainabledevelopment.report/2021/2021-sustainable-development-report.pdf>.
- Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. (2015). A/RES/70/1. United Nations. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>.
- UNESCO Education Sector. (2002). *Ресурс: UNESCO. Education for Sustainability – From Rio to Johannesburg: Lessons learnt from a decade of commitment*.
- UNESCO Education Sector. (2017). *Ресурс: Education for Sustainable Development Goals: Learning Objectives*. URL: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002474/247444e.pdf>.
- UNESCO. (2020). *Ресурс: Education for Sustainable Development: A Roadmap*. URL: <https://www.unesco.org/en/education/sustainable-development>.
- Анісімова, Г. В., та Донець, О. В. (2016, травень). Екологізація вищої освіти як пріоритетний напрям державної екологічної політики: сучасні організаційно-правові аспекти. *Безпекове інноваційне суспільство: взаємодія у сфері правової освіти та правового виховання*. URL: <http://conf.nlu.edu.ua/bis-2016/paper/viewFile/3957/641>.
- Дубович, І. А. (2006). Особливості та перспективи екологізації освіти та екологічного виховання населення України. *Науковий вісник НЛТУ України*, 16.5, 244-248.

- Ісаєнко, В., та ін. (2016). Методичні матеріали для впровадження освітнього модуля «Основи стратегії сталого розвитку в Україні». *Програма розвитку ООН в Україні всеукраїнська дитяча спілка «Екологічна варта»*. URL: https://www.sd4ua.org/wp-content/uploads/2015/02/metod_materialy_do_modulyu.pdf.
- Крисаченко, В., та Хилько, М. (2002). *Екологія. Культура. Політика: концептуальні засади сучасного розвитку*. К.: Знання України.
- Лук'янова, Л. (2012). Проблема екологізації освіти в сучасному науковому дискурсі. *Імідж. Точка зору*, 2, 8-11. URL: <https://lib.iitta.gov.ua/8228/1/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B0%20%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%97%20%D0%BE%D1%81%D0%B2%D1%96%D1%82%D0%B8.pdf>.
- Мелаш, В., Гнатів, О., та Варениченко, А. (2014). Екологізація системи освіти майбутніх фахівців. *Науковий вісник Мелітопольського державного педагогічного університету. Серія : Педагогіка*, 2(13), 170-174.
- Офіційний сайт. (б.д.). Ресурс: *Партнерська мережа «Освіта в інтересах сталого розвитку в Україні»*. URL: <http://www.ecoosvita.org.ua/>
- Платформа організацій громадянського суспільства в Україні. (б.д.). Ресурс: *Освіта для сталого розвитку. Процес «Довкілля для Європи»*. URL: <http://efe.org.ua/tema/osvita-dlya-stalogo-rozvytku>.
- Процес Довкілля для Європи. (2003). Ресурс: *Заява Міністрів охорони довкілля країн ЄЕК ООН про освіту в інтересах сталого розвитку*.
- Рішення колегії МОНУ № 13/6-19 від 20.12.2001. (2001). Ресурс: *Про концепцію екологічної освіти в Україні: Закон України*. URL: https://zakononline.com.ua/documents/show/441315___441380.
- Стецула, Н. (2020). Екологізація освіти як ключова тенденція сталого розвитку суспільства. *Молодь і ринок*, 6-7(185-186), 115-121. URL: <http://mir.dspu.edu.ua/article/view/225780>.

Туниця, Ю. Ю., Лиско, Л. Р., Загвойська, Л. Д., та Соловій, І. П. (2019). Сталий університет: модель системної інтеграції принципів сталого розвитку в усі сфери діяльності. *Науковий вісник НЛТУ України*, 29(10).54-60. URL: https://www.researchgate.net/publication/340007327_Stalij_universitet_model_sistemnoi_integracii_principiv_stalogo_rozvitku_v_usi_sferi_dialnosti/fulltext/5e731df792851c93e0ad5f25/Stalij-universitet-model-sistemnoi-integracii-principiv-stalogo-rozvitku-v-usi-sferi-dialnosti.pdf.

Указ Президента України. м. Київ 25 червня 2013 року № 344/2013. (2013).

Ресурс: Про Національну стратегію розвитку освіти в Україні на період до 2021 року. URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/344/2013#Text>.

Наукове видання

**СТАЛИЙ РОЗВИТОК:
ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.
ЕНЕРГООЩАДНІСТЬ.
ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ.**

Колективна монографія

Головний редактор Online-видання

Науковий редактор Online-видання

Відповідальна за випуск

Дизайн та оформлення Online-видання

Яніна Яроченко

Мирослав Мальований

Наталія Вронська

Ліє Гудзик

Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування : колективна монографія / [авт. кол. : Мадані М. М., Крутоголова І. О., Андрєєва Н. М. та ін.] / за ред. проф. Мальованого М. С. – Київ : Яроченко Я. В., 2022 – 566 с. : рис., таблиці / Online-видання.



Видавець: ФО-П Яроченко Яніна Володимирівна

Україна, 04213, м. Київ, а/с 4. Тел. (093) 923-1410

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК 6692 від 21.03.2019

lie.gudzyk@gmail.com / Lie Gudzyk Studio® / <https://liegudzyk.com/online-publishing>

