

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет  
будівництва і архітектури

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут телекомунікацій  
і глобального інформаційного простору

# Екологічна безпека та природокористування

---

Environmental safety and natural resources

Збірник наукових праць

ВИПУСК 40

2021

**Міністерство освіти і науки України  
Київський національний університет будівництва і архітектури  
Національна академія наук України  
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору**

---

**Ministry of Education and Science of Ukraine  
Kyiv National University of Construction and Architecture  
National Academy of Sciences of Ukraine  
Institute of Telecommunications and Global Information Space**

**ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА  
ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

---

**ENVIRONMENTAL SAFETY AND  
NATURAL RESOURCES**

**Збірник наукових праць**

Випуск 4 (40), жовтень-грудень 2021 р.

Заснований у 2008 р.  
Виходить 4 рази на рік

---

**Academic journal**

Issue 4 (40), October-December 2021

Founded in 2008  
The journal is published 4 volume a year

**КИЇВ 2021**

---

**KYIV 2021**

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

**Головний редактор: О.М. Трофимчук**, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАНУ  
**Заступник головного редактора: О.С. Волошкіна**, д-р техн. наук, проф.

### Члени редколегії:

**Биченок М.М.**, д-р техн. наук  
**Бойко І.П.**, д-р техн. наук, проф.  
**Довгий С.О.**, д-р фіз.-мат. наук, проф., академік НАНУ  
**Калюх Ю.І.**, д-р техн. наук, проф.  
**Качинський А.Б.**, д-р техн. наук, проф.  
**Коржнів М.М.**, д-р геол.-мін. наук, проф.  
**Кочетов Г.М.**, д-р техн. наук, проф.  
**Кривомаз Т.І.**, д-р техн. наук, проф.

**Олійник О.Я.**, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАНУ  
**Павлишин В.І.**, д-р геол.-мін. наук, проф.  
**Приймак О.В.**, д-р техн. наук, проф.  
**Рудько Г.І.**, д-р техн. наук, д-р геол.-мін. наук, д-р геогр. наук, проф.  
**Триснюк В.М.**, д-р техн. наук  
**Яковлев Є.О.**, д-р техн. наук

## МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА

**М.-Й. Валері**, професор, Польща  
**Н. Касаглі**, професор, Італія  
**Н. Маргвєлашвілі**, PhD, Австралія  
**Д. Мінтер**, професор, Великобританія  
**А. Мішо**, дослідник, Франція

**М.Г. Мустафаєв**, д-р аграрних наук, член-кор. РАЕ, Азербайджан  
**Я. Пекутін**, професор, Польща  
**Пінг Лу**, професор, Китай  
**Г. Собчук**, професор, Польща

---

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Київського національного університету будівництва і архітектури  
(протокол № 46 від 20.12.2021 р.)

Збірник наукових праць включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія "Б"), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук за напрямом «технічні науки» (Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 № 886)

## ОСНОВНІ ТЕМАТИЧНІ РОЗДІЛИ ЗБІРНИКА

- Екологічна безпека
- Основи природокористування
- Інформаційні ресурси та системи
- Дискусійні повідомлення

---

**АДРЕСА РЕДАКЦІЇ**  
03186, м. Київ, Чоколівський бульв., 13,  
Інститут телекомунікацій і глобального  
інформаційного простору НАН України  
Телефони: (044) 245-87-97  
(044) 524-22-62  
E-mail: e.voloshki@gmail.com

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ № 14146-3117 Р від 27.05.2008 р.

Електронна версія збірника в Інтернеті  
<http://www.es-journal.in.ua> українською  
та англійською мовами



Creative Commons «Attribution» 4.0 WorldWide

## ЗМІСТ

### ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

**Довгий С.О., Копійка О.В., Козлов О.С.**

Синтез інформаційно-телекомунікаційних мереж автоматизованих систем екологічної безпеки з метою отримання найбільшої завадостійкості при заданій ефективності..... 5

**Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Новікова Ю.П., Петров А.І.**

Шляхи утилізації застарілих мулових відкладень на паливо..... 21

**Кравченко М.В., Волошкіна О.С., Василенко Л.О.**

Застосування методу зворотного осмосу для доочистки питної води..... 32

**Глущенко Р.О., Ткаченко Т.М., Мілейковський В.О.**

Ефективне відведення дощової води з доріг дощовими садами-смугами у концепції міста-губки..... 46

### ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

**Басок Б.І., Гончарук С.М., Приємченко В.П., Лисенко О.М., Веремійчук Г.М.**

Дослідження теплотехнічних характеристик роботи побутового котла з механічним пелетним пальником..... 60

**Stefanyshyn D.V.**

Probability assessment of the Kyiv reservoir overflow..... 73

**Мокрий В.І., Петрушка І.М., Джумеля Е.А.**

Відновлення транскордонних українсько-польських техногенних територій Розточчя фітомеліоративними методами..... 100

**Сатін І.В., Панченко О.С.**

Удосконалення методології дослідження морфологічного складу побутових відходів з урахуванням стратифікації..... 110

### ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ ТА СИСТЕМИ

**Семко В.В., Семко О.В.**

Дослідження процесів функціонування обчислюваного середовища елементів бездротових сенсорних мереж..... 121

**Петроченко О.В., Петроченко В.І.**

Аналіз термінологічних визначень стихійних явищ, пов'язаних з підвищенням рівня води у водотоках та затопленням територій..... 139

**Ващенко В.М., Кордуба І.Б., Жукова О.Г.**

Технологічні та експлуатаційні особливості реакторів AP-1000 Покоління III+ та малих модульних реакторів MP-160..... 149

**ДО ВІДОМА АВТОРІВ..... 157**

## CONTENTS

### ENVIRONMENTAL SAFETY

<b>Dovgiy S.O., Kopyika O.V., Kozlov O.S.</b> Synthesis of information and telecommunication networks of automatized environmental security systems with the purpose of gaining maximum noise resistance with a given efficiency.....	5
<b>Sniezhkin Yu., Petrova Zh., Novikova Y., Petrov A.</b> Ways of disposal of objective fuel sediments for fuel.....	21
<b>Kravchenko M.V., Voloshkina O.S., Vasylenko L.O.</b> Application of the reverse osmosis method for the purification of drinking water	32
<b>Hlushchenko R.O., Tkachenko T.M., Mileikovskiy V.O.</b> Effective drainage of rainwater from roads by rain garden-strips in the concept of the city-sponge.....	46

### NATURAL RESOURCES

<b>Basok B.I., Goncharuk S.M., Priemchenko V.P., Lysenko O.M., Veremiichuk H.M.</b> Research of thermotechnical characteristics of domestic boiler with a mechanical pellet burner.....	60
<b>Stefanyshyn D.V.</b> Probability assessment of the Kyiv reservoir overflow.....	73
<b>Mokryi V., Petrushka I., Dzhumelia E.</b> Restoration of cross-border Ukrainian-Polish man-made territories of Roztochia by phytomeliorative methods.....	100
<b>Satin I.V., Panchenko O.S.</b> Improving the methodology for analyses of the morphological composition of municipal solid waste with stratification approach.....	110

### INFORMATION RESOURCES AND SYSTEMS

<b>Semko V.V., Semko O.V.</b> Research of functioning processes of wireless sensor networks.....	121
<b>Petrochenko O.V., Petrochenko V.I.</b> Analysis of terminological definitions of natural phenomena associated with rising water levels in watercourses and flooding.....	139
<b>Vashchenko V., Korduba I., Zhukova O.</b> Technological and operating features of the AR-1000 reactors Generation III <sup>+</sup> and small modular reactors MR-160.....	149
<b>INFORMATION FOR AUTHORS.....</b>	157

## ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ENVIRONMENTAL SAFETY

УДК 004.735

**Stanislav O. Dovgii**, Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, D. S. (Computer science), Professor, Director-organizer  
ORCID ID 0000-0003-1078-0162 *e-mail*: s.dovgii@gmail.com

**Oleh V. Kopyika**, D. S. (Computer science), Head of a department  
ORCID ID 0000-0003-0189-3915 *e-mail*: okopiyka@gmail.com

**Oleksii S. Kozlov**, Postgraduate student  
ORCID ID 0000-0003-1889-3153 *e-mail*: alexey.ua84@gmail.com

Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU, Kyiv, Ukraine

### SYNTHESIS OF INFORMATION AND TELECOMMUNICATION NETWORKS OF AUTOMATIZED ENVIRONMENTAL SECURITY SYSTEMS WITH THE PURPOSE OF GAINING MAXIMUM NOISE RESISTANCE WITH A GIVEN EFFICIENCY

***Abstract.** The article defines the system features, properties and characteristics of information and telecommunication networks of automated environmental safety systems: information reliability and proven efficiency as a fundamental characteristic of system perfection. The main task of this research is to standardize the highest level of information and telecommunications networks architecture that provide the creation, processing, storage, deletion and transportation of information. In this case, the architecture is considered as a single for: all types of networks (including network services): optical transport network, Internet network (data network), fixed telephone network, mobile network and all types of products, customers, services, resources, aspects of management. A very important requirement is that the system architecture should not change when changing the structure of products, market requirements or the structure of the company. Standardization of information systems architecture involves: defining a complete list of architecture components; determination of functional boundaries of components; definition of interfaces (protocols) of interaction of components. The main purpose of architecture standardization is: to reduce the implementation of telecommunications services by reducing the time for implementation and modernization of information systems, and increase the efficiency of implementation of information systems, as well as reduce costs for their creation and operation by: avoiding duplication of functions; use of open interfaces; repeated use of the same type of elements. The research concerns the structural synthesis of the architectures of four main telecommunication networks: transport, IP, mobile and fixed. Eight sets of network resources (levels) were selected to standardize each network*

architecture. Based on the results of the analysis, it is possible to draw a conclusion about the development potential of each network depending on the trends of modern telecommunications services. The telecommunication services means of production architecture, which include platforms of network resources and network services, is considered. The article proposes a methodological basis for the synthesis of information and communication technology systems in order to establish a single information platform, which is presented as a universal architecture of information and communication systems. The messaging service is considered in the context of: one workstation, one domain and interconnection between domains. The efficiency of information transmission systems is considered. When evaluating different communication systems, two indicators were taken into account: efficiency and noise immunity; their combination gives a fairly complete description of the system. The most perfect system is the one that provides the greatest efficiency at a given noise immunity or, conversely, the greatest noise immunity at a given efficiency.

**Keywords:** system architecture; IT-infrastructure; standardization and unification; telecommunication and IT field

**С.О. Довгий, О.В. Копійка, О.С. Козлов**

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України,  
м. Київ, Україна

## **СИНТЕЗ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ З МЕТОЮ ОТРИМАННЯ НАЙБІЛЬШОЇ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ПРИ ЗАДАНІЙ ЕФЕКТИВНОСТІ**

**Анотація.** В статті визначаються системні ознаки, властивості й характеристики інформаційно-телекомунікаційних мереж автоматизованих систем екологічної безпеки: інформаційна надійність та доведена ефективність, як фундаментальна характеристика досконалості системи. Основне завдання даних досліджень – це стандартизація вищого рівня архітектури інформаційно-телекомунікаційних мереж, що забезпечують створення, обробку, зберігання, видалення і транспортування інформації. При цьому, архітектура розглядається в якості єдиної для усіх типів мереж (включаючи мережеві послуги): оптична транспортна мережа, Інтернет мережа (мережа передачі даних), фіксована телефонна мережа, мережа мобільного зв'язку та усіх типів продуктів, клієнтів, послуг, ресурсів, аспектів управління. Дуже важливою вимогою є те, що архітектура систем не повинна змінюватися при зміні структури продуктів, вимог ринку або структури компанії. Стандартизація архітектури інформаційних систем передбачає: визначення повного переліку компонентів архітектури; визначення функціональних кордонів компонентів; визначення інтерфейсів (протоколів) взаємодії компонентів. Основною метою стандартизації архітектури є: скорочення термінів впровадження телекомунікаційних послуг, за рахунок зменшення часу на впровадження та модернізацію інформаційних систем, і підвищення ефективності впровадження інформаційних систем, а також зменшення витрат на їх створення і експлуатацію за рахунок: недопущення дублювання функцій; застосування відкритих інтерфейсів; багаторазового застосування однотипних елементів. Дослідження стосується структурного синтезу архітектур чотирьох основних телекомунікаційних мереж: транспортної, IP, мобільної та фіксованої. Для стандартизації кожної мережевої архітектури було обрано

вісім наборів мережевих ресурсів (рівнів). На основі результатів аналізу можна зробити висновок про потенціал розвитку кожної мережі залежно від тенденцій сучасних телекомунікаційних послуг. Розглянуто архітектуру засобів виробництва телекомунікаційних послуг, які включають платформи мережевих ресурсів та мережеві послуги. У статті запропоновано методологічну базу для синтезу систем інформаційних та комунікаційних технологій з метою створення єдиної інформаційної платформи, яка представлена як універсальна архітектура інформаційно-комунікаційних систем. Розглянуто сервіс обміну повідомлень в розрізі: одного АРМ, одного домену та інтерконекту між доменами. Розглянута ефективність систем передавання інформації. Оцінюючи різні системи зв'язку, враховували два показники: ефективність і завадостійкість; їх сукупність дає достатньо повну характеристику системи. Найбільш досконалою системою вважається така, яка забезпечує найбільшу ефективність при заданій завадостійкості або, навпаки, найбільшу завадостійкість при заданій ефективності.

**Ключові слова:** системна архітектура; ІТ-інфраструктура; стандартизація та уніфікація; телекомунікаційна та ІТ галузі

**DOI:** <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.5-20>

## Вступ

Автоматизація описує широкий спектр технологій, що зменшують втручання людини у процеси. Це досягається шляхом автоматизованого визначення критеріїв прийняття рішень, зв'язків між підпроцесами та відповідних дій, реалізованих у програмному забезпеченні [1–5]. Новим технологічним стрибком було переведення засобів автоматизації до Дата-центрів [6–11].

Дата-центри в Україні і світі почали розвиватися з 2000 року. Такий пізній період використання Дата-центрів обумовлений відставанням розвитку сучасної транспортної інфраструктури.

Першими клієнтами централізованої обробки, зберігання і розповсюдження інформації були підприємства галузі телекомунікацій, нафтової і газової сфер, банки та інші споживачі, які почали активно впроваджувати в свою діяльність інформаційні технології. З плином часу Дата-центри стали користуватися великою популярністю, і сьогодні спостерігається справжній «бум» їх будівництва. Тому, автоматизовані системи екологічної безпеки також стали використовувати ресурси Дата-центрів. Останнім часом основним фактором переходу до централізованого використання ІТ-ресурсів є поширення «хмарних» технологій.

При цьому виникає перспектива не тільки перенесення серверів в Дата-центри, а й модернізації всієї ІТ-інфраструктури в цілому.

Основне завдання даних досліджень – це стандартизація вищого рівня архітектури інформаційно-телекомунікаційних мереж (ІКМ) автоматизованих систем екологічної безпеки, що забезпечують створення, обробку, зберігання, видалення і транспортування інформації [12–16].

При цьому Архітектура ІКМ (надалі, Архітектура) розглядається в якості єдиної для:

– всіх типів мереж (включаючи мережеві послуги): оптичної транспортної мережі, Інтернет мережі (мережі передачі даних), фіксованої телефонної мережі, мережі мобільного зв'язку;



– всіх типів продуктів, клієнтів, послуг, ресурсів, аспектів управління компанією і бізнесом компанії.

Дуже важливою вимогою є те, що Архітектура систем не повинна змінюватися при зміні структури продуктів, вимог ринку або структури компанії.

Стандартизація архітектури інформаційних систем передбачає:

- визначення повного переліку компонентів архітектури;
- визначення функціональних кордонів компонентів;
- визначення інтерфейсів (протоколів) взаємодії компонентів.

Основною метою стандартизації архітектури є: скорочення термінів впровадження телекомунікаційних послуг, за рахунок зменшення часу на впровадження та модернізацію інформаційних систем, і підвищення ефективності впровадження інформаційних систем, а також зменшення витрат на їх створення і експлуатацію за рахунок:

- недопущення дублювання функцій;
- застосування відкритих інтерфейсів;
- багаторазового застосування однотипних елементів.

У процесі досліджень встановлюється відповідність Архітектури загальноприйнятим стандартам і концепціям в телекомунікаційній і ІТ областях (NGOSS, TM Forum eTOM, TAM, SID, SDF, ETSI TISPAN та ін.).

Всі інформаційні системи повинні відповідати на всіх етапах свого розвитку і експлуатації наступним критеріям:

- Всі нові системи (або їх частини) повинні співвідноситися з певним компонентом архітектури (тобто мати чітку відповідність функціональності) і мати певні відкриті інтерфейси (в першу чергу, функціональні).
- Всі існуючі системи (або їх частини) при необхідності розвитку функцій повинні модифікуватися відповідно до вимог до Архітектури, аналогічно новим.
- Існуючі системи, які не потребують функціонального розвитку, зобов'язані перейти на певні відкриті інтерфейси в разі наявності взаємодії з новими або модифікованими системами.

## **Платформа мережевих ресурсів**

Інформаційно-телекомунікаційні мережі (ІТМ) представлені у вигляді складної організаційно-технічної структури, що перебуває в динамічному стані та забезпечує вирішення завдання обробки інформації і надання послуги із заданою якістю [17, 18]. При передачі інформації із заданими показниками якості відбувається формування можливих маршрутів передачі інформації з використанням різних телекомунікаційних мереж. Вибір оптимального маршруту залежить від географічного місця знаходження клієнта та показників загальносистемного ефекту.

У нашому дослідженні ми розглядаємо чотири мережі: транспортну, ІР-мережу, мережі мобільного та фіксованого зв'язку [19, 20]. Для уніфікації архітектур для кожної мережі виділяємо вісім комплексів мережевих ресурсів (рівнів):

$Vp_{i1} = f(m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7, m_8)$ , де  $m_1$  – мережа клієнта;  $m_2$  – доступ;  $m_3$  – агрегація;  $m_4$  – край;  $m_5$  – ядро;  $m_6$  – обробка даних;  $m_7$  – обробка сигналізації;  $m_8$  – управління мережевими ресурсами.

Можливості платформи сучасних мережевих ресурсів однозначно визначають здатність створення мережевих послуг. Платформа мережевих ресурсів взаємодіє з платформою мережевих послуг виключно через рівень обробки сигналізації.

Всі системи платформи мережевих ресурсів оперують виключно сутністю Ресурс.

Функціональне призначення восьми комплексів (рівнів) платформи мережевих ресурсів можна представити наступним чином (рис. 1).

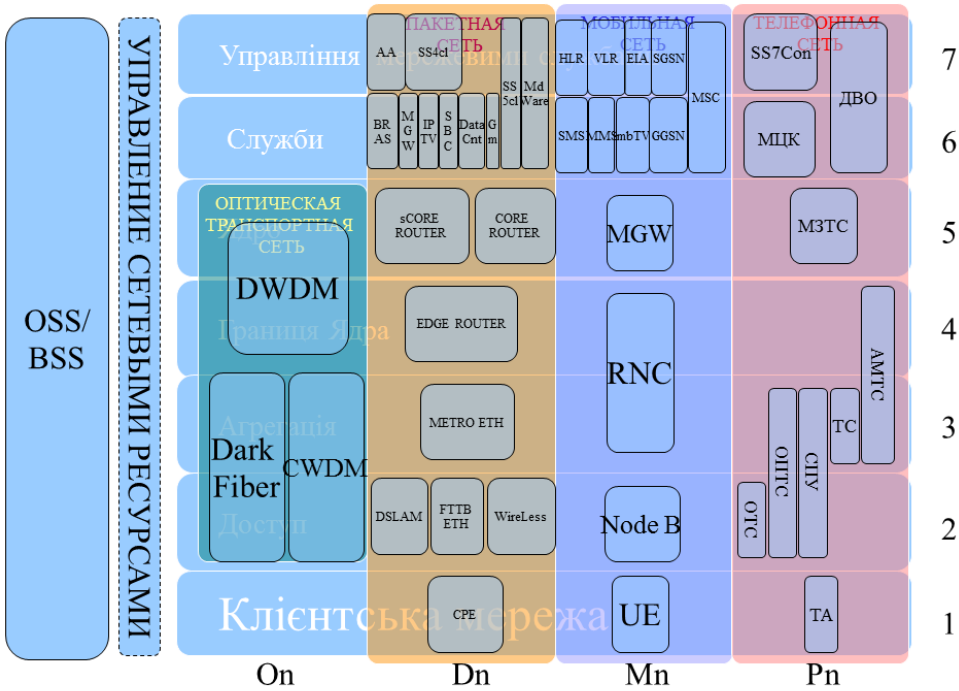


Рис. 1 – Рівні комплексів комунікаційної інфраструктури

Рівень мережі клієнта виконує наступні задачі:

- m<sub>11</sub> – введення–виведення інформації;
- m<sub>12</sub> – обробка даних;
- m<sub>13</sub> – підключення клієнтських терміналів;
- m<sub>14</sub> – транспортування трафіку від клієнтських терміналів з рівнем доступу.

Рівень доступу виконує наступні задачі:

- m<sub>21</sub> – підключення клієнтських мереж (у виродженому випадку – клієнтського термінала);
- m<sub>22</sub> – транспортування трафіку від мереж клієнтів до рівня агрегації.

Рівень агрегації виконує наступні задачі:

- m<sub>31</sub> – підключення вузлів доступу (оптичне, xDSL, бездротове);
- m<sub>32</sub> – транспортування трафіку від вузлів доступу до рівня краю.

Рівень край виконує наступні задачі:

- m<sub>41</sub> – підключення вузлів агрегації;
- m<sub>42</sub> – пропуск (із застосуванням політик) даних та сигналізації в мережу (RCEF, C-BGF);

$m_{43}$  – перекодування даних на переходах в інші мережі (T-MGF);  
 $m_{44}$  – транспортування трафіку від вузлів агрегації до рівня ядра або в інші мережі.

Рівень ядро виконує наступні задачі:

$m_{51}$  – підключення крайових маршрутизаторів (абонентського доступу, обробки даних, обробки сигналізації, з'єднань з операторами);

$m_{52}$  – транспортування трафіку між крайовими маршрутизаторами.

Рівень обробки даних виконує такі завдання:

$m_{61}$  – обробка клієнтських даних (MRFP).

Рівень обробки сигналізації виконує наступні задачі:

$m_{71}$  – управління клієнтськими запитами на обмін даними (AGCF, P-CSCF, A-RACF, SPDF);

$m_{72}$  – управління запитами на обробку клієнтських даних (MRFC);

$m_{73}$  – управління запитами на обмін даними з іншими мережами (BGCF, MGCF, SGF);

$m_{74}$  – забезпечення обробки в т.ч. маршрутизація всіх запитів (I / S-CSCF).

Рівень управління мережевими ресурсами виконує завдання взаємодії із системами OSS.

Можливості платформи мережеских ресурсів однозначно визначають здатність створення мережеских послуг.

Платформа мережеских ресурсів не включає сервери додатків, управління обліковими записами та ін. Даний функціонал забезпечує платформа мережеских послуг. Платформа мережеских ресурсів взаємодіє з платформою мережеских послуг виключно через рівень обробки сигналізації. Платформа мережеских ресурсів взаємодіє з платформою автоматизації виробничої діяльності через рівень управління мережевими ресурсами і рівень обробки сигналізації.

## Платформа мережеских послуг

Дуже важливим елементом Архітектури, особливо в разі надання мультисервісних послуг, є платформа мережеских послуг. Основні завдання цієї платформи: скорочення термінів впровадження послуг в компанії, за рахунок зменшення часу на впровадження і модернізацію продуктів, і підвищення ефективності впровадження продуктів, а також зменшення витрат на їх створення і експлуатацію за рахунок: недопущення дублювання функцій; застосування відкритих інтерфейсів; багаторазового застосування однотипних елементів.

Платформа мережеских послуг  $Vp_{2i}$  складається з шести комплексів (рівнів) (рис. 2):  $Vp_{2i} = f(p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8)$ , де

$p_1$  – абстракція мережеских ресурсів;

$p_2$  – внутрішні інтерфейси мережеских послуг;

$p_3$  – логіка мережеских послуг;

$p_4$  – зовнішні інтерфейси мережеских послуг;

$p_5$  – загальні функції мережеских послуг;

$p_6$  – управління мережевими послугами.

Рівень абстракції мережеских ресурсів включає в себе мережескі адаптери (мережескі активатори низького рівня, щоб забезпечити доступ до відповідних мережеских елементів і мережеских можливостей). Рівень абстракції мережеских

ресурсів являє собою шар абстракції мережі. Оперує сутністю «технологічна операція».

Рівень внутрішніх інтерфейсів мережевих послуг абстрагує для рівня, який розташований вище, сервісні можливості мережі. Оперує сутністю «компонента мережевої послуги». Прикладом інтерфейсів цього рівня є набір OSA / Parlay API.

Рівень логіки мережевих послуг абстрагує для рівня, який розташований вище, засоби реалізації послуг в серверах додатків. На цьому рівні, по суті, з'являється закінчена мережева послуга, яка сама по собі має споживчу цінність або може бути включена до складу іншої послуги. Мережева послуга може входити до складу продуктів компанії або може бути виставлена як зовнішній продукт (аутсорсінг) і включена до складу продуктів третіх компаній. Оперує сутністю «мережева послуга».

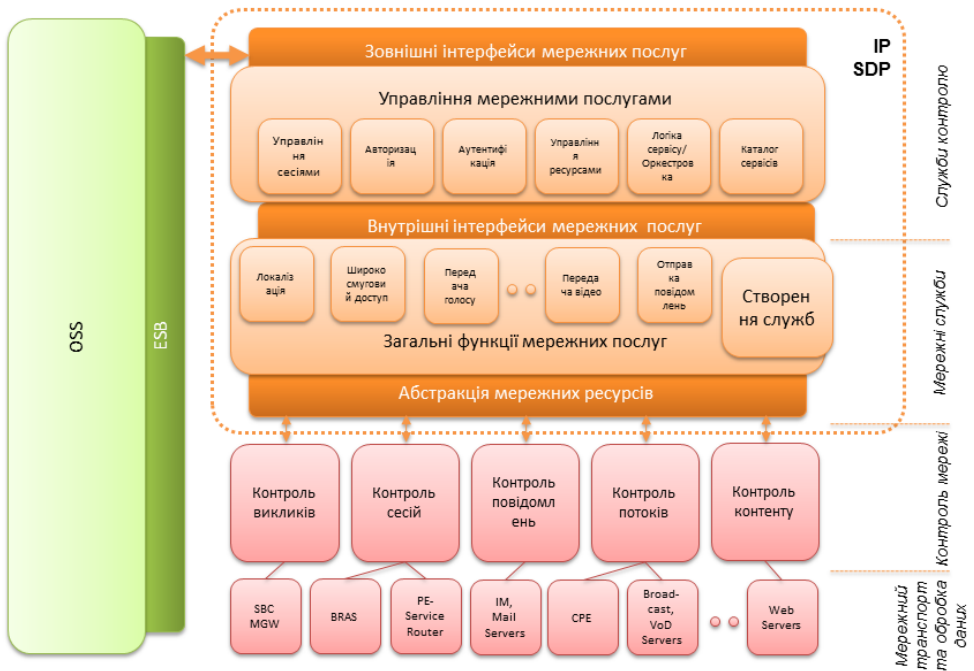


Рис. 2 – Рівні платформ мережевих послуг

Рівень зовнішніх інтерфейсів мережевих послуг забезпечує доступ до сервісів третіх сторін. Прикладом інтерфейсу цього рівня є набір Parlay-X API.

Рівень загальних функцій мережевих послуг включає компоненти, необхідні для реалізації всіх послуг, їх складових та інтерфейсів. На цьому рівні описуються необхідні передумови для нормального функціонування сервісу. Рівень загальних функцій мережевих послуг включає в себе функціональність SDF Infrastructure Support Service (TM Forum). Рівень забезпечує функціональність:

- p<sub>51</sub> – управління сесіями;
- p<sub>52</sub> – управління ідентифікацією;
- p<sub>53</sub> – управління профілем;
- p<sub>54</sub> – управління ресурсами;

p<sub>55</sub> – каталогу послуг;

p<sub>56</sub> – середовища виконання.

Рівень управління мережевими послугами забезпечує підтримку життєвого циклу мережеских послуг. Рівень управління мережевими послугами включає в себе функціональність SDF Management Support Service (TM Forum).

Платформа мережеских послуг взаємодіє з платформою мережеских ресурсів виключно через рівень абстракції мережеских ресурсів.

У рамках забезпечення процесів надання комунікаційних послуг сервісна платформа взаємодіє з платформою підтримки операційних процесів через рівні управління мережевими послугами і логіки мережеских послуг. За цих інтерфейсів сервісна платформа віддає дані про обсяги споживання послуг і також бере команди на активацію / деактивацію сервісів на мережі (при цьому обробкою замовлення на продукт, його декомпозицією на послуги, управлінням послідовністю операцій активації сервісів на мережі займається платформа підтримки операційних процесів).

Платформа мережеских послуг у цілому оперує сутністю «мережева послуга».

Можливості платформи мережеских послуг визначають, які саме послуги можуть бути реалізовані для споживачів. Такий підхід забезпечує можливості для формування нової архітектури телекомунікаційних систем і послуг за рахунок використання «хмарних технологій».

## **Структурна діаграма обміну повідомленнями в розрізі одного АРМ**

Одним з основних сервісів для автоматизованих систем екологічної безпеки, який вимагає найбільшої завадостійкості при заданій ефективності, є сервіс транспорту повідомлень.

Для поділу задач прикладного програмування і задачі транспорту повідомлень – була обрана загальна шина для обміну між різними рівнями. Тобто при необхідності у такій архітектурі можемо програмувати і міняти модулі на окремому рівні без переписування програмного забезпечення іншого рівня.

Наприклад, можливо замінити транспорт для повідомлень між АРМами з brokercentric MQTT на brokerless ZeroMQ, не зачіпаючи прикладні програми. І навпаки, можна, наприклад, поміняти Java-backend на Go-backend, не перероблюючи забезпечення на рівні мережі.

MQTT в якості загальної внутрішньої шини обрано за такими факторами – широко розповсюджений протокол з коннекторами практично до будь-якої бібліотеки чи софту, використовує архітектуру public-subscribe, не прив'язаний до формату повідомлень (data-agnostic), реалізації й протокол сам по собі достатньо легкі по відношенню до ресурсів, і також при необхідності є можливість переключати клієнтські коннекти з внутрішньо-комп'ютерних на зовнішньо-мережеві без структурних змін.

Нижче наведена схема такого обміну через загальну шину.

### Messaging and Queueing (MQ): ARM slice

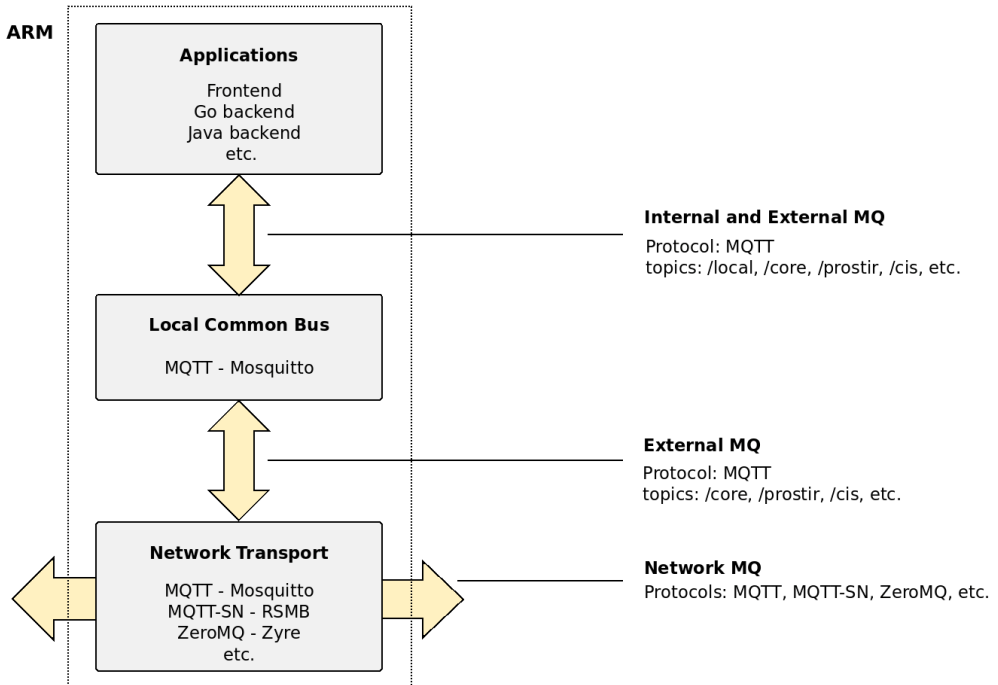


Рис. 3 – Схема обміну через загальну шину

### Структурна діаграма обміну повідомленнями в розрізі одного домену

Розглянемо декілька типів обміну повідомленнями в рамках одного домену. Розподіл за типами організації обміну: система з центральним брокером і системи без виділеного брокера. І другий розподіл – обмін повідомленнями Peer-to-Peer (P2P, зазвичай TCP unicast) або ж One-to-Many (зазвичай це – UDP multicast). На рисунку 4 наведені діаграми відповідно до таких типів обміну:

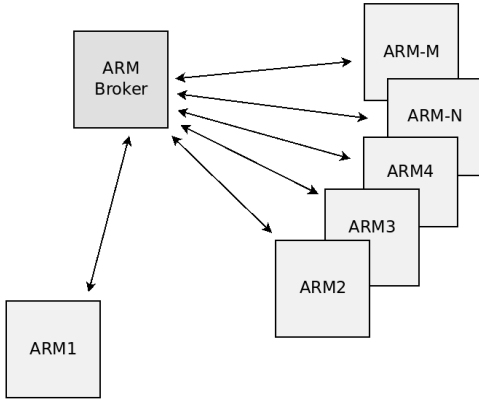
- A: Broker-centric + Peer-to-Peer
- B: Broker-less + Peer-To-Peer
- C: Broker-less + One-to-Many.

Відмітимо, що немає одного єдиного типу обміну, найкращого в усіх випадках, – при деяких шаблонах роботи краще використовувати P2P обмін, в інших – multicast розсилку. Тому можливо, що в деяких застосуваннях оптимальним є використання двох типів в рамках однієї моделі.

Реалізація, яка використовувалась в проєкті, – модель з центральним брокером і розсилкою повідомлень один-всім в усіх випадках.

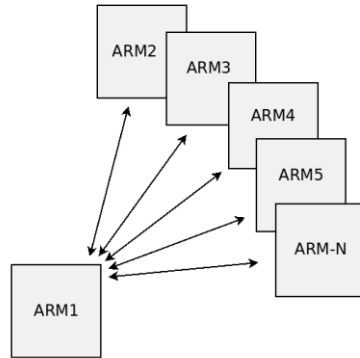
**Messaging and Queuing (MQ): domain slice**

Option A - Broker-centric model



**Messaging and Queuing (MQ): domain slice**

Option B - Brokerless and P2P (Peer-To-Peer)



**Messaging and Queuing (MQ): domain slice**

Option C - Brokerless and Multicast (One-To-Many)

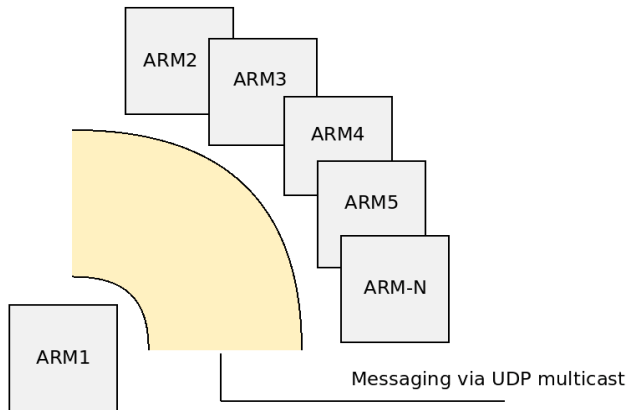


Рис. 4 – Діаграми відповідно до таких типів обміну: А – Broker-centric + Peer-to-Peer; В – Broker-less + Peer-To-Peer; С – Broker-less + One-to-Many

**Структурна діаграма обміну повідомленнями в розрізі інтерконекту між доменами**

Виходячи з сутності інтерконекту, це зазвичай P2P з'єднання (Peer-to-Peer). Відповідно – найбільш природно на такому з'єднанні виглядає P2P брідж між брокерами.

Наприклад, на рисунку 5 наведено діаграму такого з'єднання між двома доменами різного типу (між Peer-to-Peer та One-to-Many доменами).

**Messaging and Queueing (MQ): interdomain slice**

P2P (peer-to-Peer) interconnect

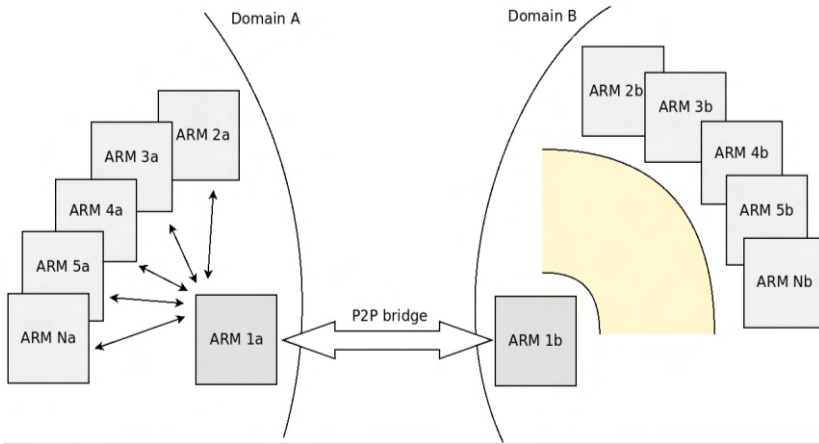


Рис. 5 – Діаграма з'єднання між двома доменами різного типу (між Peer-to-Peer та One-to-Many доменами)

**Ефективність систем передавання інформації**

Пропускна здатність каналу зв'язку  $C$  визначає максимальну швидкість передавання інформації, тобто є тією границею, якої можна досягти при ідеальному кодуванні. Природно, що в реальних каналах швидкість передавання  $R$  завжди буде меншою за  $C$ . Ступінь залежності  $R$  від  $C$  визначається тим, наскільки раціонально вибрана і ефективно використовується система зв'язку. Найбільш загальною оцінкою ефективності системи зв'язку є *коефіцієнт використання каналу*:

$$\eta = \frac{R}{C}. \tag{1}$$

Для *дискретних* систем зв'язку  $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2$ , де  $\eta_1$  і  $\eta_2$  – ефективність системи кодування і ефективність системи модуляції. Вводячи надлишковість повідомлення  $x_1 = 1 - \eta_1$  та надлишковість сигналу  $x_2 = 1 - \eta_2$ , отримаємо

$$\eta = 1 - x, \tag{2}$$

де  $x = x_1 + x_2 - x_1 x_2$  – повна надлишковість системи.

При передаванні *неперервних* повідомлень

$$\eta = \frac{F_m \log\left(\frac{P_c^*}{P_0^*} + 1\right)}{F \log\left(\frac{P_c}{P_0} + 1\right)}, \tag{3}$$

де  $F_m$  – ширина смуги модульованого сигналу;  $P_c^*/P_0^*$  – відношення сигнал-шум для модульованого сигналу;  $F$  – ширина смуги первинного сигналу;  $P_c/P_0$  – відношення сигнал-шум для первинного сигналу



$$\eta_p = \frac{RN_0}{P_c}, \quad (4)$$

де  $N_0$  – інтенсивність завади, а *коефіцієнт використання смуги частот каналу*

$$\eta_F = \frac{R}{F}. \quad (5)$$

Коефіцієнт  $\eta_p$  є основним показником ефективності для тих систем, в яких потужність сигналу жорстко обмежена (наприклад, радіоканали спеціального призначення). У системах проведеного зв'язку більш важливим показником є коефіцієнт  $\eta_F$ .

Згідно з (2), ефективність системи зв'язку повністю визначається її надлишковістю. Тому задача підвищення ефективності зв'язку зводиться до зменшення надлишковості повідомлення та сигналу.

Надлишковість повідомлення, як ми бачили, зумовлена тим, що елементи повідомлення не є рівноймовірними і між ними існує статистичний зв'язок. При кодуванні можна перерозподілити ймовірності вихідного повідомлення так, щоб розподіл імовірностей символів коду наближався до оптимального (рівномірного для передавання дискретних повідомлень або нормального для неперервних). Такий перерозподіл дозволяє усунути надлишковість, що залежить від розподілу ймовірностей елементів повідомлення. Прикладом подібного кодування є код Шеннона – Фано. Якщо перейти від кодування окремих символів повідомлення до кодування цілих груп символів, то можна усунути взаємозв'язок між ними і тим самим зменшити надлишковість. Загальна ідея такого методу кодування, який називають *методом збільшення*, полягає в наступному. Вихідне повідомлення розбивається на відрізки по  $k$  символів у кожному. Такі відрізки можуть розглядатися як збільшені елементи повідомлення. Можна показати, що ймовірнісні зв'язки між такими збільшеними елементами слабкіші, ніж між елементами вихідного повідомлення. Очевидно, що чим більше  $k$  (більші відрізки), тим слабшим буде зв'язок між ними. Далі збільшені елементи кодуються з урахуванням їх розподілу ймовірностей.

Слід зазначити, що в разі збільшення елементів відбувається перетворення, котре полягає в переході до коду з більш високою основою:  $m = m^k$ , де  $m$  – початковий стан.

Своєрідним прикладом методу збільшення повідомлень є стенографічний текст. Кожний стенографічний знак в цьому тексті зображує ціле слово або навіть групу слів.

Що стосується сигналу, то його надлишковість залежить від способу модуляції та виду переносника. Процес модуляції звичайно супроводжується розширенням смуги частот сигналу в порівнянні зі смугою частот повідомлення, яке передається. Це розширення смуги і є надлишковим. Частотна надлишковість також збільшується при переході від синусоїдального переносника до переносника імпульсного чи шумоподібного.

З точки зору підвищення ефективності передачі слід було б вибирати такі способи модуляції, які мають малу надлишковість. До таких систем, частково, належить односмугова передача, при якій сигнали, що передаються, не містять

частотної надлишковості – вони є просто копіями повідомлень, які передаються. Однак, говорячи про ефективність системи зв'язку, не можна забувати про її завадостійкість. Усунення надлишковості підвищує ефективність передавання, але знижує при цьому вірогідність (завадостійкість), і навпаки, збереження чи введення надлишковості дозволяє забезпечити високу вірогідність передавання. Наприклад, усунення надлишковості при телеграфному передаванні тексту призводить до ускладнення виправлення помилок у повідомленні і, врешті-решт, до зниження завадостійкості. Зі збереженням надлишковості в тексті завадостійкість буде вищою.

При кодуванні в низці випадків надлишковість навмисно вводиться з метою підвищення вірогідності передачі. Прикладом такого кодування є коректувальні коди.

Аналогічна ситуація має місце й у відношенні надлишковості сигналу. Частотна надлишковість при різних видах модуляції використовується по-різному. Частотна модуляція, наприклад, дає вигаш у завадостійкості більший, ніж амплітудна модуляція, а кодова імпульсна модуляція – більший, ніж частотна. Частотна надлишковість шумового переносника дозволяє знизити вплив завмирань і зосереджених завад.

Отже, оцінюючи різні системи зв'язку, необхідно враховувати принаймні два показники: ефективність і завадостійкість; їх сукупність дає достатньо повну характеристику системи.

Найбільш досконалою системою вважається така, яка забезпечує найбільшу ефективність при заданій завадостійкості або, навпаки, найбільшу завадостійкість при заданій ефективності.

## **Висновки і пропозиції**

Запропонована стандартизація вищого рівня архітектури інформаційно-телекомунікаційних мереж, що забезпечують створення, обробку, зберігання, видалення і транспортування інформації.

Стандартизація архітектури інформаційних систем передбачає: визначення повного переліку компонентів архітектури; визначення функціональних кордонів компонентів; визначення інтерфейсів (протоколів) взаємодії компонентів.

Основною метою стандартизації архітектури є: скорочення термінів впровадження телекомунікаційних послуг, за рахунок зменшення часу на впровадження та модернізацію інформаційних систем, і підвищення ефективності впровадження інформаційних систем, а також зменшення витрат на їх створення і експлуатацію за рахунок: недопущення дублювання функцій; застосування відкритих інтерфейсів; багаторазового застосування однотипних елементів.

Запропоновано структурний синтез архітектур чотирьох основних телекомунікаційних мереж: транспортної, IP, мобільної та фіксованої. Для стандартизації кожної мережевої архітектури було обрано вісім наборів мережевих ресурсів (рівнів).

Розглянуто архітектуру засобів виробництва телекомунікаційних послуг, які включають платформи мережевих ресурсів та мережеві послуги.

Запропоновано методологічну базу для синтезу систем інформаційних та комунікаційних технологій з метою створення єдиної інформаційної платформи, яка представлена як універсальна архітектура інформаційно-комунікаційних систем.

Розглянуто сервіс обміну повідомлень в розрізі: одного АРМ, одного домену та інтерконнекту між доменами.

Розглянута ефективність систем передавання інформації. Оцінюючи різні системи зв'язку, враховували два показники: ефективність і завадостійкість; їх сукупність дає достатньо повну характеристику системи. Найбільш досконалою системою вважається така, яка забезпечує найбільшу ефективність при заданій завадостійкості або, навпаки, найбільшу завадостійкість при заданій ефективності.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Dr. Ralf C. Schlaepfer, Markus Koc. Deloitte AG, Industry 4.0: Challenges and Solutions for the Digital Transformation and Use of Exponential Technologies, Audit, Tax, Consulting, Corporate Finance. 2015.
2. William M. D. 2014. Industrie 4.0 – Smart Manufacturing For The Future. Berlin: Germany Trade & Invest.
3. H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig. 2013. Recommendations For Implementing The Strategic Initiative Industrie 4.0: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. Ulrike Findelee: Acatech – National Academy of Science and Engineering.
4. Kamarul Bahrin, Mohd Aiman; Othman, Mohd Fauzi; Nor Azli, Nor Hayati; Talib, Muhamad Farihin (2016). "Industry 4.0: A Review on Industrial Automation and Robotics". *Jurnal Teknologi*. 78 (6–13). doi: <https://doi.org/10.11113/jt.v78.9285>
5. Lars Adolph & et al. 2016. German Standardization Roadmap: Industry 4.0. Version 2. Berlin: DIN e.V.
6. Jew Jonathan. BICSI Data Center Standard: A Resource for Today's Data Center Operators and Designers / Jew Jonathan // BICSI News Magazine, May/June 2010. – P. 28.
7. Niles Susan. Standardization and Modularity in Data Center Physical Infrastructure / Niles Susan // 2011, Schneider Electric. – P. 4.
8. Копейка О.В. Сетевые службы и службы сетевых устройств в Дата-центрах / О.В. Копейка // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2013. – Випуск 4 (28). – С. 98–104.
9. Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers // TIA STANDARD TIA-942. Telecommunications Industry Association. – April 2005. – 135 p.
10. Копійка О.В. Архітектура мережі в сучасних дата-центрах / О.В. Копійка // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – No 2(30). – С. 34–41.
11. Data Center Design and Implementation Best Practices // ANSI/BICSI 002-2011. Committee Approval. – January 2011. First Published : March 2011. – 367 p.
12. Таненбаум Э., ван Стеен М. Распределенные системы: Принципы и парадигмы. – СПб.: Питер, 2003. – 877 с. – (Серия «Классика computer science»).
13. Колесов Ю.Б., Сеничев Ю.Б. Моделирование систем: Объектно-ориентированный подход. – БХВ-Петербург, 2006. – 192 с.
14. Довгий С.О., Копійка О.В. Автоматизована система для підтримки прийняття рішень при ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС // Інформатизація аерокосмічного землезнавства. – К.: Наук. думка, 2001. – С. 211–266.
15. Сергієнко І.В., Стецюк П.І., Кошлай Л.Б. Модели и информационные технологии для поддержки принятия решений при проведении структурно-технологических преобразований // Кибернетика и системный анализ. – 2009. – №2. – С. 26–49.

16. Groover, Mikell (2014). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*.
17. Choi M.-J., Ju H.-T., Hong J. W.-K., Yun D.-S. Design and Implementation of Web Services-based NGOSS Technology Specific Architecture // *Annals of Telecommunications*. – Special Issue on “Next Generation Network and Service Management”. – Vol. 63. – No. 3–4. – April 2008. – P. 195–206.
18. Свод знаний по управлению бизнес-процессами: BPM СВОК 3.0 = BPM СВОК Version 3.0. Guide to the Business Process Management Common Body Of Knowledge. – М.: Альпина Паблишер, 2016. – 480 с. – ISBN 978-5-9614-5455-0.
19. Новые технологии в телекоммуникации: выбор технологической архитектуры. Современные тенденции развития / С.А. Довгий, О.В. Копейка, С.П. Поленок. – К.: Укртелеком, 2001. – 281 с.
20. Балашов В.А., Копийка О.В., Ляховецкий Л.М. VDSL – ближайшее будущее цифрового абонентского доступа // *Зв’язок*. – 2005. – № 4. – С. 10–16.

*Стаття надійшла до редакції 28.07.2021 і прийнята до друку після рецензування 18.11.2021*

## REFERENCES

1. Schlaepfer, R. C., & Koc, M. (2015). *Deloitte AG, Industry 4.0: Challenges and Solutions for the Digital Transformation and Use of Exponential Technologies, Audit, Tax, Consulting, Corporate Finance*.
2. William, M. D. (2014). *Industrie 4.0 – Smart Manufacturing For The Future*. Berlin: Germany Trade & Invest.
3. Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations For Implementing The Strategic Initiative Industrie 4.0: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group*. Ulrike Findeklee: Acatech – National Academy of Science and Engineering.
4. Kamarul Bahrin, M. A., Othman, M. F., Nor Azli, N. H., & Talib, M. F. (2016). "Industry 4.0: A Review on Industrial Automation and Robotic". *Jurnal Teknologi*, 78(6-13). doi: <https://doi.org/10.11113/jt.v78.9285>
5. Adolph, Lars & et al. (2016). *German Standardization Roadmap: Industry 4.0. Version 2*. Berlin: DIN e.V.
6. Jew, J. (2010). BICSI Data Center Standard: A Resource for Today’s Data Center Operators and Designers. *BICSI News Magazine*, May/June 2010, 28.
7. Niles, S. (2011). *Standardization and Modularity in Data Center Physical Infrastructure*. Schneider Electric.
8. Kopiika, O.V. (2013). Network services and network device services in Data Centers. *Control, navigation and communication systems*, 4 (28), 98-104 (in Russian).
9. *Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers (2005)*. TIA STANDARD TIA-942. Telecommunications Industry Association.
10. Kopiika, O.V. (2014). Network architecture in modern data centers. *Scientific notes of the Ukrainian Research Institute of Communications*, 2(30), 34-41 (in Ukrainian).
11. *Data Center Design and Implementation Best Practices*. (2011). ANSI/BICSI 002-2011. Committee Approval.
12. Tanenbaum, E., & van Steen, M. (2003). *Distributed Systems: Principles and Paradigms*. SPb.: Piter (in Russian).
13. Kolesov, Yu. B., & Senichekov, Yu. B. (2006). *Modeling Systems: An Object Oriented Approach*. BHV-Petersburg (in Russian).
14. Dovgiy, S. O., & Kopiika, O. V. (2001). Automated system for the process of taking decisions during the liquidation of the inheritance of an accident at the CNPP. In *Informatization of aerospace land exploration* (pp. 211-266). Kyiv: Naukova dumka (in Ukrainian).

15. Serhienko, I. V., Stetsiuk, P. I., & Koshlai, L. B. (2009). Models and information technologies for decision support during structural and technological transformations. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2, 26-49 (in Russian).
16. Groover, M. (2014). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*.
17. Choi, M.-J., Ju, H.-T., Hong, J. W.-K., & Yun, D.-S. (2008). Design and Implementation of Web Services-based NGOSS Technology Specific Architecture. *Annals of Telecommunications. Special Issue on "Next Generation Network and Service Management"*, 63(3-4), 195-206.
18. BPM CBOK Version 3.0. Guide to the Business Process Management Common Body Of Knowledge. (2016). Moscow: Alpina Pablysher.
19. Dovgiy, S. O., Kopyika, O. V., & Polenok, S. P. (2001). New technologies in telecommunications: the choice of technological architecture. Modern development trends. Kyiv: Ukrtelecom (in Russian)
20. Balashov, V. A., Kopyika, O. V., & Lyakhovetsky, L. M. (2005). VDSL – near future of digital subscriber access. *Communication*, 4, 10-16 (in Russian).

*The article was received 28.07.2021 and was accepted after revision 18.11.2021*

**Довгий Станіслав Олексійович**

академік НАН України, доктор технічних наук, професор, директор-організатор Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України  
**Адреса робоча:** 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13  
ORCID ID 0000-0003-1078-0162 **e-mail:** s.dovgii@gmail.com

**Копійка Олег Валентинович**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України  
**Адреса робоча:** 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13  
ORCID ID 0000-0003-0189-3915 **e-mail:** okopyika@gmail.com

**Козлов Олексій Сергійович**

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України  
**Адреса робоча:** 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13  
ORCID ID 0000-0003-1889-3153 **e-mail:** alexey.ua84@gmail.com

УДК 662.73, 628.336.3

**Yurii Sniezhkin**, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Director of the Institute of Technical Thermophysics of the NASU  
ORCID ID 0000-0001-7871-8774 *e-mail*: ittf\_ntps@ukr.net

**Zhanna Petrova**, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Chief Researcher of the Department of Heat and Mass Transfer in Heat Technologies  
ORCID ID 0000-0001-7385-8495 *e-mail*: bergelzhanna@ukr.net

**Yuliia Novikova**, graduate student, junior researcher of the Department of Heat and Mass Transfer in Heat Technologies  
ORCID ID 0000-0002-6705-1000 *e-mail*: yulianovikova3@gmail.com

**Anton Petrov**, graduate student, junior researcher of the Department of Heat and Mass Transfer in Heat Technologies  
ORCID ID 0000-0003-4851-3115 *e-mail*: monoton10@gmail.com

Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## WAYS OF DISPOSAL OF OBJECTIVE FUEL SEDIMENTS FOR FUEL

**Abstract.** *Accumulated sludge from sewage treatment plants in large cities is obsolete, due to which they have lost the vast majority of nutrients, become too mineralized and practically unsuitable for direct use as fertilizer.*

*The research is devoted to the development of a unified approach to the efficient processing of sludge as a fuel with the addition of flammable fillers such as milling peat, buckwheat husk, wood waste (sawdust).*

*Identified factors influencing the energy efficiency of the processes of preparation of raw materials, drying and granulation of composite mixtures based on peat, obsolete sludge and biomass, which allowed to obtain quality pellets and briquettes. The problem of processing obsolete sludge is the low content of organic matter, excessive ash content and high humidity, so they are not suitable for incineration in its pure form and for agriculture. To reduce ash content, it is advisable to add biomass and peat to sludge and dry to reduce moisture.*

*The article presents studies of drying kinetics of composite granules based on peat, obsolete sludge and biomass on an experimental convective drying stand. The convective drying stand allows to carry out heat treatment of composite granules at a temperature of drying agent of 30–150°C and speed of movement of 0,5–5 m/s. A comparison of the drying time of the sludge-peat composition and its components is performed, which shows that during the drying of the composite granules the intensification of the drying process is observed.*

*The presented comparison of drying kinetics of two- and three-component granules shows the same nature of the drying curves and the drying time is in the range of 17–18 minutes. The optimal ratio of components for quality granulation is selected. Effective drying regimes of composite granules based on sludge, peat and biomass are determined. Equilibrium humidity of composite granules not exceeding standard fuel humidity is determined.*

**Key words:** *obsolete sludge; peat; biomass; drying; pellets*

Ю.Ф. Снежкін, Ж.О. Петрова, Ю.П. Новікова, А.І. Петров

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна

## ШЛЯХИ УТИЛІЗАЦІЇ ЗАСТАРІЛИХ МУЛОВИХ ВІДКЛАДЕНЬ НА ПАЛИВО

**Анотація.** Накопичені мулові осади очисних споруд великих міст є застарілими, через це втратили переважну кількість біогенних речовин, стали занадто мінералізованими і практично непридатними до безпосереднього використання їх як добрива.

Дослідження присвячені розробці єдиного підходу до ефективною переробки мулових осадів як палива із додаванням до них займистих наповнювачів, таких як фрезерний торф, лузга гречки, відходи деревини (тирса).

Виявлені фактори впливу на енергоефективні показники процесів підготовки сировини, сушіння та гранулоутворення композиційних сумішей на основі торфу, застарілих мулових осадів та біомаси, що дозволило отримати якісні гранули та брикети.

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.

У статті наведені дослідження кінетики сушіння композиційних гранул на основі торфу, застарілих мулових відкладень та біомаси на експериментальному конвективному сушильному стенді. Конвективний сушильний стенд дозволяє проводити термічну обробку композиційних гранул при температурі сушильного агенту 30–150°C та швидкості руху 0,5–5 м/с. Проведено порівняння тривалості сушіння мулоторф'яної композиції та її складових, яке показує, що при сушінні композиційних гранул спостерігається інтенсифікація процесу сушіння.

Представлено порівняння кінетики сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул, що показує однаковий характер кривих сушіння та тривалість сушіння (знаходиться в межах 17–18 хвилин). Підібрано оптимальне співвідношення компонентів з метою якісного гранулювання. Визначено ефективні режими сушіння композиційних гранул на основі мулових відкладень, торфу та біомаси. Визначено рівноважні вологості композиційних гранул, що не перевищують стандартну вологість палива.

**Ключові слова:** застарілі мулові відкладення; торф; біомаса; сушіння; гранули

DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.21-31>

### Вступ

Очисні споруди є потенційним джерелом отримання додаткових сировинних ресурсів, що розглядаються сьогодні як відходи, а також нетрадиційних енергоносіїв, потенціал яких повною мірою не використовується, перш за все, через недоліки сучасних технологій очищення стічних вод. Загалом можна стверджувати, що системи водовідведення працюють як техноекосистеми першого виду (відкриті системи, що на вході споживають ресурси і енергію, а на виході створюють продукт і відходи, що не піддаються рециклінгу) [1].

В Україні за 2019 рік у поверхневі водні об'єкти скинуто близько 5,4 млрд м<sup>3</sup> стічних вод. З них забруднених стічних вод було скинуто близько 0,7 млрд м<sup>3</sup> (13,7% від загального обсягу скидів); нормативно-чистих без очистки – 3,3 млрд м<sup>3</sup> (61,1%); нормативно очищених – 1,2 млрд м<sup>3</sup> (22,1%) та некатегорованих – 0,2 млрд м<sup>3</sup> (3,1%). Найбільше забруднених стічних вод було скинуто в м. Київ – приблизно 0,3 млрд м<sup>3</sup> (39% від загального обсягу забруднених стічних вод); в Дніпропетровській області – 0,2 млрд м<sup>3</sup> (27,1%). Підприємствами промисловості було скинуто забруднених стічних вод – 0,09 млрд м<sup>3</sup> (12,4%), сільського господарства – 0,047 млрд м<sup>3</sup> (6,3%) та житлово-комунальним господарством – 0,6 млрд м<sup>3</sup> (76,5%). У процесі очищення забруднених стічних вод на каналізаційних спорудах України утворюються біологічно та бактеріологічно забруднені відкладення, які також потребують утилізації [2].

Установлено, що широко використовувані в Україні технології біологічного очищення не забезпечують видалення біогенних елементів. Щорічно разом зі стічними водами у поверхневі водні об'єкти надходить: завислих речовин –  $45 \cdot 10^6$  кг; нафтопродуктів –  $400 \cdot 10^6$  кг; сульфатів –  $800 \cdot 10^6$  кг; хлоридів –  $670 \cdot 10^6$  кг; азоту –  $10 \cdot 10^6$  кг; нітратів –  $60 \cdot 10^6$  кг; нітритів –  $2 \cdot 10^6$  кг; СПАР –  $0,25 \cdot 10^6$  кг; заліза –  $0,770 \cdot 10^6$  кг; фосфатів –  $7 \cdot 10^6$  кг [3].

На станціях очищення стічних вод утворюється, окрім очищеної води, група речовин, яку називають осадами стічних вод (ОСВ). Для обробки великих об'ємів стічних вод використовують системи очищення, засновані на утворенні активного мулу або мулового осаду, який залишається роками на звалищах, які потрібно переробляти [4–6].

Основними способами знешкодження або утилізації осадів стічних вод є: використання в сільському господарстві, захоронення на звалищах, викид в океан, спалювання. Окрім традиційних методів, у світі використовують не менш ефективні методи [1].

У країнах Європейського Союзу значну перевагу надають аеробній та анаеробній обробці осадів стічних вод. Дослідженнями встановлено, що під час аеробного перетворення в осаді стічних вод у великій кількості утворюються гумінові кислоти, а під час анаеробного – білки та ароматичні амінокислоти, що є складовою органо-мінеральних добрив у сільському господарстві [7].

Новим наукоємним процесом переробки суміші побутових відходів та осадів стічних вод є низькотемпературний піроліз, який реалізується в Японії, Італії, Німеччині та інших країнах. Піроліз відходів відбувається при температурі 250–400°C. Особливістю низькотемпературного піролізу є те, що перероблюваний осад перетворюється у вуглеводень, спочатку – в газоподібний стан, а після його конденсації отримується основний продукт – «сира нафта» [8].

Зневоднення осадів стічних вод відбувається на мулових майданчиках, механічним зневодненням та термічною сушкою.

Зневоднення – технологічний процес, направлений на збільшення вмісту сухої речовини в осаді.

Мулові майданчики призначені для природного зневоднення осадів, що утворюються на станціях біологічної очистки стічної води, і оброблюють до 90% всього осаду.

Перевага: простота інженерного забезпечення, легкість в експлуатації.



Недолік: залежність від кліматичних та природних факторів.

В залежності від ступеня використання природних процесів мулові майданчики розділяються на майданчики природного та інтенсивного зневоднення і висушування. Перший варіант передбачає перебування осадів в умовах природних процесів випарювання і декантації, тобто осад знаходиться на майданчиках з поверхневим відводом води або на майданчиках-ущільнювачах. У другому варіанті застосовують спеціально виготовлені майданчики зі штучним дренажем, підігрівом, можливістю створення вакууму в дренажній системі, штучним водонепроникним покриттям. Жодних постійних критеріїв, регламентуючих вибір того чи іншого варіанта, не існує. Все визначається місцевими чинниками – кліматичними умовами, територіальними і енергетичними можливостями очисних споруд, їхнім фінансовим станом тощо. Розміри майданчиків і кількість випусків на них осадів визначають, виходячи із вологості осадів, дальності їх розливу, способу утилізації після підсихання.

Мулові майданчики інтенсивного зневоднення і висушування розділяють на традиційні – з вертикальним і горизонтальним дренажем і удосконалені – зі створенням вакууму в дренажній системі, штучним водонепроникним покриттям з повітряною продувкою. І нарешті, майданчики каскадного типу з природною основою і поверхневим відводом води через колодязі в торцевій частині споруди відносять до мулових майданчиків перехідного типу, які будують з метою одержання чистого фільтрату і підвищення швидкості зневоднення. Очевидно, що зневоднення осадів на мулових майданчиках несе загрозу вторинного забруднення, потребує значних капітальних витрат і великих площ під розміщення. Для великих міст з розвинутою інфраструктурою застосування процесів природного зневоднення визнано нераціональним як з економічної, так і з екологічної точки зору. Для ефективного вирішення проблеми осадів необхідно втілювати сучасні, прогресивні методи.

Але наведені технології, як новітні, так і традиційні, спрямовані на переробку активного мулу. Тоді як в Україні існують мулові карти з муловими відкладеннями, яким понад 30 років, що майже позбулись органічної складової та забруднюють ґрунти та підземні води токсичними речовинами. З огляду на це постає завдання поліпшення екології України та створення екологічної енергоефективної технології з переробки застарілих мулових відкладень.

Тому метою роботи є дослідження процесів сушіння композиційних гранул на основі мулових відкладень, торфу та біомаси.

## **Матеріали та методи досліджень**

Для створення гранул використовували застарілі мулові відкладення з м. Фастова, торф з родовища Чернігівської області та біомаси, наприкладі лузги гречки та тирси. З рисунка 1 видно, що зольність мулових відкладень становить 47,3%, що недопустимо при спалюванні. Торф з родовища ДП «Чернігівторф» має достатньо низьку зольність – 14,1%. При поєднанні цих матеріалів зольність композиції становить 33,1%. Зольність біомаси у тирси – 3,1%, а лузги гречки – 1,6%. Для підвищення якості і зменшення зольності мулоторф'яних гранул доцільно до них додавати тирсу та лузгу гречки. Зольність трьохкомпонентних композицій становить 25% [9].

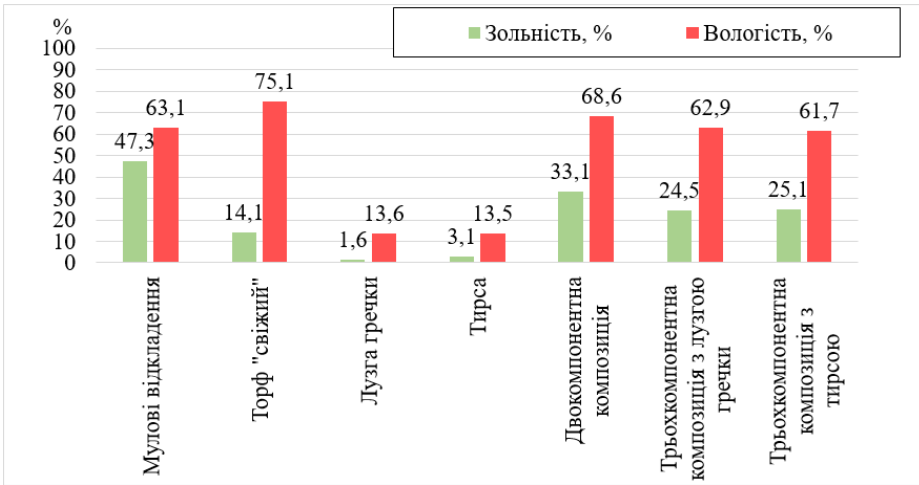


Рис. 1. – Технологічні характеристики сировини

Сформовані композиції піддавали гранулюванню. Для дослідження кінетики процесу сушіння мулоторф'яних гранул застосовували експериментальний конвективний стенд із встановленою автоматичною системою збору та обробки інформації. Конвективний сушильний стенд дозволяє проводити термічну обробку мулоторф'яних гранул при температурі сушильного агента 30–150°C та швидкості руху 0,5–5 м/с. Встановлені високоточні ваги дозволяють реєструвати зміну маси наважки до 0,001 г та підтримувати температуру в сушильній камері із точністю до 0,02°C. Зчитування експериментальних даних про зміну маси та температури зразка, температури сушильного агента в сушильній камері відбувається 7 разів за хвилину [10].

### Результати дослідження

На рисунку 2 наведені криві температури та кінетики сушіння торфу, мулових відкладень та їх композиції. Протягом 30 хвилин торф прогрівається до температури сушіння 120°C. Мул досягає цієї температури протягом 20 хвилин. Двокомпонентна композиція має характер прогрівання мулових відкладень і досягає заданої температури через 20 хвилин. Проведено порівняння кінетики сушіння торфу, мулу та композиційних гранул. Як видно з рисунка, у всіх представлених кривих цей період короткий. В основному у нас спостерігається другий період сушіння, який характеризується зменшенням інтенсивності віддачі вологи.

На рисунку 3 представлені температурні криві та кінетики сушіння композиції 50M+50T в залежності від діаметра гранул. Як видно з температурних кривих, прогрів відбувається інтенсивніше в гранулах діаметром 6 мм. Дослідження впливу діаметра гранул показали, що при збільшенні діаметра гранул тривалість сушіння збільшується у 2,2 раза.

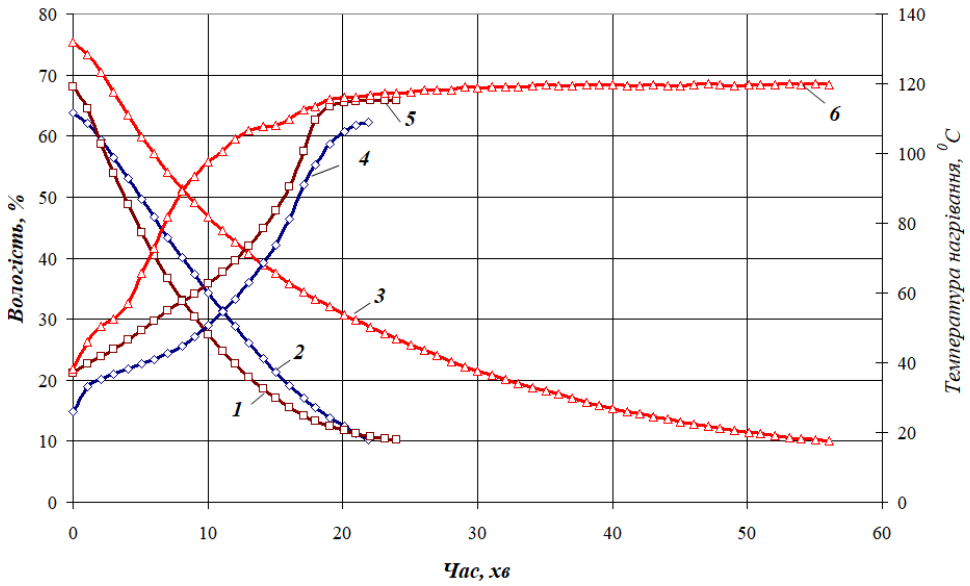


Рис. 2 – Порівняння тривалості сушіння мулоторф’яної композиції та її складових при  $t = 120^{\circ}\text{C}$ ,  $V = 2 \text{ м/с}$ ,  $d = 6 \text{ мм}$ : 1, 5 – мулоторф’яна композиція; 2, 4 – мул; 3, 6 – торф

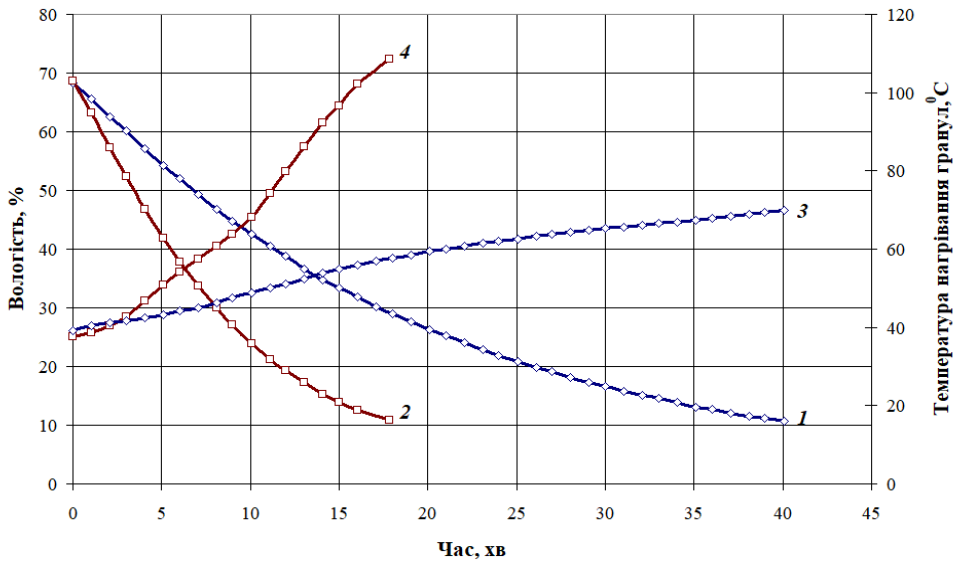


Рис. 3 – Вплив розміру гранул на тривалість сушіння при  $t = 120^{\circ}\text{C}$ ,  $V = 2 \text{ м/с}$ , пропорція 50% М + 50% Т: 1, 3 –  $d = 12 \text{ мм}$ ; 2, 4 –  $d = 6 \text{ мм}$

На рисунку 4 зображені зразки гранул діаметром 6 та 12 мм після сушіння при температурі теплоносія  $120^{\circ}\text{C}$ . Як видно з рисунка, гранули діаметром 6 мм мають однорідну форму та більш міцні.

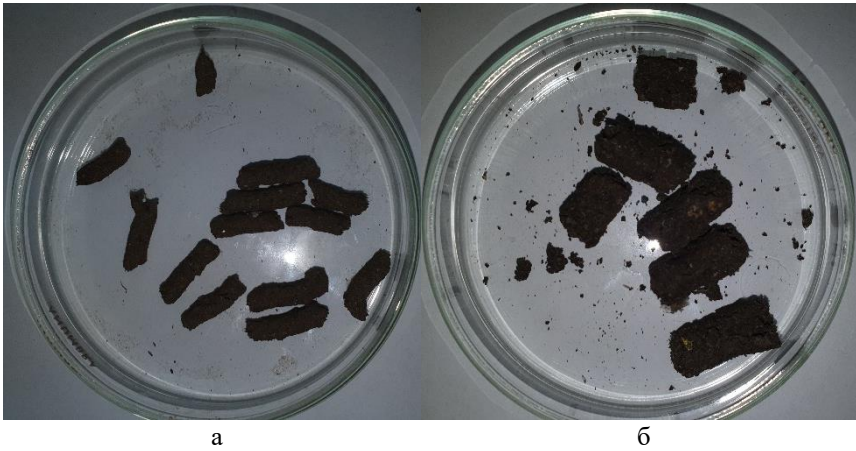


Рис. 4 – Зразки гранул діаметром 6 та 12 мм після сушіння при температурі теплоносія 120°C

На рисунку 5 представлені криві температури та кінетики сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул. Як видно з рисунка 5, кінетика сушіння гранул з трьохкомпонентних композицій схожа і криві налягають одна на одну (криві 2 та 3). Криві кінетики сушіння дво- та трьохкомпонентної композицій показують, що сушіння йде з поступовим зменшенням вологості. Тривалість сушіння гранул як дво-, так і трьохкомпонентної композиції знаходиться в межах 17–18 хв.

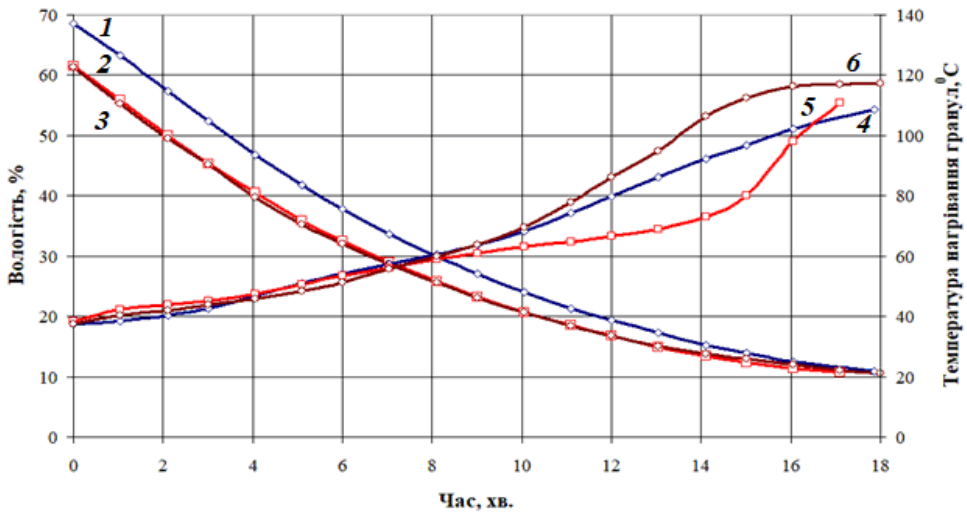


Рис. 5 – Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння дво- та трьохкомпонентних гранул при  $t = 120^{\circ}\text{C}$ ,  $V = 2 \text{ м/с}$ ,  $d = 6 \text{ мм}$ :

- 1, 4 – двокомпонентні гранули у пропорції 50% М + 50% Т;
- 2, 5 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% М + 45% Т + 10% лузги гречки;
- 3, 6 – трьохкомпонентні гранули у пропорції 45% М + 45% Т + 10% тирси

Температурні криві мають різний характер. Трьохкомпонентні гранули з тирсою до 16 хв прогріваються інтенсивно, виходячи на рівномірну температуру

(крива 6), але гранули з лузгою гречки до 14 хв прогриваються повільно, а після спостерігається різке зростання до кінцевого значення (крива 5).

Порівняння утворених трьохкомпонентних гранул з двокомпонентними показало однаковий характер кривих сушіння. Тривалість сушіння трьохкомпонентних гранул при температурі теплоносія 120°C до кінцевої вологості 10% складає 17–18 хвилин.

При розробці технології переробки застарілих мулових відкладень та одержаних композицій з додаванням до них торфу та біомаси важливе значення має рівноважна вологість, яка визначає не тільки умови їх зберігання, а й кінцевий вологовміст при сушінні.

Криві ізотерм адсорбції композицій та її компонентів зображені на рисунку 6. Двокомпонентна композиція на основі мулу і торфу займає положення між ізотермами торфу та мулових відкладень (рис. 6 крива 5). Як видно з рисунка, три ізотерми адсорбції трьохкомпонентних композицій налягають одна на одну і мають однаковий характер. При  $\varphi = 0,4$  рівноважна вологість всіх зразків різна, що свідчить про неоднорідний склад матеріалу. Для торфу – 11%, для мулових відкладень – близько 2%, тирси – 7%, для двокомпонентної композиції на основі мулових відкладень та торфу – 5%, для трьохкомпонентної композиції на основі мулових відкладень, торфу та тирси – 6%, трьохкомпонентної композиції на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки – 6%.

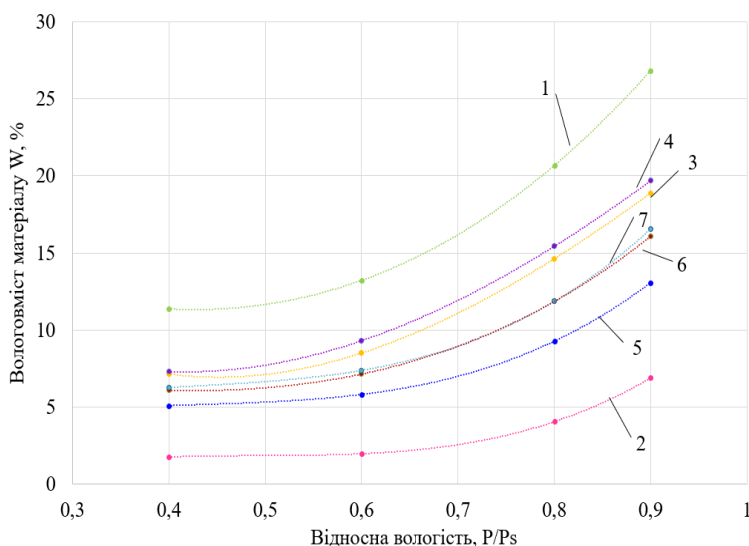


Рис. 6 – Ізотерми адсорбції композицій та їх компонентів:

1 – торф; 2 – мулові відкладення; 3 – тирса; 4 – лузга гречки; 5 – двокомпонентна композиція на основі мулових відкладень та торфу; 6 – трьохкомпонентна композиція на основі мулових відкладень, торфу та тирси; 7 – трьохкомпонентна композиція на основі мулових відкладень, торфу та лузги гречки

Питома теплота згоряння створеної нами композиційної суміші у вигляді гранул на основі мулових відкладень, торфу та органічної сировини відповідає стандартам якісного палива і становить 12,5–16,5 МДж/кг. Питома теплота торфу відповідно становить 12,1 МДж/кг.

## Висновки

Отримані в роботі результати експериментальних досліджень з визначення технологічних характеристик є лише одним з етапів досліджень. Підібрано оптимальне співвідношення компонентів з кращими якісними характеристиками, ніж у мулу. Додавання торфу дозволяє понизити зольність мулових відкладень в 1,4 раза, а при подальшому використанні біомаси – в 1,9 раза.

Розмір гранул також впливає на процес сушіння, зі збільшенням діаметра збільшується тривалість сушіння та прогрів проходить не так інтенсивно. Порівняння кінетики сушіння торфу, мулових відкладень та їх композиції показало, що процес сушіння проходить інтенсивніше та має характер сушіння такий же, як і мулових відкладень. Отримані криві кінетики сушіння мають однаковий характер у дво- та трьохкомпонентних гранул, але при цьому температурні криві мають різний характер.

Вперше були проведені дослідження адсорбційних властивостей трьохкомпонентних композицій на основі торфу, мулових відкладень та гречаної лузги.

Отримана рівноважна вологість композицій не перевищує стандартну вологість для паливних гранул (складає 20%) та становить 6–7%. Тому вони можуть бути більш ефективно використані для спалювання в котлах на біомасі. Отриману золу можна застосовувати для виробництва цегли, цементу та інших будівельних матеріалів. Під час зберігання композиційних гранул з метою запобігання втраті їх технологічних властивостей рекомендується підтримувати вологість повітря на рівні 60–70%. Додавання мулових відкладень до паливних гранул дозволить зменшувати рівноважну вологість. Питома теплота згоряння створених композиційних гранул відповідає стандартам якісного палива і становить 15,07 мДж/кг.

Ліквідація накопичених відкладень потрібна для ефективної та безперебійної експлуатації очисних споруд. Тому актуально є розробка технології переробки мулових відкладень на паливні гранули з одночасним одержанням теплової та електричної енергії.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Снежкін Ю.Ф., Петрова Ж.О., Пазюк В.М., Новікова Ю.П. Стан технологій очищення стічних вод в Україні та світі. Теплофізика та Теплоенергетика, 2021. – Т. 43. № 1. – С. 5–12. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.1>
2. Загальні показники використання водних ресурсів України. Портал відкритих даних. [Електронний ресурс]: – <https://data.gov.ua/dataset/2054e342-fd89-4419-b130-685a9d042990>
3. Міністерство з питань комунального господарства України. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2012 році. – Київ, 2013. – 450 с.
4. Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод. – М.: Мир, 2006. – 480 с.
5. Экологическая биотехнология / Под ред. К.Ф. Форстера, Д.А.Дж. Вейза. – Л.: Химия, 1990. – 384 с.

6. Лихачев Н.И. Канализация населенных мест и промышленных предприятий. Справочник проектировщика / Н.И. Лихачев, И.И. Ларин, С.А. Хаскин и др. Под ред. В.Н. Самохина. – 2 изд. – М.: Стройиздат, 1981. – 639 с.
7. Du H., Li F. Characteristics of dissolved organic matter formed in aerobic and anaerobic digestion of excess activated sludge. *Chemosphere*. – 2017. – V. 168 – Pp. 1022–1031.
8. Пахненко Е.П. Осадки сточных вод и другие нетрадиционные органические удобрения [Электронный ресурс]. URL:<http://files.pilotlz.ru/pdf/cC2968-7-ch.pdf>
9. Петрова Ж.О., Новікова Ю.П. Підготовка сировини, створення композицій та гранулоутворення з застарілих мулових відкладень, торфу та біомаси. *Кераміка: наука і життя*, 2021. – Т. 50. – № 1. – С. 14–18. <https://doi.org/10.26909/csl.1.2021.2>
10. Petrova Z., Sniezhkin Y., Paziuk V., Novikova Y., Petrov A. Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand // *Journal of Ecological Engineering*. – 2021. – 22(6). – Pp. 159–166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>

*Стаття надійшла до редакції 30.08.2021 і прийнята до друку після рецензування 10.12.2021*

## REFERENCES

1. Sniezhkin, Yu., Petrova, Zh., Paziuk, V., & Novikova, Yu. (2021). State of wastewater treatment technologies in Ukraine and the world. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 43(1), 5-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2021.1> (in Ukrainian).
2. General indicators of water resources use in Ukraine. Open data portal. Retrieved from: <https://data.gov.ua/dataset/2054e342-fd89-4419-b130-685a9d042990> (in Ukrainian).
3. Ministerstvo z pytan' komunal'nogo gospodarstva Ukrainy. (2013). Nacional'na dopovid' pro yakist' pytnoi' vody ta stan pytnogo vodopostachannja v Ukraini u 2012 roci. Kyiv (in Ukrainian).
4. Hence, M., Armojes, P., Lja-Kur-Jansen J., & Arvan, Je. (2006). *Ochistka stochnyh vod*. Moscow: Mir (in Russian).
5. Forster, K.F., & Vejz, D.A.Dzh. (Ed.). (1990). *Jekologicheskaja biotehnologija*. Leningrad: Himija (in Russian).
6. Lihachev, N.I. (1981). *Kanalizacija naseleennyh mest i promyshlennyh predpriyatij*. Spravochnik proektirovshhika. Moscow: Strojizdat (in Russian).
7. Du, H., & Li, F. (2017). Characteristics of dissolved organic matter formed in aerobic and anaerobic digestion of excess activated sludge. *Chemosphere*, 168, 1022–1031.
8. Pahnenko, E.P. Osadki stochnyh vod i drugie netradicionnye organicheskie udobrenija Retrieved from: URL:<http://files.pilotlz.ru/pdf/cC2968-7-ch.pdf> (in Russian).
9. Petrova, Zh., & Novikova, Yu. (2021). Preparation of raw materials, creation of compositions and granulation from obsolete sludge, peat and biomass. *Ceramics: Science and Life*, 1(50), 14-18. <https://doi.org/10.26909/csl.1.2021.2>
10. Petrova, Zh., Sniezhkin, Yu., Paziuk, V., Novikova, Yu., & 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. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>

*The article was received 30.08.2021 and was accepted after revision 10.12.2021*

**Снєжкін Юрій Федорович**

академік НАН України, директор Інституту технічної теплофізики НАН України

**Адреса робоча:** 03057, Україна, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а

**ORCID ID** 0000-0001-7871-8774 **e-mail:** ittf\_ntps@ukr.net

**Петрова Жанна Олександрівна**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник відділу Тепломасопереносу в теплотехнологіях Інституту технічної теплофізики НАН України

**Адреса робоча:** 03057, Україна, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а

**ORCID ID** 0000-0001-7385-8495 **e-mail:** bergelzhanna@ukr.net

**Новікова Юлія Петрівна**

аспірантка, молодший науковий співробітник відділу Тепломасопереносу в теплотехнологіях Інституту технічної теплофізики НАН України

**Адреса робоча:** 03057, Україна, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а

**ORCID ID** 0000-0002-6705-1000 **e-mail:** yuliiyanovikova3@gmail.com

**Петров Антон Іванович**

аспірант, молодший науковий співробітник відділу Тепломасопереносу в теплотехнологіях Інституту технічної теплофізики НАН України

**Адреса робоча:** 03057, Україна, м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а

**ORCID ID** 0000-0003-4851-3115 **e-mail:** monoton10@gmail.com



UDC 628.16.08

**Marina V. Kravchenko**, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor  
ORCID: 0000-0003-0428-6440 *e-mail*: marina-diek@ukr.net

**Olena S. Voloshkina**, Dr. Sc. (Tech.), Professor  
ORCID: 0000-0002-3671-4449 *e-mail*: e.voloshki@gmail.com

**Lesya O. Vasylenko**, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor  
*e-mail*: lesya.kiev@ukr.net

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

## **APPLICATION OF THE REVERSE OSMOSIS METHOD FOR THE PURIFICATION OF DRINKING WATER**

**Abstract.** *The article deals with the problem of clean water, as for Ukraine, which belongs to the states with a limited amount of water resources and a high level of their use. It has been substantiated that deviations from the standards of water quality, both surface and underground sources, reach 70-80%. Almost a third of the population of villages and towns of rural type in Ukraine consumes water from wells, the water in which is recognized as practically unfit for consumption, especially in terms of nitrate indicators, which have a negative impact on human health. Provided a comparative assessment of regulatory documents State sanitary norms and rules 2.2.4-171-10 "Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption" and DSTU 7525: 2014 "Drinking water. Requirements and methods of quality control", in force on the territory of Ukraine, Council Directive 98/83/EC, which regulates water quality indicators at the international level. The modern views on the structure of drinking water as a dilute aqueous solution, where water is presented in the form of giant heterophase clusters, are considered and, based on this, the terms "prepared drinking water" and "natural drinking water" are defined. The problem of optimal adjustment of the qualitative and quantitative composition of drinking water is determined, which in the modern world is solved by methods of additional purification of water at the local level. It is shown that according to the principle of operation, household water purifiers can be divided into 4 main groups, namely: installations with a mechanical filter element; household filters of the sorption type; plants of an electrochemical type and plants of a membrane type based on the reverse osmosis process, which are widely represented on the world market today and are actively used at the local level (apartments, houses, kindergartens, schools), but they have a number of features and disadvantages. The mechanism of the processes in the system "initial water – membrane – prepared drinking water" with its outlined components is presented. The consequences of the use of reverse osmosis plants for the purification of drinking water are considered on the example of tap water, which has been purified in a plant with a membrane element TW30-1812-50 manufactured by DOW Chemical (USA) at an operating pressure of 18 atm. The presented results of changes in the quantitative and qualitative composition of water, namely, its fundamental components, as a result of post-treatment by reverse osmosis. Technological and economic disadvantages of reverse osmosis plants are substantiated. It has been confirmed that the reverse osmosis method is used to demineralize water and is capable of retaining almost all ions by 92–99%, and with a two-stage purification system up to 99.9%, that is, water is prepared by reverse osmosis purified from almost all mineral salts, including useful and necessary for normal human life.*

© М.В. Кравченко, О.С. Волошкіна, Л.О. Василенко, 2021

**Keywords:** drinking water; environmental safety; drinking water quality; water purification methods; reverse osmosis; membrane; reverse osmosis disadvantages

**М.В. Кравченко, О.С. Волошкіна, Л.О. Василенко**

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

## **ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ ДЛЯ ДООЧИСТКИ ПИТНОЇ ВОДИ**

**Анотація.** В статті розглянуто проблему чистої води, яка стосується і України, що належить до держав з обмеженою кількістю водних ресурсів та високим рівнем їх використання. Обґрунтовано, що відхилення від норм якості води, як поверхневих, так і підземних джерел, сягають 70–80%. Майже третина населення сіл і міст сільського типу України споживає воду із колодязів та свердловин, вода в яких визнана практично непридатною до вживання, особливо за нітратними показниками, що здатні чинити негативний вплив на здоров'я людини. Надано порівняльну оцінку нормативних документів Державні санітарні норми і правила 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до питної води, призначеної для споживання людиною» та ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості», що діють на території України, та Директиви Ради 98/83/ЄС, якою регулюються показники якості води на міжнародному рівні. Розглянуто сучасні погляди на структуру питної води як розбавленого водного розчину, де вода представлена у вигляді гігантських гетерофазних кластерів і, виходячи з цього, дано визначення термінам «підготовлена питна вода» та «природна питна вода». Окреслено проблему оптимального коригування якісного і кількісного складу питної води, яка в сучасному світі вирішується методами доочистки води на локальному рівні. Показано, що за принципом роботи побутові водоочищувачі можна розподілити на 4 основні групи, а саме: установки, що мають механічний фільтруючий елемент; побутові фільтри сорбційного типу; установки електрохімічного типу та установки мембранного типу на основі процесу зворотного осмосу, які широко представлені сьогодні на світовому ринку та активно використовуються на локальному рівні (квартири, будинки, дитячі садки, школи), але мають ряд особливостей та недоліків. Представлено механізм протікання процесів в системі «вихідна вода – мембрана – підготовлена питна вода» з окресленими його складовими. Розглянуто наслідки використання зворотноосмотичних установок при доочистці питної води на прикладі водопровідної води, яка пройшла очистку на установці з мембранним елементом TW30-1812-50 виробництва компанії DOW Chemical (США) при робочому тискові 18 атм. Наведені результати зміни кількісного і якісного складу води, а саме її фундаментальних компонентів, в результаті доочистки зворотним осмосом. Обґрунтовано технологічні та економічні недоліки зворотноосмотичних установок. Підтверджено, що метод зворотного осмосу застосовується для демінералізації води та здатен затримувати практично всі іони на 92–99%, а при двоступеневій системі очистки – і до 99,9%, тобто підготовлена зворотним осмосом вода очищена практично від всіх мінеральних солей, в тому числі корисних та необхідних для нормальної життєдіяльності людини.

**Ключові слова:** питна вода; екологічна безпека; якість питної води; методи очистки води; зворотний осмос; мембрана; недоліки зворотного осмосу

**DOI:** <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.32-45>

## Вступ

Однією із першочергових проблем сьогодення, що стоїть перед людством поряд із глобальним потеплінням, зменшенням біорізноманітності, нестачею продовольства, перенаселенням, військовими конфліктами, є проблема наявності чистої питної води відповідної якості та в достатній кількості.

Водні ресурси нашої планети складають близько 1,5 млрд км<sup>3</sup>. Однак, з них 98% належать солоним водам Світового океану і лише 28 млн км<sup>3</sup> складають прісні води. Хоча, завдяки технологічним можливостям опріснення солоних морських вод, води океанів і солоних озер, їх можна розглядати як потенційні водні ресурси, використання яких у майбутньому є цілком можливим і навіть перспективним.

Людина постійно взаємодіє з навколишнім природним середовищем та намагається перетворити умови свого існування на більш безпечні та захищені від природних загроз, а також на більш соціально-економічно та матеріально вигідні. Така взаємодія паралельно супроводжується постійним зростанням антропогенного навантаження на навколишнє природне середовище, в тому числі і на гідросферу.

Демографічний вибух та зумовлене науково-технічним прогресом підвищення інтенсивності водокористування, поряд із глобальними кліматичними змінами на нашій планеті, являються чинниками, що створюють значний тиск на водні ресурси у планетарному масштабі. Розвиток промислового та сільськогосподарського виробництва, стрімка урбанізація та інтенсифікація використання водних ресурсів, неефективне очищення стічних вод є важливими антропогенними чинниками, які зумовлюють погіршення якості природних вод [1].

Не менш важливою є проблема нестачі якісної питної води і в Україні, яка належить до держав з обмеженою кількістю водних ресурсів та високим рівнем їх використання.

Споживання неякісної питної води може викликати різноманітні захворювання, в тому числі дуже серйозні. При вживанні такої води виникає загроза таких захворювань, як холера, дизентерія, бруцельоз, черевний тиф, псевдотуберкульоз, а також чума та туляремія. Наявність високоякісної питної води в кількості, що задовольняє основні потреби людини, є однією з умов зміцнення здоров'я людей і сталого розвитку держави. Будь-яке недотримання стандарту якості питної води може призвести до несприятливих, як короткострокових, так і довгострокових, наслідків для здоров'я і благополуччя населення. Країни, де якість питної води відповідає міжнародним стандартам, мають більш високий показник тривалості життя, в порівнянні з показником смертності. А показник захворюваності – значно нижчий, ніж в тих країнах, де питна вода є забрудненою.

## Основний матеріал

За даними ООН, Україна посідає 95-те місце серед 112 країн світу за рейтингом якості питних джерел. Щодо запасів місцевих водних ресурсів (1 тис. м<sup>3</sup> на 1 особу) Україна вважається однією з найменш забезпечених країн в Європі (в порівнянні, наприклад, Швеція, Німеччина – по 2,5 тис. м<sup>3</sup>, Великобританія – 5 тис. м<sup>3</sup>, Франція – 3,5 тис. м<sup>3</sup>, європейська частина колишнього СРСР –

5,9 тис. м<sup>3</sup>). У маловодні роки на території України формується лише 52,4 км<sup>3</sup>/рік стоку, тобто на одну людину припадає близько 1 тис. м<sup>3</sup>. За визначенням Європейської економічної комісії ООН, держава, водні ресурси якої не перевищують 1,7 тис. м<sup>3</sup> стоку на рік на одну людину, вважається не забезпеченою водою. У Канаді ця величина дорівнює 94,3 тис. м<sup>3</sup>, у Росії – 31,0 тис. м<sup>3</sup>, у Швеції – 19,7 тис. м<sup>3</sup>, у США – 7,4 тис. м<sup>3</sup>, у Білорусі – 5,7 тис. м<sup>3</sup>, у Франції – 3,4 тис. м<sup>3</sup>, в Англії – 2,5 тис. м<sup>3</sup>, у Німеччині – 1,9 тис. м<sup>3</sup>, у Польщі – 1,6 тис. м<sup>3</sup>. Тому серед 152 країн світу Україна за цим показником посідає 111-те місце [2].

Гостро стоїть разом з недостатньою кількістю і проблема якості води. Аналіз стану якості води в промислово розвинутих регіонах України, здійснений Всеукраїнською екологічною лігою, показав, що відхилення якості води від норми сягають 70–80%, а близько 70% населення України використовує для питних потреб воду із Дніпра та його приток, яка часто не відповідає нормам джерел водопостачання.

За даними Українського державного науково-дослідного інституту "УкрВОДГЕО", визначено 290 різних джерел забруднення підземних вод. Майже третина населення сіл і міст сільського типу України споживає воду із колодязів та свердловин, які розташовані поблизу промислових центрів, військових баз, складів сільськогосподарської продукції і вода в яких визнана практично непридатною до вживання [3].

Здоров'я людини значною мірою залежить саме від якості води, яку вона споживає. За даними ЮНЕСКО, Україна посідає 146-те місце в світі за середньою тривалістю життя (65,98 років). Вплив якості питної води на здоров'я людини залежить від низки факторів. По-перше, як підземні, так і поверхневі води у багатьох регіонах України за своїми фізико-хімічними показниками не відповідають вимогам стандарту на питну воду, що пов'язано не лише з природними умовами їх формування, а насамперед з антропогенним забрудненням, що викликає потребу їх очищення [4].

Особливо значною проблемою є зростання нітратного забруднення ґрунтових вод в сільській місцевості. В Україні 5,7 млн містян та 11,7 млн сільського населення споживають воду із колодязів та індивідуальних свердловин, що живляться ґрунтовими водами. У переважній більшості ці водні джерела знаходяться у незадовільному стані. В останні роки спостерігається зростання антропогенного забруднення нітратами ґрунтових вод, які без очищення споживає населення у сільській місцевості.

Ефективних методів видалення нітратів з води в умовах децентралізованого водопостачання практично не існує. Забруднення води понаднормативними концентраціями нітратів призводить до виникнення захворювання на водно-нітратну метгемоглобінемію у дітей, зниження загальної резистентності організму, що сприяє збільшенню рівня загальної захворюваності, в тому числі інфекційними та онкологічними хворобами. Відмічається зростання нітратного забруднення ґрунтових вод внаслідок ненормованого використання в колективних господарствах та у приватному секторі мінеральних та, особливо, органічних добрив.

Невдосконалені технології очистки забруднених вод, які суттєво не змінювалися протягом століть, незадовільний санітарно-технічний стан водопровідних споруд і мереж, відсоток їх зношеності, що становить у різних регіонах від 30% до 70%, несвоєчасні проведення капітальних та поточних

планово-профілактичних ремонтів вносять свій вагомий вклад в дану проблему. Тому досить актуальні сьогодні пошуки нових підходів і розробка нових ефективних технологій питного водопостачання.

На сьогоднішній день важко сказати, що таке «якісна питна вода» і якими конкретними границями, в залежності від якісного і кількісного складу, це поняття визначається.

В джерелах літератури поняття «питна вода» – це вода, склад якої за органолептичними, фізико-хімічними, мікробіологічними, паразитологічними та радіаційними показниками відповідає вимогам державних стандартів та законодавства санітарного стану, призначена для забезпечення фізіологічних, санітарно-гігієнічних, побутових та господарських потреб населення, а також для виробництва харчової продукції і, особливо, продукції дитячого харчування [5].

Ці показники регулюються як на міжнародному рівні Директивою Ради 98/83/ЄС [6], так і на державному рівні. Зокрема, в Україні діють Державні санітарні норми і правила 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до питної води, призначеної для споживання людиною», затверджені наказом Міністерства охорони здоров'я України від 12.05.2010 № 400 [5] та ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості» [7].

На основі результатів проведених наукових досліджень [8] зроблено висновок, що вищезгадані нормативні документи [5, 7] в повному обсязі не враховують деякі положення міжнародних стандартів, хоча, згідно з Угодою про асоціацію між Україною, з одного боку, і Європейським Союзом та Європейською спільнотою з атомної енергії, з іншого боку, діючий ДСТУ 7525:2014 повинен враховувати основні вимоги Директиви Ради 98/83/ЄС. Крім того, документом ДСанПін 2.2.4-171-10 диференціюються вимоги до водопровідної води, води з колодязів та фасованої води, на відміну від Директиви Ради 98/83/ЄС, яка встановлює єдині загальні вимоги до показників якості питної води, що є більш правильно, оскільки основні мінімальні вимоги до якості питної води повинні бути однаковими незалежно від джерела водопостачання.

Якісні показники рідкої води дуже залежать від її структури, яка є нестійкою, тому різні зовнішні впливи часто приводять до її зміни і, як наслідок, зміни фізико-хімічних властивостей води. Такий стан метастабільний, так як після усунення причин, які його викликають, вода з тою чи іншою швидкістю повертається до свого попереднього стану.

Останні дослідження в області структури води [9–11] свідчать про існування у воді гігантських (до 0,1 мм) впорядкованих структур – субмолекулярних комплексів, які були названі академіком В.В. Гончаруком «гігантськими гетерофазними кластерами води (ГГКВ)» [9].

Виходячи з таких новітніх знань про структуру води, можна інтерпретувати поняття «природна питна вода» і «підготовлена питна вода», розглядаючи їх як розбавлені водні розчини. Тоді формулювання цих термінів буде мати наступний вигляд.

Природна питна вода – це еволюційно сформовані джерела водопостачання, які являють собою відкриті динамічні структурно-складні системи, в яких стаціонарний стан легко порушується при будь-якому зовнішньому впливові з виникненням в таких системах перехідних станів, які характеризуються зміною структурних властивостей та, внаслідок

саморегуляції, можуть повернутися у вихідний стан або перейти в новий стаціонарний стан, а поява нової структури може розглядатися як нерівноважно фазовий перехід [12].

Підготовлена питна вода – відкриті динамічні структурно-складні кластерні системи структурованих розбавлених водних розчинів зі строго збалансованим якісним і кількісним складом та співвідношенням природних компонентів, рН середовища, які повинні бути піддані впливу енергетичних полів чи природних мінералів та біоадаптовані шляхом повільної фільтрації через фільтр з іммобілізованими на його наповнювачах пробіотичними бактеріями [12, 13].

Аналізуючи все вищесказане, постає проблема оптимального коригування якісного і кількісного складу питної води, яка в сучасному світі вирішується методами доочистки води на локальному рівні, тобто безпосередньо в місцях споживання за допомогою водоочисних систем побутового або колективного призначення.

За принципом роботи побутові водоочищувачі можна розподілити на 4 основні групи:

- установки, що мають тільки механічний фільтруючий елемент;
- установки сорбційного типу на основі активованого вугілля, активованого вугілля в комбінації з іонообмінними смолами, цеолітів та шунгітів;
- установки електрохімічного типу;
- установки мембранного та мембранно-сорбційного типу [14].

Фільтри механічної очистки води використовуються для побутових потреб та призначені лише для видалення різноманітних крупних домішок, зважених частинок, великих молекул органічних речовин, піску, іржі, суспензій тощо, які залишаються на сітці фільтра грубої очистки.

В якості матеріалу у фільтрах механічної фільтрації використовується, зазвичай, поліпропіленове волокно у вигляді блоку картриджа, який підлягає заміні після закінчення його експлуатаційних можливостей.

Установки сорбційного типу використовуються у водопідготовці для освітлення води і поліпшення її органолептичних якостей, видалення органічних речовин, солей важких металів, дехлорування, шляхом видалення розчинених органічних речовин і газів.

Сорбційним матеріалом для завантаження водоочисних фільтрів найчастіше служить активоване вугілля самостійно або у поєднанні з волокнистим (поліпропіленовим) механічним фільтром. Окрім активованого вугілля, у фільтрах можуть використовуватися й інші сорбційні матеріали (мінеральні, органічні, природні та штучні), що відрізняються за селективністю дії та сорбційною ємністю, фізико-механічними, хімічними та іншими властивостями [14].

У побутових ємнісних фільтрах (як наприклад, «Аквафор», «Бріта» та «Бар'єр») у якості завантаження картриджа найчастіше використовується поєднання активованого вугілля з іонообмінними смолами, які використовують для пом'якшення води завдяки своїй властивості обмінювати власні іони на іони розчину.

Щодо ефективності роботи таких фільтрів, то, згідно з науковими дослідженнями [14], найкращі результати з ефективністю у 100% на всіх водоочищувачах досягаються за органолептичними показниками (запах,

присмак, каламутність). Ступінь видалення з води на фільтрах заліза знаходиться в межах 62–76%, солей жорсткості – 50–69%. Відмічається селективність дії фільтрів до солей важких металів, зокрема до цинку, вміст якого у воді знижується на 88–98%. Ефективність водоочищувачів щодо інших показників якості води (хлориди, сульфати, нітрати, хлороформ) знаходиться в межах 50%, тобто побутові ємнісні фільтри покращують в основному загальні якості води, не коригуючи при цьому основне – фізико-хімічний склад на молекулярному рівні. Також іонообмінні фільтри потребують постійної регенерації іонів та відносно великих витрат дорогих реагентів.

Крім найбільш поширених побутових фільтрів очистки води на основі сорбційних методів чи іонного обміну, є побутові водоочисні системи, в яких використовуються електрохімічні методи або їх комбінації з іншими методами. Найпоширенішим методом в таких водоочищувачах є метод електролізу. За допомогою електричного струму вода розкладається на кисень і водень, в результаті чого руйнуються органічні речовини, відбувається видалення важких металів та інших неорганічних речовин.

Як свідчать отримані дані [14], електрохімічна доочистка водопровідної води забезпечує ефективне видалення солей жорсткості, заліза, міді. Інші показники мінерального складу питної води (загальна мінералізація, сульфати, нітрати, а також органічні речовини) видаляються менш ефективно (в межах 10–30%). Тому застосування таких фільтрів є ефективним та раціональним лише у тих регіонах, де водопровідна вода має значні відхилення від нормативів за показниками загальної жорсткості та заліза.

Із сучасних технологій очистки води найбільшого розвитку і поширення на сьогодні отримали установки на основі баромембранних методів, зокрема методу зворотного осмосу, який є економічно привабливим і широко використовуваним на всіх рівнях, особливо локальному (дитячі садки, школи, готелі, окремі будинки та квартири). Досить розповсюджено метод зворотного осмосу використовується в основі модуля підготовки води, що входить до загальної технологічної схеми автоматів очистки води для систем самообслуговування, які є дуже поширені у громадських місцях та організаціях. Проте постає ряд невирішених питань та особливостей, що стосуються саме доочистки питної води методом зворотного осмосу.

Здійснення процесу зворотного осмосу потребує двох основних умов: наявності багатшарової, композитної, полімерної мембрани, яка включає підложку, шар гідрофобного полімеру й активні шари, та підтримки відповідної різниці тиску з обох боків мембрани, причому з можливістю точного вимірювання значень тиску і зменшення явища концентраційної поляризації.

В установках зворотного осмосу використовуються ацетат-целюлозні, поліамідні, композитні тонкоплівкові мембрани, які формують світовий ринок, в основному за рахунок продукції відомих фірм країн Заходу і Японії, таких як Filmtec, Hydranautics, Nitto Denko, Toray Inc, Koch Membrane Systems.

Оскільки мембрани чутливі до забруднення в результаті відкладень малорозчинних солей і мікрочастинок на їх поверхні, то для запобігання цьому практично в усіх водоочисних установках перед зворотноосмотичною мембраною обов'язково встановлюють попередній фільтр, який поєднує механічну та сорбційну очистку, що дозволяє значно продовжити термін основного циклу роботи мембрани до циклу її відновлення.

Механізм протікання процесу зворотного осмосу в системі «вихідна вода – мембрана – підготовлена питна вода» зображено на рисунку 1.

Основними складовими механізму протікання зворотного осмосу є:

1 – рушійна сила процесу у вигляді прикладеного тиску в межах 0...60 атм, який забезпечує сумісне протікання процесів фільтрації і теоретичної їх основи;

2 – вихідна вода, яка потребує коригування фізико-хімічного складу;

3 – поверхневий шар води, що втратила свою властивість розчинності;

4 – поліамідний шар з водою в об'ємі мембрани;

5 – шар полісульфону на поверхні підложки мембрани;

6 – шар полісульфону в об'ємі підложки мембрани;

7 – підготовлена (питна) вода, фізико-хімічний склад якої скоригований мембраною;

8 – вихід підготовленої (питної) води.

Згідно з представленим механізмом, протікання процесу зворотного осмосу полягає в тому, що рушійною силою є прикладений тиск, який забезпечує фільтрацію, а мембрана, завдяки своїй універсальній селективності, видаляє компоненти розбавленого водного розчину і створює, внаслідок своєї структури, опір фільтрації.

Однак і в такого ефективного та перспективного методу підготовки питної води, як зворотний осмос, існує ряд недоліків, причому деякі з них мають серйозний характер, так як справляють безпосередній вплив на життєдіяльність та здоров'я людини.

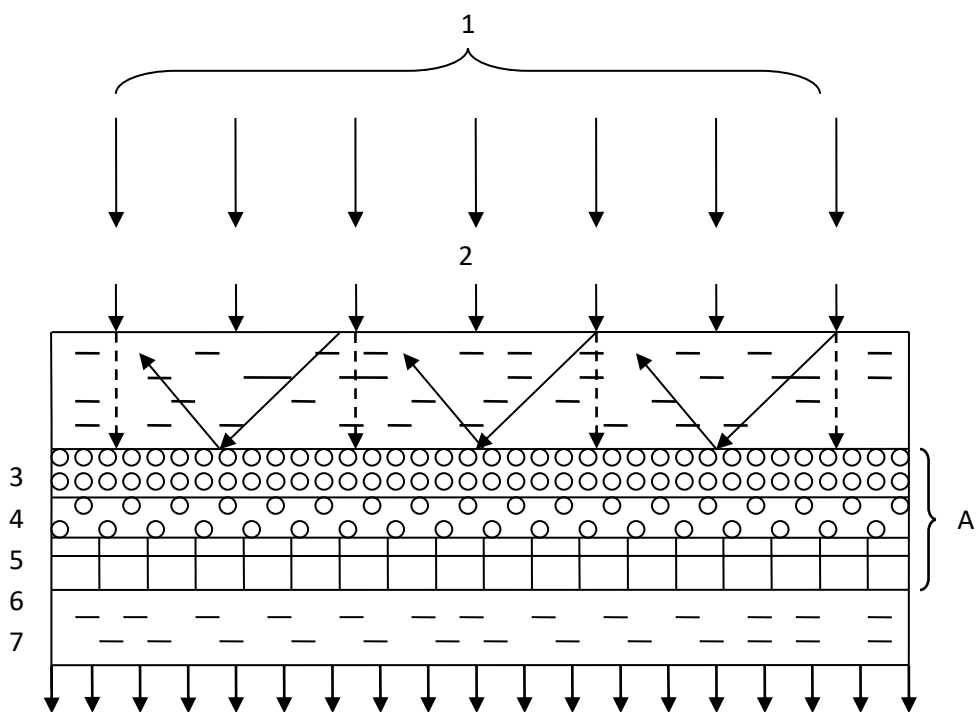


Рис. 1 – Механізм протікання процесів в системі «вихідна вода – мембрана – підготовлена питна вода»



По-перше, невеликі за розміром пори мембрани здатні затримувати частки більших розмірів, такі як солі жорсткості, нітрати, сульфати, але пропускають такі небезпечні хімічні речовини, як пестициди, гербіциди, хлор, які молекулярно менше води. Ці хімічні речовини можуть вільно проходити через пористу мембрану. Тому в якості додаткової стадії очистки води для забезпечення безпеки питної води в процесі зворотного осмосу повинен використовуватися фільтр сорбційного типу.

Зворотний осмос також витрачає велику кількість води, яка проходить через його систему. Зазвичай у побутовій зворотноосмотичній установці забирається біля 9–13 літрів води на кожен літр очищеної води. Також, у порівнянні з іншими альтернативними методами очистки води, зворотний осмос є досить повільним процесом, що використовує резервуар для зберігання води, який повинен бути ретельно очищений, щоб не стати живильним середовищем для бактерій та інших мікроорганізмів.

Проте, як свідчать наведені в таблиці 1 дані, в результаті доочищення водопровідної води методом зворотного осмосу з використанням мембрани американської фірми Filmtec типу TW30-1812-50, при робочому тискові 18 атм повністю зникає запах, присмак, колірність та каламутність, загальна жорсткість знижується на 90–94%, вміст заліза – практично на 100%. Концентрації і співвідношення фундаментальних компонентів питної води  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{Mg}^{2+}$  вирівнялися майже до 1:1 (в середньому 4,0 і 4,0 мг/дм<sup>3</sup>). Селективність мембрани по відношенню до сульфатів склала 25%. Важливим результатом є збільшення значення перманганатної окислюваності в перших пробах, що є наслідком вимивання органічних речовин з мембрани, що входять в основу її складових.

Таблиця 1 – Зміна показників водопровідної води з часом після зворотного осмосу на мембрані Filmtec типу TW30-1812-50 при тиску P = 18 атм

Показники	Вихідна вода (водопровідна вода, профільтрована через активоване вугілля типу АГ)	Вода після зворотного осмосу P = 18 атм, мембрана Filmtec	ДСанПіН 2.2.4-171-10 [5]	Директива Ради ЄС 98/83 від 03.11.1998 [6]
1	2	3	4	5
Каламутність, мг/дм <sup>3</sup>	0,5	Відс.	<= 1,0	
Колірність, град	13,0	Відс.	<= 20	
Водневий показник рН	7,62	5,53	6,5–8,5	≥ 6,5 та ≤ 9,5
Лужність (НСО <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), мг/дм <sup>3</sup>	161,0	48,8		
Сульфати (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ), мг/дм <sup>3</sup>	110,4	83,2	<= 250	<= 250
Хлориди (Cl <sup>-</sup> ), мг/дм <sup>3</sup>	32,0	14,2	<= 250	<= 0,25
Жорсткість загальна, мг-екв/дм <sup>3</sup>	4,32	0,43	<= 7,0	<= 1,2

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5
Магній ( $Mg^{2+}$ ), мг/дм <sup>3</sup>	12,64	4,0		$\leq 50$
Кальцій ( $Ca^{2+}$ ), мг/дм <sup>3</sup>	65,7	4,0		$\leq 100$
Залізо ( $Fe^{3+}$ ), мг/дм <sup>3</sup>	0,15	0,002	$\leq 0,2$	$\leq 0,2$
Нітрати ( $NO_3^-$ ), мг/дм <sup>3</sup>	Відс.	Відс.	$\leq 50,0$	$\leq 50,0$
Нітрити ( $NO_2^-$ ), мг/дм <sup>3</sup>	Відс.	Відс.	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$
Азот амонійний ( $NH_4^+$ ), мг/дм <sup>3</sup>	Відс.	Відс.	$\leq 0,5$	$\leq 0,0005$
Окислюваність ( $KMnO_4$ ), мг/дм <sup>3</sup>	1,36	2,24	$\leq 5,0$	$\leq 5,0$
Мінералізація загальна, мг/дм <sup>3</sup>	301,2	129,8	$\leq 1000$	

Таким чином, вода після зворотного осмосу піддалась настільки глибокій очистці, що позбавилась практично всіх мінеральних солей, в тому числі корисних і необхідних для нормальної життєдіяльності людини.

В діючому на території України з 2010 року документі, який регламентує якість питної води [5], окрім вимог до якості, представлені ще й показники фізіологічної повноцінності мінерального складу питної води і нормативи з вмісту компонентів, які його характеризують. Це дозволяє говорити про оптимальний склад питної води. Разом з тим, слід відмітити, що ці положення стандарту носять лише рекомендаційний характер. В разі перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) будь-якої речовини виникає загроза для здоров'я. Але погано й інше – коли концентрація якого-небудь елементу менша, ніж його необхідно для нормального функціонування організму.

На думку фахівців Всесвітньої Організації Охорони Здоров'я (ВООЗ), вода після зворотного осмосу – це вода для «приготування їжі, напоїв і для технічних цілей», але ніяк не вода для пиття. Ще в середині сімдесятих років минулого століття, ВООЗ ухвалила ряд документів, згідно з якими демінералізована вода, яку спочатку отримували методом дистиляції, а потім методом зворотного осмосу, повинна використовуватися для промислових, технічних і лабораторних цілей. В даному випадку під демінералізованою водою мається на увазі вода, яка повністю або майже повністю звільнена від розчинених мінералів різними методами (дистиляція, деіонізація, мембранна фільтрація, яка включає зворотний осмос). Оброблена будь-яким таким методом природна питна вода не придатна для вживання у якості питної без додаткового збагачення її мінеральними компонентами [15].

Давно доведено, що ряд природних (неорганічних) компонентів, присутніх у природній питній воді, важливі для організму людини. Згідно з даними ВООЗ можливі наслідки від вживання води, збідненої мінеральними компонентами, можна розділити на такі категорії [15]:

– безпосередній вплив на слизову оболонку кишківника, метаболізм і гомеостаз мінеральних речовин та на інші функції організму;

- недостатність або відсутність надходження кальцію і магнію;
- недостатнє надходження інших макро- і мікроелементів;
- втрата кальцію, магнію та інших мікроелементів в процесі приготування їжі;
- можливе накопичення в організмі токсичних металів.

Вода з низьким значенням мінералізації нестабільна і, як наслідок, проявляє високу агресивність по відношенню до речовин, з якими вона контактує. Така вода легше розчиняє метали і деякі органічні компоненти труб, ємностей, шлангів, вторинно забруднюючись, таким чином, різними токсичними елементами. Людина, яка вживає питну воду, збіднену мінеральними речовинами, завжди більше наражається на небезпеку впливу токсичних речовин, ніж та, яка вживає воду середньої жорсткості і мінералізації.

## **Висновки**

Якість питної води відноситься до важливого фактору екологічної безпеки, а, відповідно, і національної безпеки України. З розвитком цивілізації та науково-технічного прогресу постійно зростає загроза екологічній безпеці для всієї планети. Зокрема, це стосується і забруднення гідросфери, наслідками якого є порушення екобезпеки життєдіяльності та здоров'я людини, що обумовлено, в першу чергу, якісним і кількісним складом питної води та процесами, що в ній протікають.

Людство з розвитком цивілізації та внаслідок антропогенної діяльності забруднило всі поверхневі води, а тепер намагається змінити катастрофічну ситуацію з питною водою шляхом застосування різних методів очистки. На жаль, відновити екологічну чистоту природної води практично неможливо через низку принципівих причин, а застосування різноманітних установок з очистки води, вибір яких на сьогодні є дуже великий, не здатне повернути воді її природну якість із фізико-хімічним складом, що повністю задовольняє фізіологічні потреби людини.

Метод зворотного осмосу отримав найбільше розповсюдження серед методів доочистки води. Він застосовується для демінералізації води та здатен затримувати практично всі іони на 92–99%, а при двоступеневій системі – і до 99,9%. Проте застосування побутових мембранних фільтрів на локальному рівні, наприклад, для доочищення водопровідної води, яка не потребує поліпшення за показниками сухого залишку, хлоридів, сульфатів тощо, є недоцільним, оскільки в результаті цього отримується питна вода, що за своїм мінеральним складом не відповідає фізіологічній повноцінності та при тривалому споживанні може негативно впливати на стан здоров'я людини. Наприклад, в м. Києві немає потреби у використанні таких фільтрів для доочищення питної води, оскільки її мінералізація знаходиться в межах оптимальних значень. Для поліпшення якості питної води, що містить в собі підвищений вміст органічних речовин, достатньо використання фільтрів на основі сорбційних або сорбційно-іонообмінних методів.

Крім заходів з покращення якості води міських мереж, можна зазначити рекомендації використовувати побутові фільтри для підтримки якості води у власних квартирах.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Снітинський В. В. Сучасний стан та екологічні проблеми водних ресурсів України [Електронний ресурс] / В. В. Снітинський, Г. Л. Антоняк, Т. В. Багдай, О. Є. Бубис, Н. Є. Панас // Науково-технічний журнал: журнал агробіології та екології. – 2014. – Том 4, № 1. – С. 9–16. – Режим доступу до ресурсу: <http://lnau.lviv.ua/lnau/files/visnuku/jurnal%20агробіології%20та%20екології.pdf#page=11>. – Дата звернення: 06.06.2021.
2. Лотоцька О. В. Гігієнічні проблеми водопостачання у Тернопільській області [Електронний ресурс] / О. В. Лотоцька, В. А. Кондратюк, В. О. Паничев // Довкілля та здоров'я. – 2018. – №1 (85). – С. 36–40. – Режим доступу до ресурсу: <https://cyberleninka.ru/article/n/gigienichni-problemi-vodopostachannya-u-ternopilskiy-oblasti/viewer>. – Дата звернення: 08.06.2021.
3. Проблема питної води в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://awtherm.com.ua/problem-a-pitnoyi-vodi-v-ukrayini/>. – Дата звернення: 18.06.2021.
4. Лотоцька О. В. Якість питної води як одна з детермінант громадського здоров'я в Західному регіоні України / О. В. Лотоцька, В. А. Кондратюк, С. В. Кучер // Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України. – 2019. – № 1 (79). – С. 12–18.
5. ДСанПіН 2.2.4-171-10 (ДСанПіН 2.2.4-400-10). Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною: затверджено Наказом Міністерства охорони здоров'я України № 400 від 12.05.2010 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>. – Дата звернення: 18.06.2021.
6. On the quality of water intended for human consumption: Council Directive 98/83/EU of 3 November 1998 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_963#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_963#Text). – Дата звернення: 21.06.2021.
7. ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/1-10672-dstu\\_voda\\_pytna.pdf](https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/1-10672-dstu_voda_pytna.pdf). – Дата звернення: 21.06.2021.
8. Yermolenko V. Quality of drinking water in rural areas: problems of legal environment / V. Yermolenko, O. Hafurova, M. Deineha, T. Novak, A. Temnikova, E. Naidansuren // Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2021), Volume 280, 2021 / <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128009022>. – P. 1–6.
9. Гончарук В. В. Кластеры и гигантские гетерофазные кластеры воды [Електронний ресурс] / В. В. Гончарук, В. Н. Смирнов, А. В. Сыроешкин, В. В. Маляренко // Химия и технология воды. – 2007. – Т. 29, № 1. – С. 3–17. – Режим доступу: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/5492/01-Goncharuk.pdf?sequence=1>. – Дата звернення: 03.07.2021.
10. Смирнов А. Н. Структура воды: гигантские гетерофазные кластеры воды / А. Н. Смирнов, В. Б. Лапшин, А. В. Балышев, И. М. Лебедев, В. В. Гончарук, А. В. Сыроешкин // Химия и технология воды. – 2005. – № 2. – С. 11–37.
11. Сыроешкин А. В. Вода как гетерогенная структура / А. В. Сыроешкин, А. Н. Смирнов, В. В. Гончарук, Е. В. Успенская, Г. М. Николаев, Н. И. Попов, Т. В. Кармазина, А. О. Самсоны-Тодоров, В. В. Маляренко, В. Б. Лапшин // Электр. ж-л.: Исследовано в России. – 2006. – С. 843–854.
12. Kravchenko M. Preparation of quality drinking water as a basis of the environmental safety and human health / M. Kravchenko // Environmental problems: Scientific journal. – Lviv, Ukraine: LPNU, 2016. – Volume 1, number 1. – P. 57–60. – Bibliography: 12 titles.
13. Гвоздяк П. І. Методи водопідготовки: імперативи еволюції та біохімія води / П. І. Гвоздяк // Вісник НАНУ. – 2010, №2. – С. 14–17.
14. Прокопов В. О. Досвід використання в Україні побутових фільтрів для доочищення водопровідної питної води [Електронний ресурс] / В. О. Прокопов, О. Б. Липовецька // Гігієна населених місць. – 2013. – № 62. – С. 68–80. – Режим доступу:

file:///C:/Users/admin/Downloads/gnm\_2013\_62\_15%20(1).pdf. – Дата звернення: 13.07.2021.

15. Курик М. В. Критерии качества питьевой воды. Физика сознания и жизни, космология и астрофизика воды [Электронный ресурс]. – 2012. – №3. – С. 5–8. Режим доступа: file:///C:/Users/admin/Downloads/104-Article%20Text-111-1-10-20151110.pdf. – Дата звернення: 13.07.2021.

Стаття надійшла до редакції 13.05.2021 і прийнята до друку після рецензування 30.09.2021

## REFERENCES

1. Snitinskiy, V. V., Antonyak, G. L., Bagday, T. V., Bubis, O. J., & Panas, N. J. (2014). Current state of ecological problems of water resources of Ukraine. *Science and Technology Journal: Journal of Agrobiology and Ecology (Ukraine)*, 4 (1), 9-16. Retrieved June 06, 2021, from <http://lnau.lviv.ua/lnau/files/visnuku/jurnal%20агробіології%20та%20екології.pdf#page=112>
2. Lototska, O. V., Kondratyuk, V. A., & Panichev, V. O. (2018). Hygienic problems of water supply in Ternopil region. *Environment and health (Ukraine)*, 1(85), 36-40. Retrieved June 08, 2021, from <https://cyberleninka.ru/article/n/gigienichni-problemi-vodopostachannya-u-ternopilskiy-oblasti/viewer>.
3. The problem of drinking water in Ukraine. Retrieved June 18, 2021 from: <https://aw-therm.com.ua/problema-pitnoyi-vodi-v-ukrayini/> (in Ukrainian).
4. Lototska, O. V., Kondratyuk, V. A., & Kucher, S. V. (2019). Quality of drinking water as one of the determinants of public health in the Western region of Ukraine. *Bulletin of social hygiene and health care organizations of Ukraine (Ukraine)*, 1(79), 12-18 (in Ukrainian).
5. Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption: DSanPiN 2.2.4-171-10 (2010). Kyiv: Ministry of Health of Ukraine (in Ukrainian).
6. On the quality of water intended for human consumption: Council Directive 98/83/EU of 3 November 1998. European Council.
7. Drinking water. Requirements and methods of quality control: DSTU 7525: 2014 (2014). Kyiv: Institute of Colloid Chemistry and Water Chemistry A.V. Dumansky NAS of Ukraine (in Ukrainian).
8. Yermolenko, V., Hafurova, O., Deineha M., Novak T., Temnikova A., & Naidansuren E. (2021). Quality of drinking water in rural areas: problems of legal environment. In *Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (Ukraine)*, 280, 1-6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128009022>
9. Goncharuk, V. V., Smirnov, V. N., Syroeshkin, A. V., & Malyarenko, V. V. (2007). Clusters and giant heterophase water clusters. *Chemistry and Technology of Water*, 29(1), 3-17. Retrieved July 3, 2021, from <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/5492/01-Goncharuk.pdf?sequence=1>.
10. Smirnov, A. N., Lapshin, V. B., Balyshv, A. V., Lebedev, I. M., Goncharuk, V. V., & Syroeshkin, A. V. (2005). Water structure: giant heterophase water clusters. *Chemistry and technology of water (Ukraine)*, 2, 11-37.
11. Syroeshkin, A. V., Smirnov, A. N., Goncharuk, V. V., Uspenskaya, E. V., Nikolaev, G. M., Popov, N. I. et al. (2006). Water as a heterogeneous structure. *Elektr. zh-l.: Researched in Russia*, 843-854 (in Russian).
12. Kravchenko, M. (2016). Preparation of quality drinking water as a basis of the environmental safety and human health. *Environmental problems: Scientific journal (Ukraine)*, 1(1), 57-60.
13. Gvozdyak, P. I. (2010). Methods of water preparation: imperatives of evolution and biochemistry of water. *Visnyk of NASU (Ukraine)*, 2, 14-17.

14. Prokopov, V. O., & Lipovetskaya, O. B. (2013). Experience of using household filters in Ukraine for additional treatment of tap drinking water. *Hygiene of populated areas (Ukraine)*, 62, 68-80. Retrieved July 13, 2021, from file:///C:/Users/admin/Downloads/gnm\_2013\_62\_15%20(1).pdf.
15. Kurik, M. V. (2012). Criteria for the quality of drinking water. *Physics of consciousness and life, cosmology and astrophysics of water*, 3, 5-8. Retrieved July 13, 2021, from file:///C:/Users/admin/Downloads/104-Article%20Text-111-1-10-20151110.pdf (in Ukrainian).

*The article was received 13.05.2021 and was accepted after revision 30.09.2021*

**Кравченко Марина Василівна**

кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва і архітектури

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31

ORCID ID: 0000-0003-0428-6440 **e-mail:** marina-diek@ukr.net

**Волошкіна Олена Семенівна**

доктор технічних наук, професор кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва і архітектури

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31

ORCID ID: 0000-0002-3671-4449 **e-mail:** e.voloshki@gmail.com

**Василенко Леся Олексіївна**

кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва і архітектури

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31

**e-mail:** lesya.kiev@ukr.net

УДК 628.4

**Roman O. Hlushchenko**, Post-Graduate

ORCID ID: 0000-0003-2863-1480 *e-mail*: gr2017inc@gmail.com

**Tetiana M. Tkachenko**, Dr Hab., Professor, Senior Researcher, Head of the Department of Labour and Environment Protection

ORCID ID: 0000-0003-2105-5951 *e-mail*: tkachenkoknuba@gmail.com

**Viktor O. Mileikovskiy**, Dr Hab., Professor, Senior Researcher, Professor of Heat-Gas Supply and Ventilation Department

ORCID ID: 0000-0003-2105-5951 *e-mail*: v\_mil@ukr.net

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

## **EFFECTIVE DRAINAGE OF RAINWATER FROM ROADS BY RAIN GARDEN-STRIPS IN THE CONCEPT OF THE CITY-SPONGE**

***Abstract.** Today there is a problem of flooding of urban areas with rainwater and their slow drainage to rainwater sewage and further to the distribution collectors. There are several ways to ensure the resilience of urban areas to heavy rains and downpours. One of the current methods is "green" roofs (horizontal or sloping) with green plantings, which is capable to absorb water. A certain amount of water is absorbed by the plants, its certain amount remains in the substratum, and the rest is filtered by several layers of the structure under the plants, which throttles the movement of it to the storm-water sewage. The second method is to collect rainwater in special storage tanks, which are located on the roof or near to the building or in the soil structure in the yard. The accumulated water is used for household needs: watering lawns, washing, flushing toilets, washing floors, cleaning pavements, etc. The third method is to absorb water and drain it by natural biological terrestrial sponge facilities: permeable surfaces, sloping terrain, natural vegetation, green structures, rain gardens, etc. These correspond to the modern concept of "sponge city". The authors propose a method of rapid drainage of rainwater using special "green structures" – rain-garden bands along the roadways. The ability to capture water by rain-garden bands has been confirmed on the example of most of the regional centres of Ukraine in case of the strongest observed precipitation. Such rapid drainage becomes especially important in the transition from cities for cars to cities for bicycles. This increases the requirements to avoid slippery roads for increasing the stability of these vehicles. In addition, the proposed rain gardens with shrubs can perform safe protective functions by extinguishing the kinetic energy of bouncing cars during a road accident.*

***Key words:** urbanization; urbocenosis; technogenic load; green construction; green structures; rain gardens; rain-gardens bands; sponge city*

© P.O. Глущенко, Т.М. Ткаченко, В.О. Мілейковський, 2021

Р.О. Глущенко, Т.М. Ткаченко, В.О. Мілейковський

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

## ЕФЕКТИВНЕ ВІДВЕДЕННЯ ДОЩОВОЇ ВОДИ З ДОРІГ ДОЩОВИМИ САДАМИ-СМУГАМИ У КОНЦЕПЦІЇ МІСТА-ГУБКИ

***Анотація.** На сьогодні існує проблема затоплення міських територій дощовими водами та повільне відведення їх до дощової каналізації і далі до розподільчих колекторів. Існує декілька напрямів забезпечення стійкості міських територій до сильних злив та дощів. Один із актуальних методів – це “зелені” покрівлі (горизонтальні або похилі) з зеленими насадженнями, які здатні поглинати воду. Певна кількість води вбирається рослинами, ще певна її кількість залишається в субстраті, а інша частина фільтрується за рахунок декількох шарів конструкції під рослинами, що уповільнює її рух до систем дощової каналізації. Другий метод полягає в збиранні дощової води в спеціальні накопичувальні баки, які знаходяться на покрівлі або біля будинку, або в конструкції ґрунту на прибудинковій території. Накопичену воду використовують для побутових потреб: полив газонів, прання, змивання туалетів, миття підлог, очищення тротуарів тощо. Третій метод полягає в поглинанні води та її відведенні природними біологічними наземними засобами-губками: водопроникні поверхні, рельєф з ухилом, природне рослинне покриття, зелені конструкції, дощові сади тощо. Це відповідає сучасній концепції “місто-губка”. Автори пропонують метод швидкого відведення дощової води з доріг спеціальними «зеленими конструкціями» – дощовими садами-смугами уздовж проїзних частин. Підтверджено здатність захоплювати воду дощовими садами-смугами на прикладі більшості обласних центрів України на випадок найсильніших спостережених опадів. Таке швидке відведення води стає особливо актуальним при переході від міст для автомобілів до міст для велосипедів. При цьому посилюються вимоги до уникнення слизьких доріг задля підвищення стійкості цих транспортних засобів. Крім того, пропонувані дощові сади-смуги з кущами можуть виконувати безпекові захисні функції шляхом гасіння кінетичної енергії автомобілів, що відскакують, під час ДТП.*

***Ключові слова:** урбанізація; урбоценоз; техногенне навантаження; «зелене будівництво»; «зелені конструкції»; дощові сади; дощові сади-смуги; місто-губка*

DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.46-59>

### Вступ

Затоплення вулиць у містах – явище, яке часто спостерігається не тільки в Україні, а й у багатьох інших країнах світу. Причинами є:

- старі мережі дощової каналізації, які робилися ще 50...100 років тому;
- невідповідність чинних норм поточним кліматичним змінам у частині опадів;
- стрімке розростання міст, що призводить до скорочення площ зелених зон і збільшення кількості бетонних та асфальтових покриттів, нездатних вбирати воду;
- висока вартість і тривалість реконструкції зливової каналізації під сучасні обсяги опадів;
- несвоєчасне та недостатнє прочищення мереж від засмічення;



- відсутність політики або стратегії на рівні міст щодо вирішення даного питання;
- неправильний підхід до інфраструктури, який не враховує сучасні обсяги опадів і передбачає стік води лише на проїзну частину та в зливову каналізацію з ігноруванням природних рішень – різних типів озеленення.

У рамках сталого розвитку міста необхідне розроблення заходів щодо забезпечення екологічної безпеки й санітарії, енергоефективності та ресурсозбереження, збереження й відновлення природного середовища, а також екологізації будівництва та виховання екологічної свідомості міських жителів.

Рясні опади можуть призвести до короткочасного перевантаження міської дощової каналізації. Великою перевагою “зелених покрівель” є накопичення вологи, що дозволяє відстрочити стік зливової води й розвантажити дощову каналізацію задля попередження затоплення.

Пропонуємо триступеневу схему управління дощовими стоками для зменшення навантаження на місцеву дощову каналізацію та використання дощової води як цінного ресурсу:

- використання “зелених покрівель”;
- встановлення спеціальних накопичувальних баків;
- передбачення наземних засобів-губок, що поглинають дощову воду, зокрема будівництво дощових садів-смуг уздовж проїжджих частин, які розробляють автори даної роботи.

Така схема дозволить максимально використати можливості управління стічними водами міст.

## Літературний огляд

Сучасна методика озеленення дахів з використанням спеціальних шарів для висаджування рослинності, захисту від коріння, дренажу тощо з’явилася відносно нещодавно. Але історія виникнення “зелених покрівель” ведеться здавна. Прикладами є покриті дерном берестяні дахи в середньовічній Скандинавії та Ісландії, висячі сади Вавилону, терасовий сад на острові Белла (XVII століття) тощо [1].

У XIX ст. Карл Рабітц [1] знову відродив попит на “зелені покрівлі”. Зараз ці “зелені конструкції” розглядаються як значуща складова зеленого будівництва та сталого розвитку урбоценозів. У багатьох країнах світу “зелені конструкції” розглядаються як перспективна прогресивна технологія захисту довкілля [2–10]. При цьому зазначаються різноманітні аспекти покращення навколишнього середовища, зокрема зменшення рівня  $CO_2$  та забруднень, продукування кисню, глюкози, регулювання температури повітря, зниження шуму, накопичення й зберігання води, захист від бруду, пилу, мікроорганізмів та зменшення енергопотреб будівлі.

Одним з найбільш перспективних напрямків є використання “зелених конструкцій” для управління кількісними та якісними показниками дощових стічних вод [3–6, 11–12]. На сьогодні відведення цих вод у містах тільки інженерними методами вважається неперспективним:

- системи дощової каналізації забиті сміттям і не чистяться;
- обладнання цих систем застаріло;
- у містах утворено багато бетонних та асфальтових поверхонь, які не вбирають воду.

Усі ці фактори призвели до створення нових концепцій управління дощовими потоками в містах. Найбільш відома концепція “міста-губки” [13]. Термін “місто-губка” ввів у 2005 році індійський автор Ван Ройджен, але концепція була офіційно прийнята в Китаї у 2013 році. Китай є лідером у впровадженні таких міст і має державну програму “Концепція міста-губки”. Детальний аналіз міст проведено в роботі [13]. Автори запропонували концепцію дизайну й виконали розрахунки надходження дощової води  $V_d$  [м<sup>3</sup>] та її утримання  $V_s$  [м<sup>3</sup>] різними «зеленими» елементами міста Сучжоу.

Автори не вказали висоту  $WRh_B$  [м] води, яку може поглинати під час дощу кожна губка. Ця відсутня інформація є найважливішою для розрахунків необхідних площ відповідних губчастих конструкцій. Під час опадів висихання в товщі цих конструкцій незначне. Це значення є властивістю лише структури відповідної губки. Воно повинно бути незалежним від місця розташування для більшості міст світу. Тому дані роботи [13] можна використовувати для інших регіонів.

На “зелених” покрівлях без нахилу виникає застій води [15]. Правильне проектування такої “зеленої” покрівлі дозволяє уникнути застійних явищ. Збільшення висоти дренажних елементів (рис. 1) підвищує до необхідного значення відстань до стоячої води. При цьому висота конструкції дещо зростає, але не збільшується вага [15]. Адже елементи з переробленої жорсткої піни є легкими. Покрівля складається з:

- захисту від проростання коріння 1, що вкладається безпосередньо на шар гідроізоляції та забезпечує його захист від пошкодження корінням рослинного шару;
- вологоутримувального захисного мату 2, що забезпечує захист гідроізоляції від можливих механічних пошкоджень і відіграє роль акумулятора додаткової вологи;
- дренажно-накопичувального елемента, який накопичує оптимальну кількість вологи, необхідної для забезпечення життєдіяльності рослин, і регулює відтік води;
- системний фільтр забезпечує фільтрацію води для запобігання потраплянню дрібнодисперсних часток субстрату в дренажно-накопичувальний елемент задля захисту його від заливання;
- шару субстрату, у який висаджують рослини;
- рослинного шару (седуми, газон, багаторічні рослини, дрібний чагарник, дерева).



Рис. 1 – Покрівля без нахилу: 1 – захист від проростання коріння; 2 – вологоутримувальний захисний мат; 3 – дренажно-накопичувальний елемент; 4 – системний фільтр; 5 – шар субстрату; 6 – рослинний шар

Висота такої системи ZnCo [15] становить біля 180 мм, вага наближається до  $108 \text{ кг/м}^2$ , і при цьому водонакопичення досягає  $36 \text{ дм}^3/\text{м}^2$ , а співвідношення стоку  $C \approx 0,34$ .

З використанням системи для похилих покрівель можливе озеленення дахів з нахилом до  $35^\circ$  [16]. Георешітка має елементи розмірами  $540 \times 540 \text{ мм}$  заввишки 100 мм. Її виготовлено з поліетилену високого тиску. Її елементи легко збираються з утворенням стабільного й рівного з'єднання. Георешітка готова для заповнення субстратом і залишає достатню площу для розвитку кореневої системи. Дощова вода стікає набагато швидше порівняно з плоскими покрівлями. Рекомендовано передбачити зрошення задля уникнення пересихання субстрату, особливо в посушливий час.

Конструкцію озеленення похилих дахів необхідно розрахувати так, щоб сили зсуву були компенсовані стабільним окантуванням схилу. За необхідності слід встановити додаткові бруси. Висота системи [16] становить біля 120 мм, вага наближається до  $155 \text{ кг/м}^2$ , а водонакопичення становить близько  $64 \text{ дм}^3/\text{м}^2$ .

Другим етапом управління дощовими стоками є системи затримання дощової води. Такі системи (рис. 2) використовуються на “зелених покрівлях” будь-якого типу [17] і накопичують до  $80 \text{ дм}^3/\text{м}^2$  опадів. Потім вода повільно вивільнюється (червона стрілка) до системи водовідведення.

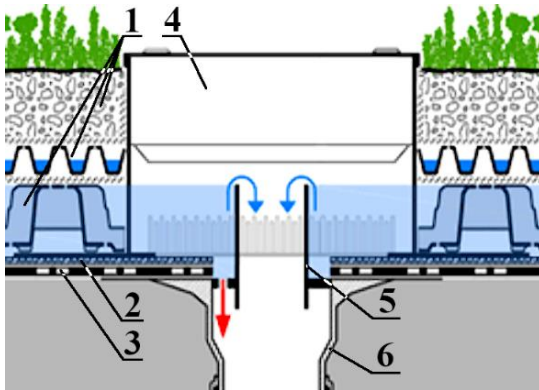


Рис. 2 – Система збору дощової води ZnCo [17]:

1 – стандартні шари “зеленої покрівлі”; 2 – системний фільтр; 3 – захист від проростання коріння; 4 – бак; 5 – переливна система; 6 – труба системи водовідведення або побутового водопостачання

Для використання накопиченої води вона має зберігатися в накопичувальних баках [18]. Така техніка є стародавньою і використовувалася в основному в посушливих районах, де дощова вода має особливу цінність. Зокрема, з цією метою цистерни в підлогах будівель будувалися в неолітичних селищах Леванту (східна частина Середземного моря), наприклад, у Рамади та Лебве [19]. Сучасні баки задля заощадження земельних площ доцільно встановлювати на дахах (рис. 3).

Під час опадів вода надходить до накопичувальних баків. Баки заповнюються дощовою водою зі швидкістю, яка залежить від кількості опадів. Якщо баки заповнюються, дощові води надходять до стаціонарної системи зливостоків будівлі, а звідти – до міської дощової каналізації.

Після потрапляння дощових вод до баків її можливо використовувати для побутових потреб: полив газонів, прання, змивання туалетів, миття підлог, очищення тротуарів тощо. Для будівель, у яких неможливо розташувати накопичувальні баки безпосередньо на покрівлі, їх краще розташувати [18] на землі біля фундаменту будівлі або в конструкції ґрунту (рис. 4).

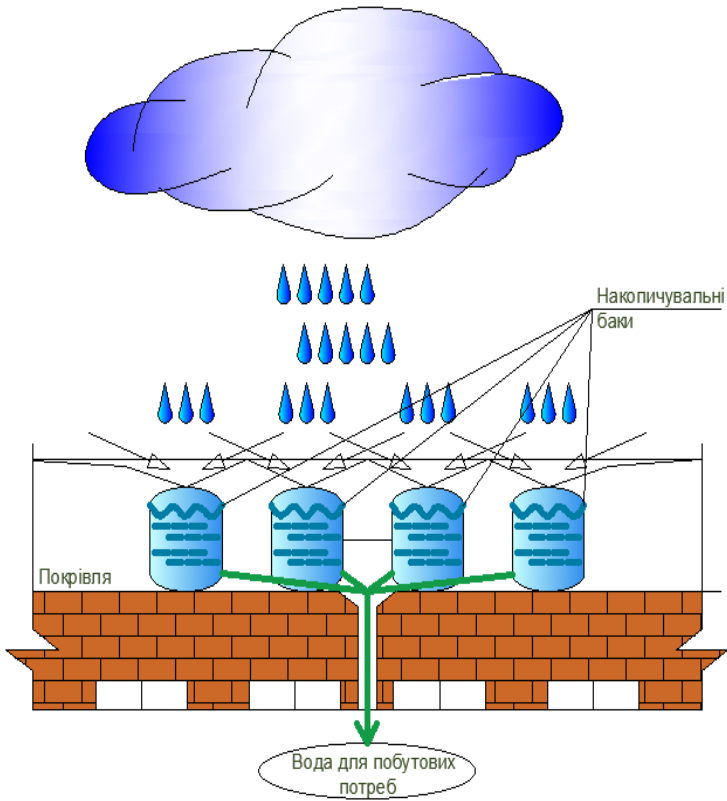


Рис. 3 – Схема розташування накопичувальних баків на покрівлі

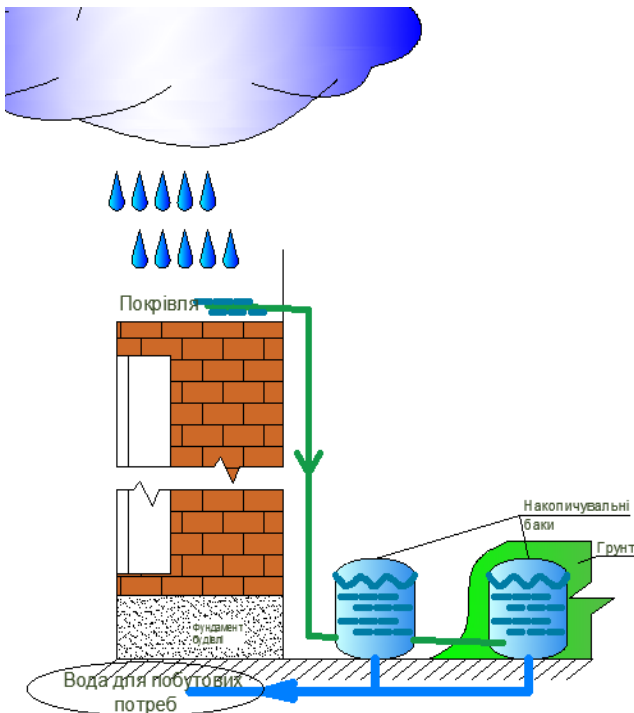


Рис. 4 – Схема розташування накопичувальних водних баків біля цокольного поверху

Об'єм води в баках залежить від кількості опадів, об'єму та кількості самих баків. Воду слід використати протягом 10...20 діб [18]. У ній відбуваються біохімічні процеси з погіршенням її якості. Для проєктування накопичувальних баків рекомендується методика, розроблена Тетяною Ткаченко [20] на базі методики Wilo [18], адаптованої до умов України.

Третім етапом управління дощовими стоками є наземні засоби-губки [21] – водонепроникні покриття, дощові сади тощо. Якщо перші лише пропускають воду (висота утримуваної води  $WRh_B = 0$ ), то другі здатні її утримувати. У зазначеній роботі відсутнє значення висоти утримуваної води. Однак, наведені в ній дані дозволили авторам цієї роботи розрахувати цю висоту, а саме 550 мм ( $WRh_B = 0,55$  м).

## Основна частина

Авторами цієї роботи запропоновано використовувати особливий вид “зеленої конструкції” – дощові сади-смуги (рис. 5) уздовж дороги біля її проїзної частини. Смуги призначено для захоплення води з обох боків. Усі частини дороги можуть бути приблизно на одному рівні з ухилом до смуг. При цьому останні можуть мати відбійники для гасіння енергії автомобіля під час ДТП. Однак, рекомендовано замість цього щільно висадити кущі.

Основні переваги кущів перед відбійниками:

- гасіння енергії автомобіля без додаткового відскоку;
- привабливий зовнішній вигляд;
- секвестрація  $CO_2$  та утворення кисню.

Недоліки:

- більше займаного місця;
- потреба періодичного підрізання;
- пошкодження кущів під час дорожньо-транспортних пригод, що потребує додаткового обслуговування;
- додаткові стовпчики зі світловідбивними мітками для нічного руху.

Розрахунок сумарної ширини смуг виконується за умови, щоб усю дощову воду найбільш інтенсивного дощу заввишки  $RFh_{max}$ , м, яка потрапила на проїзну частину, тротуари та дощові сади-смуги, було утримано цими смугами.

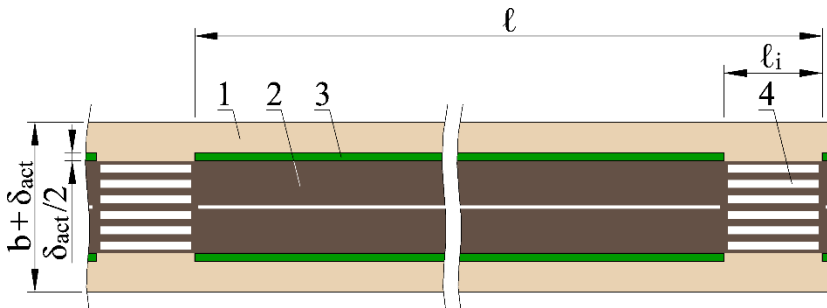


Рис. 5 – Пропоноване рішення вулиці: 1 – тротуар; 2 – проїзна частина; 3 – дощові сади-смуги; 4 – пішохідний перехід

При сумарній ширині основних частин (проїзна частина та тротуари) дороги  $b$ , м, та середній відносній довжині пропусків дощових садів-смуг на одиницю довжини дороги  $\ell_i/\ell$ , відносна сумарна ширина дощових садів-смуг

$$\frac{\delta_{act}}{b} = \frac{RFh_{max}}{(WRh_B - RFh_{max}) \left(1 - \frac{\ell_i}{\ell}\right)} \quad (1)$$

Основною проблемою розрахунку за формулою (1) стала обмеженість даних архівів погоди щодо опадів. Тому було застосовано міжнародну систему Copernicus Climate Change Service (C3S), реалізовану Європейським центром середньострокових прогнозів погоди (ECMWF).

У рамках міжнародного освітнього проекту Erasmus+ ClimEd (реєстраційний номер 619285-EPP-1-2020-1-FI-EPPKA2-SVHE-JP), до якого долучений Київський національний університет будівництва і архітектури, співробітники кафедри охорони праці та навколишнього середовища (зокрема авторка даної роботи Тетяна Ткаченко) пройшли навчання роботі у цій системі. Вона дозволяє виконувати найрізноманітніші операції з погодними даними з різних спеціалізованих баз даних мовою Python.

Пошук та аналіз наявних баз даних показав, що для даної задачі найбільш компактною та зручною буде база “Extreme precipitation risk indicators for Europe and European cities from 1950 to 2019” (Показники екстремального ризику опадів для Європи та європейських міст з 1950 по 2019 рік). Недоліком цієї бази є брак доступу в межах певних широт і довгот. Доводиться запитувати дані за всією Європою. Однак, наявність змінної “Maximum 1-day precipitation” (Максимальна кількість опадів за 1 добу) значно спрощує розрахунки.

Створено додаток (рис. 6) “Rain-Garden Bands” (Дощові сади-смуги), який

- отримує дані про денні опади за 2000...2019 роки;
- інтерполює їх для конкретного міста;
- обирає максимум;
- розраховує відсоток ширини дощового саду-смуги.

Розрахунок виконано для обласних центрів України, крім Одеси, для якої даних у базі не виявлено. Дані табл. 1 дозволяють швидко розрахувати ширину дощових садів-смуг. Як бачимо, на більшості території України використання цього рішення не призведе до суттєвого розширення доріг, натомість дасть можливість уловлювати всю дощову воду без потреби відновлення інженерних систем природним способом. Лише Івано-Франківськ, Кропивницький та Чернівці мають підвищену потребу у збільшенні ширини доріг. На дорогах цих міст, можливо, доведеться частково використовувати інженерні системи.

Отже, технологія дощових садів-смуг дозволяє ефективно вирішувати проблеми затоплення доріг у рамках концепції міста-губки. Ця технологія дозволяє максимально швидко поглинути воду якомога ближче до місця її потрапляння на поверхню проїзної частини та тротуарів.

The screenshot displays the OpenMeteo toolbox editor interface. At the top, there are logos for OpenMeteo, ECMWF, and Climate Change Service, along with the user name 'Tetiana Tkachenko' and a 'Logout' button. The main area is divided into three sections: a sidebar on the left with application categories like 'Rain-Garden Bands', 'examples', and 'your workspace'; a central code editor showing a Python script for calculating rain-garden bands; and a right-hand panel titled 'Rain-Garden Bands Calculation' which includes a download link, a city selection dropdown (set to 'Kyiv (UA)'), and input fields for latitude (30.5238) and longitude (50.45466). The script in the editor defines a function to calculate the relative width of rain-garden bands based on precipitation data for a specific city and time period.

Рис. 6 – Застосунок для розрахунку відносної ширини дощових садів-смуг

Таблиця 1 – Відсоток ширини дощових садів-смуг від ширини основних частин дороги

Місто	Відносна сумарна ширина дощових садів-смуг, %, при відносних пропусках, %															
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Вінниця	10,3	10,5	10,7	10,9	11,2	11,4	11,7	11,9	12,2	12,5	12,8	13,2	13,5	13,9	14,3	14,7
Дніпро	11,7	12,0	12,2	12,5	12,7	13,0	13,3	13,6	13,9	14,3	14,6	15,0	15,4	15,8	16,3	16,7
Донецьк	11,0	11,2	11,4	11,7	11,9	12,2	12,5	12,8	13,1	13,4	13,7	14,1	14,4	14,8	15,2	15,7
Івано-Франківськ	14,0	14,3	14,6	14,9	15,3	15,6	16,0	16,3	16,7	17,1	17,6	18,0	18,5	19,0	19,5	20,1
Київ	10,6	10,8	11,0	11,2	11,5	11,7	12,0	12,3	12,6	12,9	13,2	13,5	13,9	14,3	14,7	15,1
Кропивницький	12,5	12,7	13,0	13,3	13,6	13,9	14,2	14,5	14,8	15,2	15,6	16,0	16,4	16,9	17,3	17,81
Луганськ	9,2	9,38	9,6	9,77	10,0	10,2	10,4	10,7	10,9	11,2	11,5	11,8	12,1	12,4	12,8	13,1
Луцьк	9,3	9,47	9,7	9,87	10,1	10,3	10,5	10,8	11,1	11,3	11,6	11,9	12,2	12,5	12,9	13,3
Львів	10,6	10,8	11,0	11,3	11,5	11,8	12,0	12,3	12,6	12,9	13,3	13,6	13,9	14,3	14,7	15,1
Миколаїв	10,3	10,5	10,8	11,0	11,2	11,5	11,7	12,0	12,3	12,6	12,9	13,2	13,6	14,0	14,3	14,7
Полтава	8,84	9,02	9,21	9,4	9,61	9,82	10,0	10,3	10,5	10,8	11,1	11,3	11,6	12,0	12,3	12,6
Рівне	13,1	13,3	13,6	13,9	14,2	14,5	14,8	15,2	15,5	15,9	16,3	16,7	17,2	17,6	18,1	18,6
Сімферополь	8,11	8,27	8,45	8,63	8,81	9,01	9,21	9,43	9,7	9,89	10,1	10,4	10,7	11,0	11,3	11,6
Суми	9,00	9,18	9,37	9,57	9,78	10,0	10,2	10,5	10,7	11,0	11,3	11,5	11,8	12,2	12,5	12,9
Тернопіль	9,61	9,80	10,0	10,2	10,4	10,7	10,9	11,2	11,4	11,7	12,0	12,3	12,6	13,0	13,3	13,7
Ужгород	9,13	9,31	9,51	9,71	9,92	10,1	10,4	10,6	10,9	11,1	11,4	11,7	12,0	12,3	12,7	13,0
Харків	7,38	7,53	7,69	7,85	8,02	8,20	8,39	8,58	8,8	9,00	9,22	9,46	9,7	9,97	10,3	10,5
Херсон	8,03	8,20	8,37	8,55	8,73	8,93	9,13	9,34	9,6	9,80	10,1	10,3	10,6	10,9	11,2	11,5
Хмельницький	10,0	10,2	10,4	10,7	10,9	11,1	11,4	11,7	11,9	12,2	12,5	12,9	13,2	13,5	13,9	14,3
Черкаси	9,7	9,9	10,1	10,3	10,6	10,8	11,1	11,3	11,6	11,9	12,2	12,5	12,8	13,1	13,5	13,9
Чернівці	19,4	19,8	20,2	20,6	21,1	21,6	22,1	22,6	23,1	23,7	24,3	24,9	25,5	26,2	27,0	27,7
Чернігів	11,0	11,2	11,4	11,7	11,9	12,2	12,4	12,7	13,0	13,4	13,7	14,0	14,4	14,8	15,2	15,6

Основною транспортною проблемою провідних міст світу, зокрема Києва, є забруднення повітря й тиснява на дорогах через велику завантаженість автомобілями. Як показала практика, створення ефективних розв'язок та перенесення всього громадського транспорту під землю (м. Париж, Франція) вирішують проблему лише частково. Тому на сьогодні найбільш ефективним та екологічним рішенням є відмова від “міста для автомобілів” та перехід на концепцію “міста для велосипедів”. При цьому підвищуються вимоги до уникнення слизькості доріг задля стійкості цих транспортних засобів. Саме дощові сади-смуги дозволяють найбільш ефективно вирішити цю проблему. Під час злив вода буде швидко залишати проїзну частину (та велосипедні смуги). Це дозволить не лише покращити зчеплення шин транспортних засобів з покриттям дороги, але й мінімізувати утворення бризок при їзді як велосипедів, так і автомобілів, що їдуть поруч.



## Висновки

Для уникнення затоплення міст ефективним підходом є перехід від інженерних методів водовідведення до концепції міста-губки. При цьому рекомендується триступеневе управління дощовими стоками: затримання води “зеленими покрівлями”, збирання води у накопичувальних баках та наземні засоби-губки. Накопичувальні баки дозволяють використовувати отриману воду для побутових потреб, особливо якщо ця вода профільтована в товщі “зелених покрівель”. Це зменшує потребу міста в питній воді та використовує дощові води як цінний природний ресурс. Для доріг запропоновано особливий тип “зелених конструкцій” – дощові сади-смуги з обох боків кожної проїзної частини. Вони є біотехнічним заходом для затримання води, очищення її, безпеки руху, декорування тощо. У результаті розрахунків дощових садів-смуг отримано довідкові дані, які дозволяють проектувати ці засоби в різних регіонах України. Показано, що для більшості території України цих засобів достатньо для забезпечення повного відведення дощової води за найсильнішої зливи. Подальші дослідження стосуватимуться ефективності фільтрації води різними “зеленими конструкціями”.



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



Публікація підготовлена в рамках проекту «Багаторівнева місцева, національна та загальнорегіональна освіта та навчання в галузі кліматичних послуг, адаптації та пом'якшення наслідків зміни клімату 619285-ERP-1-2020-1-FI-ERPKA2-SVNE-JP». Підтримка Європейською комісією випуску цієї публікації не означає схвалення змісту, який відображає лише думки авторів, і Комісія не може нести відповідальність за будь-яке використання інформації, що міститься в ній.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Плоский В. О. Моделювання термічного опору трав'яного шару зеленої покрівлі / В. О. Плоский, Т. М. Ткаченко, В. О. Мілейковський, В. Г. Дзюбенко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. – 2016. – № 844. – С. 158–163.
2. Пінь А. М. Адаптація «зелених» технологій у концепцію розумного міста / А. М. Пінь. – Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України: 36. наук. праць. – 2018. – Вип. 5(133). – С. 76–82. – URL: [http://ird.gov.ua/sep/sep20185\(133\)/sep20185\(133\)\\_076\\_PinAM.pdf](http://ird.gov.ua/sep/sep20185(133)/sep20185(133)_076_PinAM.pdf)
3. Gioannini R. Plant Communities Suitable for Green Roofs in Arid Regions / R. Gioannini, M. Al-Ajlouni, R. Kile, D. VanLeeuwen, R. St. Hilaire // Sustainability. – 2018. – Vol. 10. – Iss. 6. – ArticleID: 1755. – <https://doi.org/10.3390/su10061755>
4. Rey C. V. Green Roof Design with Engineered Extensive Substrates and Native Species to Evaluate Stormwater Runoff and Plant Establishment in a Neotropical Mountain / C. V. Rey, N. Franco, G. Peyre, J. P. Rodriguez // Sustainability. – 2020. – Vol. 12. – Iss. 16. – Article ID 6534. <https://doi.org/10.3390/su12166534>

5. Jiajun Zeng. First flush of non-point source pollution and hydrological effects of LID in a Guangzhou community / Jiajun Zeng, Guoru Huang, Haiwan Luo, Yepeng Mai, Haichun Wu. – Scientific Reports. – 2019. – Iss. 9. – Article No: 13865. – <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50467-8>
6. Haoming Chen. Effects of Biochar and Sludge on Carbon Storage of Urban Green Roofs / Haoming Chen, Jinyi Ma, Xinjun Wang, Pingping Xu, Shuo Zheng, Yanwen Zhao // *Forests*. – 2018. – Vol. 9. – Iss. 7. – Article ID 413. – <https://doi.org/10.3390/f9070413>
7. Zluwa I., Pitha U. The Combination of Building Greenery and Photovoltaic Energy Production – A Discussion of Challenges and Opportunities in Design / I. Zluwa, U. Pitha // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13. – Iss. 3. – Article ID 1537. – <https://doi.org/10.3390/su13031537>
8. Yaping Chen. Numerical Simulation of Local Climate Zone Cooling Achieved through Modification of Trees, Albedo and Green Roofs – A Case Study of Changsha, China / Yaping Chen, Bohong Zheng, Yinze Hu // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12. – Iss. 7. – Article ID 2752. – <https://doi.org/10.3390/su12072752>
9. Gill A. S. Microbial Composition and Functional Diversity Differ Across Urban Green Infrastructure Types / A. S. Gill, K. Purnell, M. I. Palmer, J. Stein, K. L. McGuire // *Frontiers in Microbiology*. – 2020. – Vol. 11 <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00912>
10. Bandehali B. Current State of Indoor Air Phytoremediation Using Potted Plants and Green Walls / B. Bandehali, T. Miri, H. Onyeaka, P. Kumar // *Atmosphere*. – 2021. – Vol. 12. – Iss. 4. – Article ID 473. – <https://doi.org/10.3390/atmos12040473>
11. Ткаченко Т.М. Использование зелёных кровель в регулировании дождевых стоков / Т.Н. Ткаченко, Т.В. Листрова // *Актуальные научно-технические и экологические проблемы мелиорации земель: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию мелиоративного образования в Горках, 14-15 марта 2019 года / Белорусская государственная сельскохозяйственная академия: под ред. В.И. Желязко. – Горки: РПЦ «Печатник», 2019. – С. 312–316.*
12. Ткаченко Т.М. Розрахунок утриманого поверхневого стоку покрівлю німецького виробника / Т.М. Ткаченко, І.О. Прокопенко // *Екологічна безпека та природокористування. – 2020. – № 3 (35). – С. 44–56.*
13. Lijiao Liu. Impact of green roof plant species on domestic wastewater treatment / Lijiao Liu, Junjun Cao, Mehran Ali, Jiabin Zhang, Zhaolong Wang // *Environmental advances*. – 2021. – Iss. 4. – Article ID: 100059. – <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100059>
14. Procaccini, G. A Green Roof Case Study in the Urban Context of Milan: Integrating the Residential and Cultivation Functions for Sustainable Development / G. Procaccini, C., Monticelli // *Water*. – 2021. – Vol. 13. – Iss. 2. – Article No. 137. – <https://doi.org/10.3390/w13020137>
15. Покрівля без нахилу [Електронний ресурс] / ZinCo. – Режим доступу: <https://zinco.com.ua/uk/systems/extensive/roof-without-slope>. – Дата доступу 17.11.2021
16. Похила зелена покрівля до 35° [Електронний ресурс] / ZinCo. – Режим доступу: <https://zinco.com.ua/uk/systems/inclined-roof/inclined-roof-35>. – Дата доступу 17.11.2021
17. Система управління зливовими водами [Електронний ресурс] / ZinCo. Режим доступу: <https://zinco.com.ua/uk/systems/stormwater-management>. – Дата доступу 17.11.2021
18. Wilo – Использование дождевой воды – справочное пособие. – 04.2016. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://atlab.ru/upload/doc/wilo/Brochure\\_rainwater\\_205x297\\_RU.pdf](https://atlab.ru/upload/doc/wilo/Brochure_rainwater_205x297_RU.pdf). – Дата доступа: 19.09.2021
19. Miller R. "Water use in Syria and Palestine from the Neolithic to the Bronze Age" / R. Miller // *World Archaeology*. 1980. Vol. 11 No. 3. P. 331-341. – Access Mode: <https://www.jstor.org/stable/124254>
20. Ткаченко Т. М. Науково-методологічні основи підвищення рівня екологічної безпеки урбоценозів шляхом створення енергоефективних технологій «зеленого» будівництва : дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01 / Ткаченко Т. М. ; Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. Київ, 2018. 311 с.

21. Yixin Zhang. Assessment on the Effectiveness of Urban Stormwater Management / Yixin Zhang, Weihao Zhao, Xue Chen, Changhyun Jun, Jianli Hao, Xiaonan Tang, Jun Zhai // Water. 2021. Vol. 13. Iss. 1. Article No. 4. <https://doi.org/10.3390/w13010004>

Стаття надійшла до редакції 17.06.2021 і прийнята до друку після рецензування 22.09.2021

## REFERENCES

1. Ploskyi, V. O., Tkachenko, T. M., Mileikovskiy, V. O., & Dziubenko, V. H. (2016). Modeliuvannya termichnoho oporu travianoho sharu zelenoi pokrivli. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politehnika". Teoriia i praktyka budivnytstva*, 844, 158-163 (in Ukrainian).
2. Pin, A. M. (2018). Adaptatsiia «zelenykh» tekhnologii u kontsepsiui rozumnoho mista. *Sotsialno-ekonomichni problemy suchasnoho periodu Ukrainy: Zb. nauk. Prats*, 5(133), 76-82 (in Ukrainian). URL: [http://ird.gov.ua/sep/sep20185\(133\)/sep20185\(133\)\\_076\\_PinAM.pdf](http://ird.gov.ua/sep/sep20185(133)/sep20185(133)_076_PinAM.pdf)
3. Gioannini, R., Al-Ajlouni, M., Kile, R., VanLeeuwen, D., & Hilaire, R. St. (2018). Plant Communities Suitable for Green Roofs in Arid Regions. *Sustainability*, 10(6), 1755. doi: <https://doi.org/10.3390/su10061755>
4. Rey, C. V. et al. (2020). Green Roof Design with Engineered Extensive Substrates and Native Species to Evaluate Stormwater Runoff and Plant Establishment in a Neotropical Mountain. *Sustainability*, 12(16), 6534. doi: <https://doi.org/10.3390/su12166534>
5. Zeng, J., Huang, G., Luo, H., Mai, Y., & Wu, H. (2019). First flush of non-point source pollution and hydrological effects of LID in a Guangzhou community. *Scientific Reports*, 9, 13865. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50467-8>
6. Chen, H., Ma, J., Wang, X., Xu, P., Zheng, S., & Zhao, Y. (2018). Effects of Biochar and Sludge on Carbon Storage of Urban Green Roofs. *Forests*, 9(7), 413. doi: <https://doi.org/10.3390/f9070413>
7. Zluwa, I., & Pitha, U. (2021). The Combination of Building Greenery and Photovoltaic Energy Production – A Discussion of Challenges and Opportunities in Design. *Sustainability*, 13(3), 1537. doi: <https://doi.org/10.3390/su13031537>
8. Chen Y. et al. (2020). Numerical Simulation of Local Climate Zone Cooling Achieved through Modification of Trees, Albedo and Green Roofs. A Case Study of Changsha, China. *Sustainability*, 12(7), 2752. doi: <https://doi.org/10.3390/su12072752>
9. Gill, A. S., Purnell, K., Palmer, M. I., Stein, J., & McGuire, K. L. (2020). Microbial Composition and Functional Diversity Differ Across Urban Green Infrastructure Types. *Frontiers in Microbiology*, 11. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00912>
10. Bandehali, B., Miri, T., Onyeaka, H., Kumar, P. (2021). Current State of Indoor Air Phytoremediation Using Potted Plants and Green Walls. *Atmosphere*, 12(4), 473. doi: <https://doi.org/10.3390/atmos12040473>
11. Tkachenko, T., & Listrova, T. (2019). Ispolzovanie zelenykh krovvel v regulirovanii dozhdovykh stokov. Aktualnye nauchno-tehnicheskie i ekologicheskie problemy melioratsii zemel. (V. Zheliazko, Ed.). In *Mezhdunarodnaya nauchno-praktycheskaya konferentsiya, posviashchennoi 100-letiiu meliorativnogo obrazovaniia v Horkakh* (pp. 312-316). Belorusskaia gosudarstvennaia selskokhoziaistvennaia akademiia. Horky: RPTs «Pechatnyk» (in Russian).
12. Tkachenko, T. M., & Prokopenko, I. O. (2020). Calculation of maintenance of surface drainage roofing of a German manufacturer. *Environmental Safety and Natural Resources*, 35(3), 44-56. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.3.44-56>
13. Liu, L., Cao, J., Ali, M., Zhang, J., & Wang, Z. (2021). Impact of green roof plant species on domestic wastewater treatment. *Environmental advances*, 4, 100059. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100059>

14. Procaccini, G., & Monticelli, C. (2021). A Green Roof Case Study in the Urban Context of Milan: Integrating the Residential and Cultivation Functions for Sustainable Development. *Water*, 13(2), 137. doi: <https://doi.org/10.3390/w13020137>
15. ZinCo (2018). Pokrivlia bez nakhylyu. Retrieved 17.11.2021 from: <https://zinco.com.ua/uk/systems/extensive/roof-without-slope> (In Ukrainian).
16. ZinCo (2018). Pokhyly zelena pokrivlia do 35°. Retrieved 17.11.2021 from: <https://zinco.com.ua/uk/systems/inclined-roof/inclined-roof-35> (in Ukrainian).
17. ZinCo (2018). Systema upravlinnia zlyvovymy vodamy. Retrieved 17.11.2021 from: <https://zinco.com.ua/uk/systems/stormwater-management> (in Ukrainian).
18. Wilo (2016). Ispolzovanie dozhdevoi vody – spravocnoe posobie. Retrieved 19.09.2021 from: [https://atisslab.ru/upload/doc/wilo/Brochure\\_rainwater\\_205x297\\_RU.pdf](https://atisslab.ru/upload/doc/wilo/Brochure_rainwater_205x297_RU.pdf) (in Ukrainian).
19. Miller, R. (1980). Water use in Syria and Palestine from the Neolithic to the Bronze Age. *World Archaeology*, 11(3), 331-341. Retrieved from: <https://www.jstor.org/stable/124254>
20. Tkachenko, T. M. (2018). Naukovo-metodolohichni osnovy pidvyshchennia rinvnia ekolohichnoi bezpeky urbotsenoziv shliakhom stvorennia enerhoefektyvnykh tekhnolohii «zelenoho» budivnytstva. dys. ... d-ra tekhn. Nauk. Kyiv: Kyivskyi natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury (in Ukrainian).
21. Zhang, Y., Zhao, W., Chen X., Jun, C., Hao, J., Tang, X., & Zhai, J. (2021). Assessment on the Effectiveness of Urban Stormwater Management. *Water*, 13(1), 4. doi: <https://doi.org/10.3390/w13010004>

*The article was received 17.06.2021 and was accepted after revision 22.09.2021*

**Глущенко Роман Олександрович**

аспірант Київського національного університету будівництва та архітектури

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31

ORCID ID: 0000-0003-2863-1480 **e-mail:** gr2017inc@gmail.com

**Ткаченко Тетяна Миколаївна**

доктор технічних наук, кандидат біологічних наук, професор кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва та архітектури

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31

ORCID ID 0000-0003-2105-5951 **e-mail:** tkachenkoknuba@gmail.com

**Мілейковський Віктор Олександрович**

доктор технічних наук, доцент Київського національного університету будівництва та архітектури

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31

ORCID ID: 0000-0003-2105-5951 **e-mail:** v\_mil@ukr.net

## ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ NATURAL RESOURCES

УДК 699.86

**Borys I. Basok**, D. S. (Technical Sciences), Professor, Corresponding member of NASU, Head of a department

ORCID: 0000-0002-8935-4248 *e-mail*: basok@itf.kiev.ua

**Svitlana M. Goncharuk**, PhD, Leading Researcher

ORCID: 0000-0002-5609-7337 *e-mail*: goncharuk-s@ukr.net

**Victor P. Priemchenko**, Chief Engineer

ORCID: 0000-0003-4785-4815 *e-mail*: priemchenko@ukr.net

**Oksana M. Lysenko**, PhD, Senior Researcher

ORCID: 0000-0003-3981-9796 *e-mail*: lisenko\_oks@ukr.net

**Hanna M. Veremiichuk**, postgraduate student, Junior Researcher

ORCID: 0000-0003-1893-3637 *e-mail*: averemiichuk@gmail.com

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

### RESEARCH OF THERMOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF DOMESTIC BOILER WITH A MECHANICAL PELLET BURNER

**Abstract.** *An experimental study of technologies for direct combustion of pellets in a domestic boiler was conducted. Experimental studies to determine the thermophysical characteristics of the process of burning pellet fuel in the bulk layer were performed using a pellet burner Pelletron-15.*

*To determine the patterns of the process of burning pellets in the burner and the thermal characteristics of the domestic boiler with a pellet burner, studies of the temperature of the boiler volume at different modes of operation of the burner were performed. Temperature measurement was performed using HA-thermocouples with open junction, located in the furnace space at different heights and different distances from the initial cross section of the burner. The analysis of the chemical composition of flue gases, which was determined using a gas analyzer TESTO 330-2LL, namely determined the temperature of the flue gases at the measurement point, as well as the concentration of oxygen (O<sub>2</sub>), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and other parameters.*

*According to the results of experiments, the temperature distribution in the furnace space of the solid fuel boiler Viadrus with a thermal capacity of up to 24 kW with a mechanized burner Pelletron-15 with a pellet feed hopper built into the front panel was determined.*

*In addition, based on the results of some experimental studies, the heat of combustion, humidity and ash content of pellets were determined. The dependences*

on the time change of the boiler temperature at the stage of quasi-stationary mode of wood pellet combustion are obtained: at the minimum and maximum fuel supply from the hopper, as well as at the maximum fuel supply mode after the supply of additional air from the fan and in the pellet combustion process.

The influence of speed and temperature of air introduced into the combustion chamber was determined. According to the research results, measures are proposed to improve the design characteristics of the pellet burner in low-power boilers (10... 30 kW).

**Keywords:** biomass; pellets; direct combustion; bulk layer

**Б.І. Басок, С.М. Гончарук, В.П. Присмченко,  
О.М. Лисенко, Г.М. Веремійчук**

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ ПОБУТОВОГО КОТЛА З МЕХАНІЧНИМ ПЕЛЕТНИМ ПАЛЬНИКОМ**

**Анотація.** В роботі було проведено експериментальне дослідження технології прямого спалювання пелет в побутовому котлі. Експериментальні дослідження з визначення теплофізичних характеристик процесу спалювання пелетного палива в насипному шарі проводились з використанням пелетного пальника марки Пеллетрон-15.

Для визначення закономірностей процесу спалювання пелет в пальнику та теплотехнічних характеристик роботи побутового котла з пелетним пальником виконувались дослідження температурного режиму об'єму котла при різних режимах роботи пальника. Вимірювання температури здійснювалося за допомогою ХА-термопар з відкритим спаєм, що розташовуються в топковому просторі на різних висотах та різних відстанях від вихідного перетину пальника. Проводився аналіз хімічного складу димових газів, який визначався за допомогою газоаналізатора TESTO 330-2LL, а саме визначалася температура димових газів в точці вимірювання, а також концентрація кисню ( $O_2$ ), двоокису вуглецю ( $CO_2$ ), моноокису вуглецю ( $CO$ ), окислів азоту ( $NO_x$ ) та інші параметри.

За результатами експериментів визначено розподіл температури в топковому просторі твердопаливного котла Viadrus тепловою потужністю до 24 кВт з вмонтованим в передню панель механізованим пальником Пеллетрон-15 з бункером подачі пелет.

Також за результатами окремих експериментальних досліджень визначено теплоту згоряння, вологість та зольність пелет. Отримано залежності щодо зміни у часі температурного стану котла на стадії квазістаціонарного режиму горіння пелет з деревини: при мінімальній і при максимальній подачі палива з бункера, а також в режимі при максимальній подачі палива після припинення подачі з вентилятора додаткового повітря та в режимі завершення процесу горіння пелет.

Визначався вплив швидкості та температури повітря, що вводиться в топкову камеру. За результатами досліджень запропоновано заходи з вдосконалення конструкційних характеристик пелетного пальника в котлах малої потужності (10...30 кВт).

**Ключові слова:** біомаса; пелети; пряме спалювання; насипний шар

**DOI:** <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.60-72>

## Вступ

Актуальними завданнями, що стоять перед економікою нашої країни останніми роками, є скорочення споживання дорогого імпортного палива – природного газу, а також збільшення частки використання відновлюваних джерел енергії. Передумовою успішного розвитку біоенергетики є наявність достатніх ресурсів біомаси [1]. Згідно з Національним планом дій з відновлюваної енергетики до 2020 року обсяг використання деревної біомаси з кожним роком зростає.

Привабливість пелет в якості палива полягає в тому, що при незначному обсязі вони мають достатньо високу теплотворну здатність, екологічно безпечні та економічно вигідні. Одна з найважливіших переваг використання пелет є висока насипна щільність, що дозволяє економічно вигідно перевозити їх на великі відстані.

За минулі чотири роки найбільший приріст спостерігався на ринку котлів на аграрній біомасі. Помітне значне зростання ринку котлів на трісці – у 6,8 раза за кількістю і в 3,3 раза за потужністю та ринку котлів на пелетах (гранулах) – у 4 рази, тобто з 71 до 300 одиниць, що свідчить про актуальність їх використання [2].

Зазначимо, що понад 90% енергії з біомаси отримують шляхом спалювання. Характеристики палива, вартість обладнання та потужність енергетичної станції є визначними показниками під час вибору технології спалювання для впровадження. Спалювання біомаси відбувається в топках котлів, а теплота, що виділяється, передається теплоносіям (воді, парі або повітрю) частково в самій топці котла, а частково – від продуктів згоряння, які з топки під час свого руху контактують з конвективними поверхнями теплообміну та поступово віддають теплоту теплоносіям [3]. Тому особливо актуальними є розробка та дослідження характеристик пристроїв для спалювання пелет в стаціонарному режимі. Ефективне спалювання пелет різного походження в котлах є актуальним завданням для енергетичного використання цих палив [4, 5].

Сьогодні питання впровадження технологій енергетичного використання біомаси та заміщення викопних палив, в першу чергу природного газу, набуває все більшої актуальності. Основними напрямками, практичне впровадження яких розвивається найбільшими темпами, є технології прямого спалювання деревини у вигляді дров, відходів деревообробки, тріски та гранул або пелет. Низка вітчизняних компаній вже освоїли випуск котлів для спалювання деревини як для побутового використання, так і для промислових споживачів [6]. Використання деревних пелет має ряд переваг, а саме використання існуючої сировинної бази, яку раніше вважали тільки відходами, що забруднює навколишнє середовище; формування нових ринків збуту готової продукції; створення новітніх екологічних конструкційних матеріалів [7].

Основні відмінності застосування пелет полягають саме в організації процесу спалювання біомаси, що має свої особливості залежно від виду біомаси. У свою чергу процес спалювання накладає певні вимоги на конструкцію топки, спосіб подачі палива тощо [8].

Саме пелетний пальник є складовим елементом твердопаливного котла та основною його частиною. Перехід на такі пристрої для опалення будівель індивідуально-побутового сектора сьогодні особливо актуальний через їх екологічність, в т.ч. вуглецеву нейтральність, та в зв'язку з поступовим виснаженням викопних природних енергоресурсів, таких як вугілля, нафта і газ.

## Мета і методи

Основною метою даної роботи було експериментальне дослідження технологій прямого спалювання пелет в побутовому котлі.

Експериментальні дослідження з визначення теплофізичних характеристик процесу спалювання пелетного палива в насипному шарі проводились з використанням пелетного пальника марки Пеллетрон-15 з максимальною тепловою потужністю 15 кВт. Цей пальник призначений для застосування в системах опалення житлових, офісних або виробничих приміщень шляхом його облаштування для твердопаливних котлів [9].

Схематичне зображення пелетного пальника Пеллетрон-15 у розрізі наведено на рис. 1.

Для визначення закономірностей процесу спалювання пелет в пальнику та теплотехнічних характеристик роботи побутового котла з пелетним пальником виконуються дослідження температурного режиму об'єму котла при різних режимах роботи пальника. Вимірювання температури здійснюється за допомогою гребінки (вісім) термодатчиків хромель-алюмель з відкритим спаєм, що розташовуються на різних висотах та різних відстанях від вихідного перетину пальника (показано на рис. 2).

Хімічний склад димових газів визначався за допомогою газоаналізатора TESTO 330-2LL. За його допомогою вимірювалась температура димових газів в газоході, а також концентрація кисню ( $O_2$ ), двоокису вуглецю ( $CO_2$ ), моноокису вуглецю ( $CO$ ), окислів азоту ( $NO_x$ ) та деякі інші параметри.

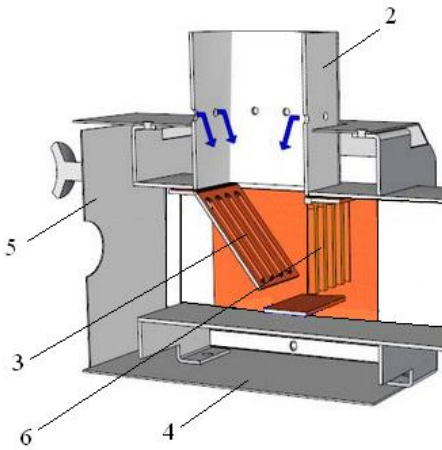


Рис. 1 – Схема пелетного пальника Пеллетрон-15

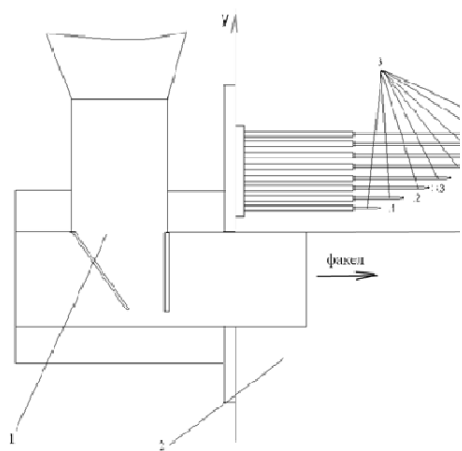


Рис. 2 – Схема вимірювання температури в об'ємі котла: 1 – пелетний пальник; 2 – топковий об'єм котла; 3 – термодатчик

## Результати та пояснення

Як базовий варіант розглядається конструкція пальника «Пеллетрон-15», який призначений для спалювання пелет вищої якості, які виготовлені з деревини, мають низьку зольність, високу температуру плавлення золи та відносно високу теплоту згоряння.



Пелетний паливник входить до складу опалювального котла, що обладнаний димовою трубою. Запуск паливника відбувається за умов його попереднього розігріву від стороннього джерела теплоти для створення необхідного перепаду тиску в димовій трубі та забезпечення умов подачі повітря в паливник і вільного виходу димових газів (тобто створення тяги в трубі) [10].

**Дослідження при мінімальній витраті палива.** Серія експериментальних досліджень стосується спалювання у пелетному паливнику пелет з деревини. Їх діаметр складає 6 мм. На першому етапі досліджень отримано експериментальну залежність від часу температурного стану в котлі на початковій стадії процесу спалювання пелет після розпалу паливника від стороннього джерела теплоти. Відлік часу на рис. 3 відповідає початку стабільної роботи паливника після його виходу на квазістаціонарний режим при мінімальній витраті палива.

В період роботи паливника з початку і до 800 с режим подачі палива – мінімальний. В цьому режимі температура у факелі, яка фіксується термопарою №8, змінювалась в діапазоні 300° С..350° С. Після 650 секунди температура зменшується до 250° С. Показання термопар №1 та №6 впродовж перших 800 секунд змінювалось у межах 150° С ...200° С.

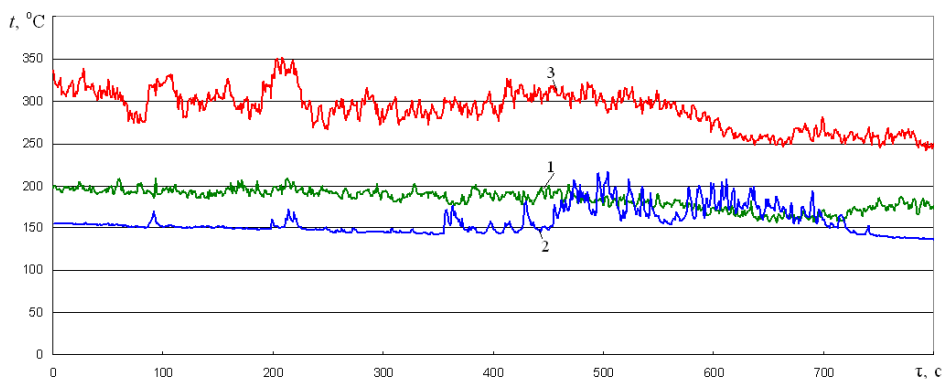


Рис. 3 – Зміна у часі температурного стану котла на стадії квазістаціонарного режиму горіння пелет з деревини при мінімальній подачі палива: 1 – покази термопарі №1; 2 – №6; 3 – №8

Після 800 секунди було переведено режим подачі з бункера пелетного палива на максимум. Температура в точці, де встановлено термопару №8, почала стрімко зростати.

Мінімальні значення відповідали моментам часу, при яких здійснювалася подача палива з бункера, а максимальні – періодам найбільш інтенсивного виходу та горіння летючих газів. При цьому показання термопар №2 та №6 монотонно збільшувалися.

Для інтенсифікації процесу горіння з 1680 секунди в камеру згорання через бокові дверцята було організовано подачу підігрітого повітря з тепловентилятора. Температура в точці №8 при цьому почала стрімко зростати і досягла значення 800° С. Зміна температури в точці №8 має періодичний характер. Спостерігаються періоди підвищення та зниження температури в цій точці. Періоди складають 70...90 с.

В момент часу 2443 с подачу палива з бункера було перекрито. В пальнику ще лишалася достатня маса палива, завдяки якій певний час продовжувався режим інтенсивного горіння. Внаслідок того, що холодне пальне з бункера більш не потрапляє в пальник, в період від 2443 с до 2561 с температура в камері згоряння та у факелі зростає і досягає в точці №8 максимального значення 900° С. Значення температури в точках №1 та №6 також досягають максимальних значень 300° С, що відображено на рис. 4.

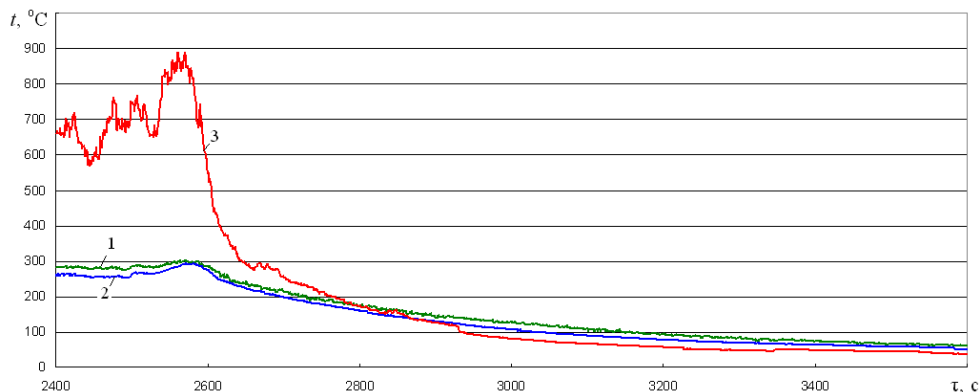


Рис. 4 – Зміна у часі температурного режиму в котлі на стадії завершення горіння пелет з деревини: 1 – покази термопарі №1; 2 – №6; 3 – №8

До моменту часу 2561 с пелети в камері пальника практично всі згорають. Вихід летючих газів припиняється. Температура в точці №8 починає швидко спадати. Це пояснюється тим, що тепловиділення в камері згоряння практично припиняється, а повітряна тяга в розігрітому димарі ще лишається. В пальник надходить холодне зовнішнє повітря, яке охолоджує камеру згоряння та котел.

Після остаточного охолодження пальника та котла в камері пальника практично не лишається золи. Зола, яка має структуру легкого попелу, виноситься з камери згоряння під час горіння пелет і осідає в збірнику золи, що розміщується в нижній частині котла.

**Дослідження при максимальній подачі палива.** Наступна серія експериментальних досліджень була реалізована при режимі спалювання, коли на початку процесу горіння застосовувався режим максимальної подачі палива, а далі здійснювався перехід на режим мінімальної подачі.

Температурний стан пальника, що на початковій стадії працює в режимі максимальної витрати палива, відображено на рис. 5. На цьому рисунку крива 1 відповідає термопарі №1, крива 2 – термопарі №4, а крива 3 – термопарі №8. За часовий період до 1000 с температура в точці, де встановлено термопару №8, змінюється в періодичному режимі, який викликаний синхронною періодичністю подачі холодного палива з бункера в камеру згоряння. Температура в цій точці змінюється від 500° С до 800° С, а амплітуда коливання температури в цій точці досягає 300° С. Періодичність коливань – 60...90 с. Температури в точках котла, де встановлено термопарі №2 та №4, повільно і майже монотонно зростають від 215° С (точка №4)...240°С (точка №1) до 280° С (точка №4)...304° С (точка №1).

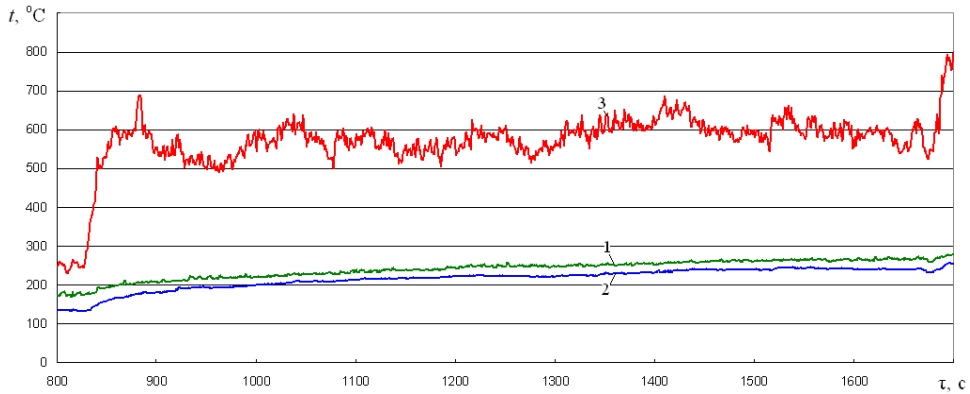


Рис. 5 – Зміна у часі температурного стану котла на стадії квазістаціонарного режиму горіння пелет з деревини при максимальній подачі палива з бункера: 1 – показання термопарі №1; 2 – №6; 3 – №8

В момент часу 1015 с пальник переводиться на режим мінімальної подачі палива. Температура в точці №8, яка відповідає області, куди спрямовано факел полум'я з пальника, стрімко зменшується до  $380^{\circ}\text{C}$ . Температури в точках №1 та №4 також зменшуються до  $250^{\circ}\text{C}$ ... $280^{\circ}\text{C}$ . Температура в точці №1 залишається на  $20^{\circ}\text{C}$  ... $30^{\circ}\text{C}$  вище, ніж в точці №4. До моменту часу 2240 с температури в точках №1 та №4 знизилися до  $206^{\circ}\text{C}$  та  $173^{\circ}\text{C}$  відповідно.

В такому режимі пальник працював до моменту часу 2246 с. Потім режим подачі палива з бункера знову було переведено на максимум, що викликало зростання температури факела до  $655^{\circ}\text{C}$  (точка №8). В точках №1 та №4 температура підвищилася до  $267^{\circ}\text{C}$  та до  $241^{\circ}\text{C}$  відповідно. Надалі температура в точці №8 коливалася в межах  $500^{\circ}\text{C}$  ... $655^{\circ}\text{C}$ .

В момент часу 2572 с було в автоматичному режимі припинено подачу палива з бункера. В цей момент прохід в бункері, через який паливо з бункера потрапляє в камеру згоряння, повністю перекривається заслінкою. Бункер таким чином повністю від'єднується від камери згоряння. Припиняється подача холодного палива, і в камері згоряння на деякий незначний час суттєво інтенсифікується процес горіння. В момент часу 2594 с температура в цій точці досягає максимального значення  $788^{\circ}\text{C}$ , після чого починає швидко знижуватися. До 2647 с температура в цій точці зменшується до  $303^{\circ}\text{C}$  (за 53 секунди). Далі зниження температури стає менш інтенсивним.

**Дослідження хімічного складу димових газів.** Аналіз хімічного складу димових газів в котлі при роботі пелетного пальника проводиться під час другої серії досліджень процесу спалювання пелет з деревини. Для проведення аналізу складу димових газів, в тракці їх видалення, що виходить з котла, передбачено спеціальний отвір, в який вводиться датчик газоаналізатора. Отвір знаходиться на висоті 0,5 м відносно вхідного перерізу димовивідного тракту.

Залежність від часу температури димових газів в тракці їх видалення на ділянці, де проводиться вимірювання, наведено на рис. 6 (крива 1). На цьому ж рисунку для порівняння наведено також залежність температури, що вимірюється в точці 1 котла ХА термопарою.

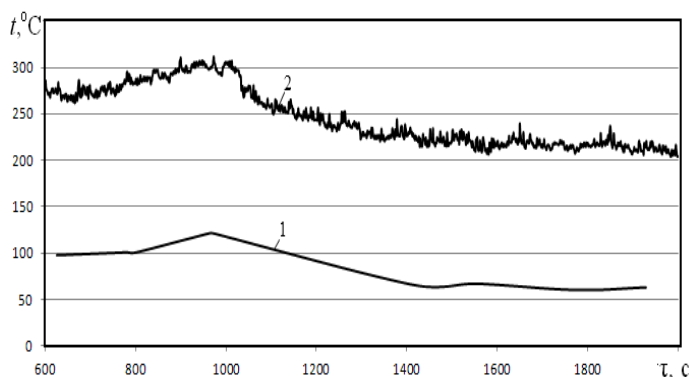


Рис. 6 – Зміна у часі температури димових газів у отворі для газоаналізатора (1) та в точці №2

Як видно з рисунка, температура димових газів у області отвору для газоаналізатора синхронно змінюється з температурою в точці №1 котла. Температура на цій ділянці тракту для видалення димових газів на 150...170°С нижча, ніж в точці №1 котла, і змінюється у межах 60° С ...121° С. Їх охолодження відносно температури в точці №1 відбувається внаслідок тепловіддачі від димових газів до теплообмінника для тракту системи опалення, що встановлений в котлі, а також внаслідок тепловтрат у простір приміщення.

Зміну у часі концентрації кисню у димових газах у точці її виміру наведено на рис. 7. Як видно з цього рисунка, концентрація кисню перед початком розпалювання пелет становила 21%, тобто відповідала вмісту в доквіллі. В процесі спалювання концентрація кисню спочатку знижується до 16%, а потім до 15%. Мінімального значення концентрація кисню набуває в момент часу 971 с, коли температура в точці виміру досягає максимального значення 121°С. Надалі концентрація кисню збільшується до 18...18,5%, що свідчить про зниження інтенсивності процесу горіння. Температура газів в точці вимірювання зменшується при цьому до 60...65°С.

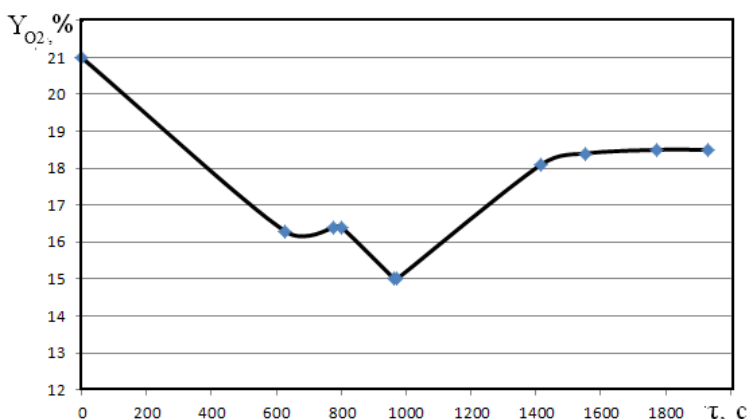


Рис. 7 – Зміна у часі концентрації кисню у димових газах

Зміну у часі концентрації вуглекислого газу  $CO_2$  наведено на рис. 8. Як видно з рис. 8, до моменту часу 800 с концентрація  $CO_2$  змінювалася у межах

4,5...4,6%. При цьому температура димових газів в точці вимірювання складала 90...100° С. Пелетний паливник працює в цей період у режимі максимальної подачі палива. Коли ж температура димових газів в момент часу 971 с досягла максимального значення 121° С, концентрація CO<sub>2</sub> зросла до 5,8%, що є наслідком зростання інтенсивності згоряння палива. Надалі ж концентрація CO<sub>2</sub> зменшується до 2,4...2,8%. Температура димових газів при цьому знижується до 60...65°С. Це свідчить про менш інтенсивне згоряння палива. У цей період пелетний паливник працює у режимі мінімальної подачі палива.

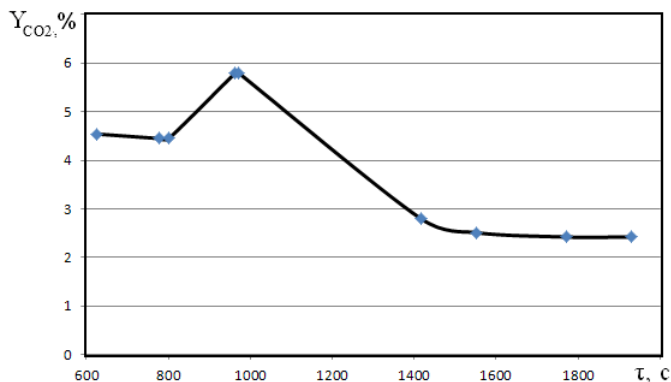


Рис. 8 – Зміна у часі концентрації вуглекислого газу у димових газах

В процесі спалювання пелетів утворюється не лише вуглекислий газ, але на проміжних етапах й моноокис вуглецю CO. Він виділяється при піролізі біомаси і є основною горючою речовиною. При його реакції з киснем утворюється вуглекислий газ та водяна пара. Його горіння відбувається інтенсивніше при підвищенні температури в камері згоряння. Таким чином, догорання CO до CO<sub>2</sub> відбувається інтенсивніше при підвищенні температури. Зі зменшенням температури догорання CO уповільнюється.

Важливим показником роботи паливника є концентрація окислів азоту в димових газах. Зміна у часі концентрації цих речовин в димових газах відображена на рис. 9.

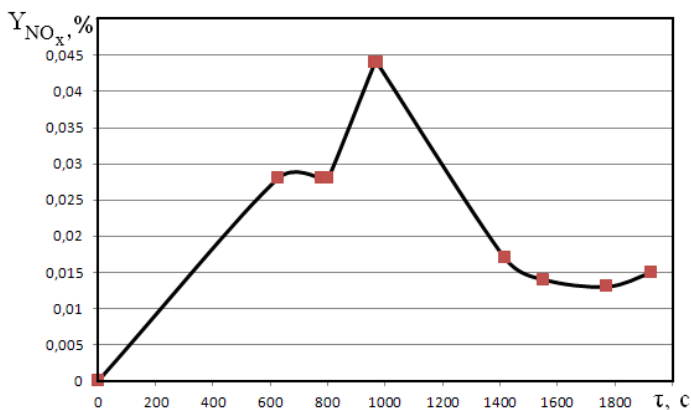


Рис. 9 – Зміна у часі концентрації окислів азоту NO<sub>x</sub>

Як видно з рис. 9, від початку процесу горіння пелет в пальнику до моменту часу 800 с концентрація  $\text{NO}_x$  в димових газах підвищується від 0 до 0,028%. Після підвищення температури в пальнику та відповідного підвищення температури димових газів до максимального значення, яке відбувається в момент часу 971 с, підвищується також і концентрація  $\text{NO}_x$  в димових газах до 0,044%. Далі, коли пальник працює в режимі мінімальної подачі палива, температура димових газів зменшується. При цьому також зменшується і концентрація  $\text{NO}_x$  до 0,013%...0,017%.

Як випливає з наведених результатів, концентрації компонентів димових газів суттєво залежать від їх температури, яка, в свою чергу, залежить від інтенсивності процесу горіння в пальнику. Зі збільшенням температури димових газів концентрація кисню в них зменшується. Залежність цієї концентрації від температури практично лінійна. Водночас, при збільшенні температури димових газів практично за лінійним законом збільшуються концентрації двоокису вуглецю та окислів азоту. Це пояснюється інтенсифікацією процесу згоряння палива при збільшенні температури в пальнику. При цьому відповідно збільшується і температура димових газів.

## Висновки та рекомендації

Успішна технічна реалізація процесу спалювання пелет пов'язана з вибором раціональних технічних рішень та режимних параметрів роботи відповідного обладнання, тому як висновок запропоновано наступні заходи з вдосконалення конструкційних характеристик пелетного пальника для можливості його використання в котлах малої потужності (до 30...50 кВт):

1. В пелетному пальнику «Пелетрон-15» застосовується гравітаційний спосіб подачі палива з бункера до камери згоряння. Цей спосіб передбачає вільне висипання пелет з бункера під дією своєї ваги. Недолік цього способу пов'язаний з можливою нерівномірністю витрати пелет, що надходять в камеру згоряння. Із-за цієї нерівномірності процес горіння може призупинитися через його нестачу в камері згоряння, або через надлишок, що може закрити зону горіння та знизити її температуру. Для запобігання цим недолікам доцільним є застосування механічної регульованої подачі палива за допомогою шнека.

2. В базовому варіанті пелетного пальника повітря, що необхідне для підтримання процесу згоряння палива, подається в камеру згоряння через отвір в дверцятах камери. Внаслідок можливого захаращення продуктами неповного згоряння пелетного палива повітряних потоків, виникає ситуація нестачі повітря для підтримання процесу горіння, або надлишок холодного зовнішнього повітря, що охолоджує камеру згоряння. В таких випадках процес горіння буде нестійким та нестабільним. Тому рекомендується регулювати витрати повітря відповідно до режиму горіння пелет в пальнику. Запобігання цим ситуаціям можливе шляхом застосування додаткової механічної вимушеної подачі повітря в зону горіння за допомогою вентилятора. Його робота та витрати повітря повинні регулюватися відповідно до встановленого режиму горіння, а також відповідно до витрат палива, що подається з бункера в камеру згоряння.

3. Доцільно передбачити також можливість попереднього підігріву повітря, що надходить до камери. Для цього необхідно в конструкції пальника передбачити рекуперативний теплообмінний пристрій, у якому здійснюється підігрів повітря, що надходить з вентилятора, димовими газами.

4. У базовому варіанті пальника, що призначений для спалювання низькозольного пелетного палива з деревини стандарту А, забезпечується рівень температури, що є достатнім для підтримки процесу горіння. Корпус цього пальника – металевий. У випадку ж спалювання пелет невисокої якості, необхідно передбачити заходи з підтримання належного температурного рівня в камері згоряння пальника. З цією метою необхідно провести теплоізоляцію камери згоряння. Можна, наприклад, виготовити її з керамічного матеріалу або нанести на зовнішню поверхню металевого корпусу камери згоряння шар теплоізоляційного матеріалу. Ці заходи дозволять підвищити температуру в камері згоряння та покращити ефективність процесу спалювання пелет.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Підготовка та впровадження проєктів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні. Практичний посібник за ред. Г. Гелетука. К: 2015. 72 с.
2. Інформаційний ресурс «Біоенергетична асоціація України». Режим доступу: <https://uabio.org/>
3. Г. Гелетука, Є. Олійник, В. Антоненко, С. Чаплигін, В. Зубенко, С. Радченко. Проведення комплексного дослідження ринку котлів, що працюють на біомасі в Україні. 2016. 212 с.
4. Басок Б. І., Давиденко Б.В., Кужель Л.М., Лисенко О.М., Веремійчук Г.М., Експериментальні дослідження спалювання рослинних пелет у побутовому котлі. Журнал «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання», том 37, 2021, С. 13–23.
5. В. Basok, A. Veremiichuk, O. Baranyuk, O. Siruy, Simulation of biopellet combustion process in low power boilers. «Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering», Department of Construction Networks and Systems, Koszalin University of Technology, 2021, p. 141.
6. Г. Гелетука, В. Крамар, О. Епік, Т. Антошук, В. Тітков. Комплексний аналіз українського ринку пелет з біомаси. К.: ТОВ «Науково-технічний центр “Біомаса”». 2016, 334 с.
7. Ю.В. Дзядикевич, Р.І. Розум, М.В. Буряк. Управління енергозабезпеченням шляхом використання вторинних енергоресурсів. «Інноваційна економіка», 2010, С. 44–50.
8. M.W. Vis, D. van den Berg. Biomass Energy Europe Harmonization of biomass resource assessments. Volume I. Best Practices and Methods Handbook. November, 2010. p. 220.
9. Інтернет-ресурс: <https://pelletron.ru/>
10. Інтернет-ресурс: <https://bio.ukr.bio/>
11. Звіт про НДР «Розробка та дослідження пальникового пристрою ретортного типу для спалювання біомаси в котлах малої та середньої потужності (100-1000 кВт)» за етапом «Аналіз вихідної інформації та розробка технічної пропозиції експериментального пальникового пристрою ретортного типу для котлів потужністю 100-1000 кВт» / Інститут технічної теплофізики НАН України. Київ, 2010. 92 с. (Державний обліковий № 0210U004469).
12. Звіт про НДР «Розробка та дослідження пальникового пристрою ретортного типу для спалювання біомаси в котлах малої та середньої потужності (100-1000 кВт)» за етапом «Конструювання та виготовлення експериментального зразка пальникового пристрою ретортного типу» / Інститут технічної теплофізики НАН України. Київ, 2011. 38 с. (Державний обліковий № 0210U009825).

*Стаття надійшла до редакції 15.07.2021 і прийнята до друку після рецензування 27.10.2021*

## REFERENCES

1. Geletukha, G. (Ed.). (2015). Preparation and implementation of projects to replace natural gas with biomass in the production of thermal energy in Ukraine. A Practical Guide. Kyiv (in Ukrainian).
2. Information resource "Bioenergy Association of Ukraine". Retrieved from: <https://uabio.org/>
3. Geletuha, G., Oliynik, E., Antonenko, V., Chaplugin, S., & Zubenko, S. (2016). Carrying out of complex research of the market of the boilers working on biomass in Ukraine. In: Industrial heat engineering, (pp. 212-221) (in Ukrainian).
4. Basok, B., Davydenko, B., Kugel, L., Lysenko, A., & Veremichuk, H. (2021). Experimental studies of burning plant pellets in a domestic boiler. *Journal «Ventilation, Lighting and Heat and Gas Supply»*, 37, 13-23 (in Ukrainian).
5. Basok, B., Veremiichuk, A., Baranyuk, O., & Siruy, O. (2021). Simulation of biopellet combustion process in low power boilers. In *«Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering»* (p. 141). Koszalin University of Technology, Department of Construction Networks and Systems.
6. Geletukha, G., Kramar, V., Epik, O., Antoshchuk, T., & Titkov, V. (2016). Comprehensive analysis of the Ukrainian market of biomass pellets. Kyiv: LLC «Scientific and Technical Center "Biomass"» (in Ukrainian).
7. Dzyadykevich, Y., Rozum, R., & Buryak, M. (2010). Management of energy supply through the use of secondary energy resources. In "Innovative economy", (pp. 44-50) (in Ukrainian).
8. Vis, M. W., & Van den Berg, D. (2010). Biomass Energy Europe Harmonization of biomass resource assessments. Best Practices and Methods Handbook (Vol. 1).
9. Internet resource: <https://pelletron.ru/>
10. Internet resource: <https://bio.ukr.bio/>
11. Report "Development and research of a retort-type burner for biomass combustion in small and medium power boilers (100-1000 kW)". (2010). Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine.
12. Report "Development and research of a retort-type burner for biomass combustion in small and medium power boilers (100-1000 kW)" "Design and manufacture of an experimental sample of a retort-type burner device". (2011). Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine.

*The article was received 15.07.2021 and was accepted after revision 27.10.2021*

### **Басок Борис Іванович**

доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, зав. відділу Інституту технічної теплофізики НАН України

**Адреса робоча:** Україна, 03680 м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а

ORCID: 0000-0002-8935-4248 **e-mail:** basok@ittf.kiev.ua

### **Гончарук Світлана Михайлівна**

кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту технічної теплофізики НАН України

**Адреса робоча:** Україна, 03680 м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а

ORCID: 0000-0002-5609-7337 **e-mail:** goncharuk-s@ukr.net

### **Примченко Віктор Петрович**

головний інженер Інституту технічної теплофізики НАН України

**Адреса робоча:** Україна, 03680 м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а

ORCID: 0000-0003-4785-4815 **e-mail:** priemchenko@ukr.net



**Лисенко Оксана Миколаївна**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту технічної теплофізики НАН України

**Адреса робоча:** Україна, 03680 м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а

ORCID: 0000-0003-3981-9796 *e-mail:* lisenko\_oks@ukr.net

**Веремійчук Ганна Миколаївна**

аспірантка, молодший науковий співробітник Інституту технічної теплофізики НАН України

**Адреса робоча:** Україна, 03680 м. Київ, вул. Марії Капніст, 2а

ORCID: 0000-0003-1893-3637 *e-mail:* averemiichuk@gmail.com

UDC 004.942 ; 626/627.8:001.5:519.7 ; 504.05 ; 556.013

**Dmytro V. Stefanyshyn**, D. S. (Engineering), Senior Research Scientist  
ORCID ID: 0000-0002-7620-1613 *e-mail*: [d.v.stefanyshyn@gmail.com](mailto:d.v.stefanyshyn@gmail.com)

Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU, Kyiv, Ukraine

## PROBABILITY ASSESSMENT OF THE KYIV RESERVOIR OVERFLOW

**Abstract.** *Reservoirs are an integral part of the world's hydraulic infrastructure and form the basis of modern water management in most countries including Ukraine. However, reservoirs are also sources of an essential danger to the environment, infrastructure, and population. The potential danger and risks to the population living near reservoirs especially downstream may be no less than to people living near nuclear facilities or chemical plants, with which experts and the public usually associate problems of technogenic safety. Moreover, statistics show that about a third of all accidents on dams and levees occurred due to overflow of reservoirs when upstream water levels exceeded allowable values.*

*There are 1103 reservoirs in Ukraine with a total water volume of about 55,500 million m<sup>3</sup>. The Kyiv reservoir is the third one by volume and water surface area in the country. In addition, the reservoir is created by one of the longest dams in the world; the total dam length of the reservoir reaches 70 km.*

*Admittedly, the overflow of a reservoir can be caused by an extreme flood with inflow parameters exceeding the capacity of hydraulic structures. The challenge is that the capacity of water passage structures may be insufficient both due to the inaccuracy of the hydrological forecast and because of faults, poor functioning, or failures of the hydraulic structures during a design flood. In particular, long-term forecasts of floodwater discharges maxima of the inflow into the Kyiv reservoir based on using various probability distribution functions show the essential divergence of the obtained results. As well, as practice shows, the unavailability of some water passage tracts of the reservoir can reach several months in a year. Sometimes repair works were performed even during floods.*

*The aim of the study consisted of probabilistic forecasting the emergency situation on the Kyiv reservoir as a result of its uncontrolled overflow through the possible inaccuracy of the hydrological forecast concerning an actual water inflow into the reservoir and due to failures of water passage hydraulic structures during floods. To achieve the study aim the following tasks were solved: (1) there was proposed a method of hydrological forecasting, which allows taking into account results of long-term forecasts of floodwater discharges maxima based on using various probability distribution functions and fuzzy modelling; (2) there was performed hydrological forecasting of floodwater discharges maxima of the Dnieper affecting the condition of the Kyiv reservoir based on the actual data collected the Vyshgorod water level gauge; (3) there was assessed the probability of the Kyiv reservoir overflow taking into account the occurrence possibility of a shortage of the capacity of water passage structures with using the failure and fault tree method. Totally, six incompatible hypothetical emergency situations at the Kyiv reservoir were considered. The calculations showed the total probability of the Kyiv reservoir overflow equal to  $3.84 \cdot 10^{-4}$  (year<sup>-1</sup>), which is acceptable to guarantee the hydrological safety of infrastructure and the population.*

**Keywords:** *annual exceedance probability; failure and fault tree method; floods; forecasting; fuzzy modelling; hydrological safety; Kyiv reservoir overflow*

**DOI:** <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.73-99>

## 1. Introduction

Reservoirs are an integral part of the world's hydraulic infrastructure and form the basis of modern water management in most countries [1]. They provide reliable managing and controlling water resources of rivers for various purposes that may include flood control, water conveyance by canals, irrigation, navigation, power generation, municipal and industrial water supply, fishing, environmental protection, water tourism and recreation, and others [1, 2]. Admittedly, overall, hydraulic infrastructure including reservoirs has delivered substantial social and economic benefits [1]. In particular, it is argued (e.g. by Muller et al. [3]) that socio-economic development is curtailed in countries that have insufficient infrastructure to manage water, as a result of which many developing countries are held hostage to their hydrology.

Reservoirs and ponds (a pond is a reservoir with a capacity not exceeding 1.0 million m<sup>3</sup>) are the most common water management facilities in Ukraine too. There are 1103 reservoirs in Ukraine with a total water volume of about 55,500 million m<sup>3</sup> and 50,793 artificial ponds with a total water volume of 3,969.4 million m<sup>3</sup> [4, 5]. They are present in various sectors of the national infrastructure providing its reliable and safe operation, and safety of the population life activity.

However, past experience shows that artificial reservoirs are sources of potential danger to the environment, socio-economic infrastructure, and population especially downstream of large dams. The World Commission on Dams report (2000, [6]) concluded that inadequate valuation potential danger from reservoirs was a significant factor in the poor or negative performance of many large dams as water-retaining structures. In many cases, as the report states, actual social and environmental costs of reservoirs building turned out to be unreasonable; many of them were built without comprehensive analysis and evaluation of the technical, financial, and economic criteria applicable at the time, much less the social and environmental criteria that apply in today's context.

The most serious consequences of the construction and operation of reservoirs are associated with accidents of dams and other water-retaining hydraulic structures [7]. These accidents can lead to occurrences of dam-break floods [8, 9]. The peak discharges of the flow caused by a dam-breach flood can greatly exceed previous natural floods, and the response time available for warning the populace is much shorter than for usual precipitation-runoff floods [9, 10]. In general, quantification of the dam-break flood hazard is quite a complex task [11–14]. The potential danger and risks to the population living downstream reservoirs may be no less than to people living near nuclear facilities or chemical plants, with which experts and the public usually associate problems of man-made safety [15]. There have been many cases of destructive accidents on reservoirs and water-retaining hydraulic structures including ones with numerous human victims [7, 11, 15, 16].

Accidents on water-retaining hydraulic structures occur for various reasons [15]. Often, it is extremely difficult to establish all possible causes of dam accidents, as well as to identify the principal factors determining them [7, 16]. However, statistics show that about a third of all accidents on dams and levees occurred due to overflow of reservoirs when upstream water levels exceeded design or allowable values [15–17]. Reservoir overflows are especially dangerous in the case of uncompleted or damaged water-retaining hydraulic structures. More than 80 per cent of dam accidents due to reservoir overflows occurred on such hydraulic structures [15]. Reservoir overflows

can lead to flooding of areas and facilities situated upstream, threaten the loss of stability of riverbank slopes, cause overloading of water-retaining hydraulic structures and become triggers for the development of various emergency processes. In particular, reservoir overflows lead to serious problems to manoeuvre gates. An uncontrolled reservoir overflow often has an utterly adverse psychological impact on staff. Eventually, reservoir overflow can lead to dam crest water overtopping; for embankment dams and levees, such events usually end in catastrophic accidents [7, 15, 18, 19].

## 2. The case study

The Kyiv reservoir is the uppermost reservoir of the Dnieper cascade consisting of the six largest Ukrainian reservoirs (Fig. 1). The reservoir was created north of Kyiv city in the 1960s after the dam of the Kyiv hydropower plant was built near Vyshhorod town [20]. It is the third reservoir by volume and water surface area among the Dnieper reservoirs. Originally, at the normal (full) storage level of 103.0 m, the reservoir volume was 3.73 km<sup>3</sup>, the water surface area was 922 km<sup>2</sup>, and the usable volume was 1.17 km<sup>3</sup> [20, 21]. As a result of the reservoir sedimentation and overgrowing, especially in the backwater decrement part, the current reservoir area has probably decreased to 824 km<sup>2</sup> and its usable volume to 1.05 km<sup>3</sup> [22].



Fig. 1 – The map-scheme of the Dnieper cascade of reservoirs

The Kyiv reservoir does the seasonal Dnieper flow control. Operational water level fluctuations in the reservoir are within 1.5 m, up to the dead storage level of 101.5 m. During a flood having the 0.1-per cent annual exceedance probability (AEP), the water level in the reservoir is admitted to rising by 1.1 m from full storage level (FSL = 103.0 m) to the mark of 104.1 m. The volume of the forcing water prism from the FSL to the highest water level (HWL) of 104.1 m can reach 1.15 km<sup>3</sup>. Then, the reservoir water surface area can increase to 1,166 km<sup>2</sup>.

The length of the Kyiv reservoir full water storage front (FSL = 103.0 m) reaches 42.3 km [20]. The reservoir has one of the longest dams in the world. In particular, only the Kyiv left-bank earthen dam has a length of 17.2 km. The left-bank earthen dam abuts

further upon the 52 km-long left-bank earth dike protecting the floodplain between the Dnieper and Desna rivers. With the 285 m long hydropower plant building, which is combined with spillway, the navigable lock, and the right-bank earth dam, the total length of the water-retaining hydraulic structures of the Kyiv reservoir reaches almost 70 km [20].

The Kyiv reservoir provides operation of the Kyiv hydropower plant (HPP), the current installed capacity of which is 440 MW. In addition, the Kyiv reservoir serves as the lower reservoir for the Kyiv pumping-storage power plant (PSPP), with an installed capacity of 235.5 MW in the turbine mode and 135 MW in the pumping mode [20]. As well, the reservoir and the Kyiv navigable lock are considered to be an integral part of the International Waterway E40 [23]. The reservoir is also used for industrial and public water supply purposes, irrigation, fisheries, and water recreation.

However, the Kyiv reservoir poses also an essential potential threat of break-dam flood occurrence, if one of the water-retaining structures is destroyed. Moreover, the reservoir contains the additional major threat connected with the consequences of the Chernobyl Nuclear Disaster in 1986. The threat is likely because of radionuclides in the reservoir bottom sediments [24, 25]. The possible accident and the reservoir descent might threaten radioactive contamination of Kyiv and others cities, territories, and water bodies downstream [26].

### 3. The problem formulation, aim, and objectives of the study

Admittedly, the overflow of a reservoir can be caused by an extreme flood, inflow parameters of which exceed the capacity of hydraulic structures.

The challenge is that the water passage capacity of hydraulic structures may be insufficient both due to the inaccuracy of the hydrological forecast concerning a possible water inflow into the reservoir and due to faults, poor functioning, or failures of the hydraulic structures during a design flood.

The capacity of spillways and outlets can be significantly reduced, for example, due to their blocking by floating bodies (garbage, forest, etc.), as well sediments, ice, etc. Two examples of such blocking are shown in Fig. 2.



Fig. 2 – Overtopping of Palagnedra dam in Switzerland due to plugging of spillway by floating debris in 1978 (left) [27]; the similar plugging of the spillway of Kerckhoff dam in California, USA, in 1997 (right) [28]

Spillways and outlets may lose their capacity due to malfunctions or failures of mechanical equipment: jamming of gates, faults of lifting mechanisms serving the gates including lack of power. For example, those reasons provoked a disaster to occur on the Tous dam in Spain in 1982 during a heavy rainstorm. The dam gates were not managed to rise in time due to damaged communications and power supply failure [29]. A special accident also occurred on the Taum Sauk PSPP in the U. S. in 2005. The cause of the overflow of the PSPP's upper basin was the failure of a computer program in the system of automatic regulation of water levels [31].

One of reasons for the decrease in the capacity of water passage structures may also be the unavailability of some of them to perform water escape functions due to incompleteness of the necessary repair and maintenance work in inter-flood periods. The condition of unavailability of some water passage tracts, which in general form water passage fronts on reservoirs (spillways, outlets, outfalls, culverts, weirs, sluices, pressure conduits of HPPs, locks, etc.) is quite common situation for a long period of time. According to S. Potashnik, the unavailability of some water passage tracts of the Kyiv HPP reached several months in a year [32]. Sometimes repair works were performed even during floods.

Cavitation erosion, abrasion, riverbed downstream erosion, underwashing, and hydrodynamics loads are usually recognized the main causes of damage to water passage structures in need of repair and restoration. However, as the example of the accident at the Oroville reservoir gated service spillway in 2017 (Fig. 3) shows, the failure causes can be very diverse [33, 34]. In general, incidents and accidents on water passage hydraulic structures occur much more often than on dams. Structures can be repeatedly damaged by floods and recovered after each subsequent flood. So, from 1977 until 2017, when the dangerous accident occurred, there were five (in 1977, 1985, 1997, 2009, and 2013) repeated slab repairs of the Oroville service spillway [33]. Usually, a majority of water passage structures on reservoirs can be either in standby mode or being repaired. Especially it concerns emergency spillways. Eventually, it was the emergency spillway overflow weir that prevented the Oroville reservoir from overflowing and the tallest dam in the U.S., 235 m high, from collapsing, despite a quite critical situation downstream of the dam.

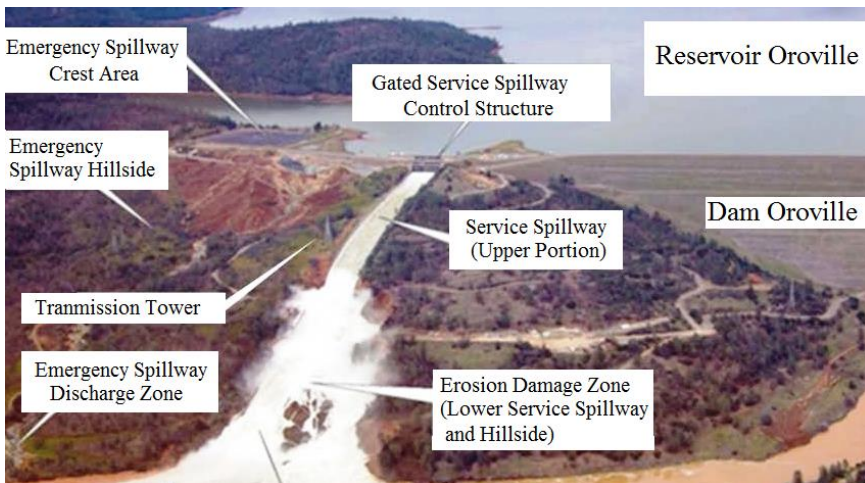


Fig. 3 – Oroville site during the 2017 incident [33]

As an entire probabilistic indicator of the reliability of spillways and outlets, in terms of their ability to perform specified functions of passing excess water from upstream to downstream, it is convenient to use the availability  $A$  or unavailability  $U$  coefficients, which complement each other as follow [15]:

$$A + U = 1, \text{ or } A + U = 100 \text{ (in per cent).} \quad (1)$$

The coefficient  $U$  can be expressed as the ratio of the total time during which a water passage structure may not be fully used, in spite of being necessary, because doing repair and maintenance works or through other technological reasons, to its design service life. According to estimates shown by various authors, an average coefficient of unavailability of an individual spillway structure, regardless of its type, design, causes of possible incidents, is about 10 per cent, that is  $U = 0.1$  [35–37]. A similar integrated estimate of an average unavailability coefficient ( $U = 0.1$ , or 10 per cent) for an individual hydraulic power unit taking into account failures of its control system was given by J. Lecornu [38]. The above values of unavailability coefficients of various water passage hydraulic structures to perform required functions can be specifically clarified with additional data [39]. Eventually, if the must-have additional data are not available, the above-mentioned values can be considered as first approximations for unavailability coefficients of individual spillways, outlets, etc to assess the reliability of a reservoir spillway front as an entire system consisting of separate spillways and outlets as structural and functional units of the system [39–41]. In any case, the reliability of a spillway front of a reservoir may depend on a set of spillways and outlets, and an order of their use while escaping floods including design floods [39–41].

However, it is floods that generate main challenges for engineers making decisions on the safety of reservoirs. The most essential one among them is probably through the complexities, biases, and errors of hydrological forecasting. It is because the reasons, phenomena, factors, and events that cause floods are diverse, multifaceted, interrelated, and unsolved in a sufficient way, which not only complicates the task of hydrological forecasting but also creates a number of uncertainties while estimating design hydrological characteristics [42, 43].

The task of hydrological forecasting, in particular regarding the maximum water discharges of floods, is somewhat simplified for gauged rivers, but in the presence of data of uninterrupted hydrological observations within time intervals of at least 30-40 years. The basic mathematical model used to forecast design hydrological characteristics (water levels and discharges, etc.) according to hydrological observations is a probability distribution function [44, 45]. This model to assess design values of water levels and discharges having extremely small AEPs is accepted all over the world [46–52] including Ukraine [53].

Below, there are four examples of standardization of AEP values of maximum design water discharges depending on dam classes, categories or other criteria in accordance with the Ukraine's standard [55] (Table 1), as well the standards of Spain (Table 2), of Finland (Table 3), and France (Table 4). The parentheses show the average return periods (in years) of the corresponding estimated maximum discharges. It should be noted that the recurrence intervals of design floods may significantly exceed the periods of uninterrupted hydrological observations.

Table 1 – AEPs (per cent) of maximum design water discharges (design floods) and their average return periods (years) according to the current Ukraine’s standard [55]

Estimated cases	The classes (subclasses) of consequences (responsibility) of structures			
	CC3	CC2		CC1
		CC2-1	CC2-2	
Main	0.1 (1,000)	1.0 (100)	3.0 (33)	5.0 (20)
Test	0.01* (10,000)	0.1 (1,000)	0.5 (200)	1.0 (100)

\* Taking into account the warranty correction to the corresponding water discharge

Table 2 – AEPs (per cent) of design floods and their average return periods (years) according to the Spanish standards [56]

Dam categories	Cases	
	Design	Extreme
A	0.1 (1,000)	0.02÷0.01 (5,000÷10,000)
B	0.2 (500)	0.1÷0.02 (1,000÷5,000)
C	1.0 (100)	1.0÷0.2 (100÷500)

Table 3 – AEPs (per cent) of design floods and their average return periods (years) according to the Finnish standards [57]

Dam categories	Values
P	0.02÷0.01 (5,000÷10,000)
N	0.2÷0.1 (500÷1,000)
O	1.0÷0.2 (100÷500)

Table 4 – AEPs (per cent) of maximum design floods and their average return periods (years) for a reservoir with an embankment dam without consideration of vulnerability downstream according to the standards of France [58]

Index $C^*$				
< 5	5 to 30	30 to 100	100 to 700	> 700
1.0 (100)	0.2 (500)	0.1 (1,000)	0.02 (5,000)	0.01 (10,000)

\* The index  $C$  is calculated as  $C = H^2 \sqrt{V}$ , where  $H$  is the height of the dam above ground level in metres, and  $V$  is the normal volume of the reservoir in  $hm^3$

Usually, the hydrological maxima distributions have an essential positive asymmetry. In addition, they exceed zero, or some other lower limit, although, in theory, they are not limited to the upper limit. There is a great deal of analytical probability distributions that meet above conditions and might be used to forecast values of maximum hydrological characteristics not formerly observed yet. These are, for example, such distributions as follows: the log-normal (two- and three-parameter) distributions, the gamma family and related distributions (exponential, two-parameter distributions, the three-parameter Kritsky-Menkel distribution and the Pearson type III distribution, etc.), and the extreme value distributions, which were developed within the extreme value theory [47, 48].

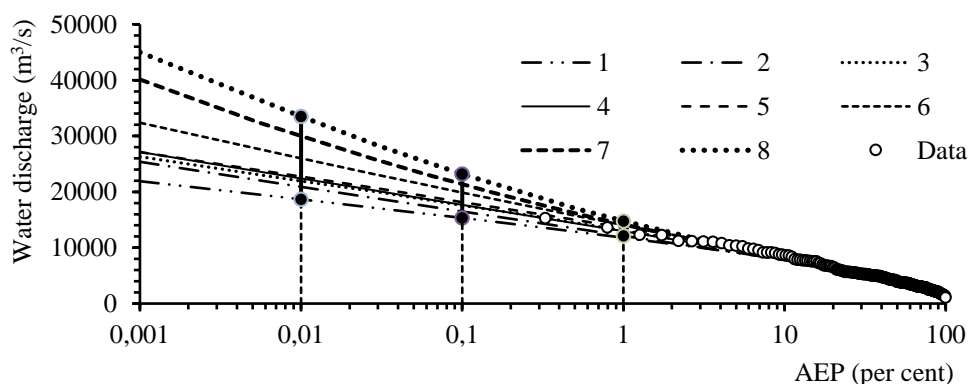


It is noteworthy that in own national standards regulating hydrological calculations, different countries in the world may recommend to use various probability distribution functions. Some of the most known standardized probability distribution function types adopted for frequency analysis of design floods in different countries using AEPs of design floods or their return periods as the main indexes in design flood classification are showed in Table 5.

Table 5 – Standardized probability distribution function types adopted for frequency analysis of design floods in different countries [59]

Recommended probability distribution function types	Country
Pearson type III distribution (P-III)	China, Switzerland
Logarithmic Pearson type III distribution (LP-III)	The US, Canada, India
Generalized extreme value distribution (GEV)	Great Britain, France
Extreme Value type I, type III distribution (EVI, EV3)	Great Britain, France
Two/Three parameters logarithmic-normal distribution	Japan
Extreme value type I distribution	Germany, Sweden, Norway
Kritsky-Menkel distribution (K-M)	Ukraine, Russia

In general, there is no theoretical or another acceptable justification for choosing an appropriate probability distribution function to forecast hydrological characteristics based on observed data [53]. Therefore, any of them might be considered as a working hypothesis, if it meets adopted statistical criteria and other considerations regarding the adequacy of simulation are taken into account [60]. However, the main problem is that different function types including standardized ones can give different prognosis results especially regarding future floods having very long recurrence intervals (See an example in Fig. 4).



Probability distribution types: 1 – K-M distribution,  $C_V = 0.5$ ,  $C_S = 2C_V$ , where  $C_V$  is the coefficient of variation,  $C_S$  is the coefficient of asymmetry; 2 – K-M,  $C_V = 0.5$ ,  $C_S = 2.5C_V$ ; 3 – P-III; 4 – EVI (Gumbel I); 5 – K-M,  $C_V = 0.6$ ,  $C_S = 2C_V$ ; 6 – K-M,  $C_V = 0.6$ ,  $C_S = 2.5C_V$ ; 7 – two-parameter lognormal distribution; 8 – LP-III

Fig. 4 – Forecasting of water discharges maxima of the Dnieper based on the Vyshgorod water level gauge data [53, 54]

Fig. 4 shows the essential divergence (uncertainty) of long-term forecasting results of flood water discharges maxima inflowing into the Kyiv reservoir based on using various probability distribution functions. In particular, the estimated limits (“sup” and “inf”) of maximal water discharges having the 1.0-per cent AEP obtained with using different probability distributions differ by more than 1.2 times; for the 0.1-per cent AEP the discharges differ more than 1.5 times; and for the 0.01-per cent AEP the difference between the “sup” and “inf” estimates of water discharges reaches almost 1.8 times. Note that the statistical testing of the hypotheses by the Pearson criterion  $\chi^2$  according to the significance level of 0.1 per cent showed all proposed distributions to be the hypotheses that agreed well with empirical frequencies of observed data [53, 54].

Based on the above, the following aim of the study was formulated. This aim consists of probabilistic forecasting the emergency situation on the Kyiv reservoir as a result of its uncontrolled overflow through the possible inaccuracy of the hydrological forecast concerning an actual water inflow into the reservoir and due to faults, poor functioning, or failures of various hydraulic structures of the reservoir during floods. To achieve the aim, the following objectives were set:

(1) to propose a method of hydrological forecasting, which allows taking into account results of long-term forecasts of flood water discharges maxima based on using various probability distribution functions;

(2) to perform hydrological forecasting of flood water discharges maxima affecting the condition of the Kyiv reservoir based on the actual hydrological observations data collected the Vyshgorod water level gauge;

(3) to assess the probability of the Kyiv reservoir overflow taking into account the occurrence possibility of shortage of the capacity of various hydraulic structures forming its water passage front;

(4) to assess the actual safety of the Kyiv reservoir against its uncontrolled overflow and reveal possible challenges if they are.

#### 4. Materials and methods

Starting from the right bank, the Kyiv reservoir water passage front includes two hydraulic structures. These are the Kyiv navigable single-lift lock and the Kyiv HPP building combined with bottom spillway outlets [20].

At present, the Kyiv navigable lock is not enough reliable as a waterway structure. The lock requires repair the upstream maintenance gate hoist system and replace the upstream maintenance miter gates, replace and repair the lock lift drainage pump system, and repair the guideways along with replacement of the service gates for the lock emptying system [61]. Formerly, in emergency mode, the lock was able to pass a flow discharge 300 m<sup>3</sup>/s. Today it is rather questionable.

The Kyiv HPP building combined with bottom spillway outlets is the main water passage hydraulic structure of the Kyiv reservoir. It consists of 5 separate sections, in each of which there are four capsule hydraulic units and four bottom outlets. Estimated flow discharge through one hydraulic turbine is 305 m<sup>3</sup>/s. Estimated flow discharge through one bottom outlet at full storage level (FSL = 103.0 m) is 305 m<sup>3</sup>/s too. Estimated flow discharge through one bottom spillway at the highest water level (HWL = 104.1 m) is 400 m<sup>3</sup>/s. Thus, the total capacity of the Kyiv reservoir water passage front is 12,500 m<sup>3</sup>/s at FSL = 103.0 m; at the HWL = 104.1 m its water

throughput taking into account the transformation of the test flood (the 0.1-per cent AEP) by the reservoir is 14,400 m<sup>3</sup>/s. The peak discharge of the test flood having the 0.1-per cent AEP without the flood transformation by the reservoir is estimated at 17,580 m<sup>3</sup>/s.

The gates of bottom spillway outlets are serviced by two lifting cranes. The design time for opening one bottom spillway hole is 30 minutes; the opening time of all bottom spillway holes is 20 hours.

On average, within flood seasons, 1-2 hydraulic units are repaired at the Kyiv HPP [20]. However, with a risk margin, the probability of a hydraulic unit being unavailable for the passage of water will hardly exceed 0.25.

To forecast of water discharges maxima of the inflow into the Kyiv reservoir, there was considered a time series of observations at the Vyshgorod water level gauge from 1787 to 1999 (Fig. 5). It covers 212 years. The time series has the following statistical parameters [53, 54]: the mean value  $\bar{x} = 4,692$  m<sup>3</sup>/s; the standard deviation  $\sigma = 2,632$  m<sup>3</sup>/s; the coefficient of variation  $C_V = 0.56$ ; the coefficient of asymmetry  $C_S = 1.26$ . The accuracy indexes of calculations of these statistical characteristics are shown in Table 6.

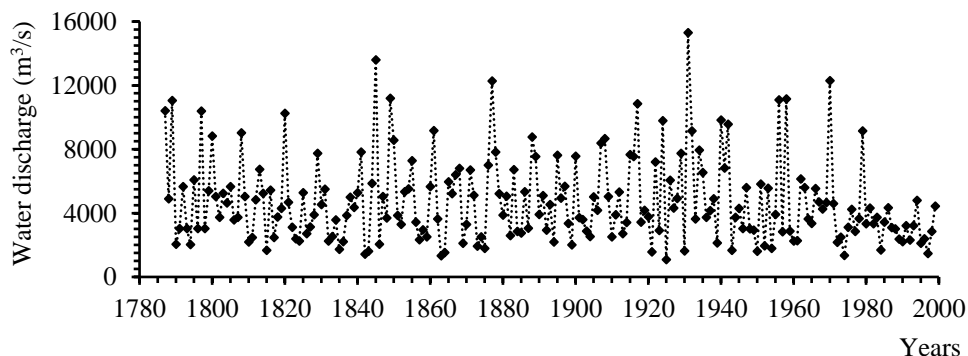


Fig. 5 – The time series of water discharges maxima of the Dnieper from 1787 to 1999 according to the Vyshgorod water level gauge data [53, 54]

Table 6 – The accuracy of calculations of the statistical characteristics for water discharges maxima of the Dnieper, the Vyshgorod water level gauge data

Parameter	Estimation	Standard error	Relative error, per cent
Mean value $\bar{x}$ ( m <sup>3</sup> /s)	4,692	180	3.8
Standard deviation $\sigma$ ( m <sup>3</sup> /s)	2,632	128	4.9
Coefficient of variation $C_V$	0.56	0.06	11.0
Coefficient of asymmetry $C_S$	1.26	0.17	13.2

Two main methods were used to assess the probability of the Kyiv reservoir overflow. To take into account the possibility of shortage of the capacity of various hydraulic structures forming the reservoir water spillway front, the failure and fault tree method was used. This method allows implementing the scenario approach practically [11]. The computational model of this method is a circuit-free tree graph, the vertex of which presents a resulting emergency event, the probability of which is

to be calculated. In our case, this resulting emergency event is the Kyiv reservoir overflow. The model includes the set of graph-analytical elements, which outline a limited set of possible events being able to cause the expected emergency event, and the set of correspondences modelling logic-probabilistic relations between various events. When modelling, special structural elements such as event symbols and logical operators are used [11, 15, 41, 62]. Logical operators display the logic of causal relationships between possible events and enable calculating the probabilities of consequence events (Table 7).

Table 7 – Formulas for calculating the probabilities of consequence events depending on logical operators

Logical operator	Formulas for estimating the probabilities of consequence events
“OR”	$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(B_i)), \quad (2)$ $B_i, i = \overline{1, n}, \text{ are compatible cause events;}$
“XOR”	$P(A) = \sum_{i=1}^n P(B_i), \quad (3)$ $B_i, i = \overline{1, n}, \text{ are incompatible cause events;}$
“AND”	$P(A) = \prod_{i=1}^n P(B_i), \quad (4)$ $B_i, i = \overline{1, n}, \text{ are compatible cause events;}$
“PROHIBITION”	$P(A) = P(B) \cdot P(C), \quad (5)$ $B, C \text{ are compatible cause events;}$
“M of N”	$P(A) = P(A)_m + P(A)_{m+1} + \dots + P(A)_n, \quad (6)$ <p>if <math>P(B_i) = P(B), i = \overline{1, n}, m &lt; n</math>:</p> $P(A)_m = \left(1 - (1 - P(B))^n\right) \cdot \left(1 - (1 - P(B))^{n-1}\right) \cdot \dots \cdot \left(1 - (1 - P(B))^{n-m+1}\right);$ $P(A)_{m+1} = P(A)_m \cdot \left(1 - (1 - P(B))^{n-m}\right), \dots, P(A)_n = P(B)^n; \quad (7)$
<p>where <math>n</math> is a total number of random cause events <math>B_i, i = \overline{1, n}</math>; <math>P(A), P(B_i), P(C)</math> are the probabilities of a consequence event <math>A</math>, a cause event <math>B_i</math>, a condition event <math>C</math>.</p>	

The probability of failures of the mechanical equipment servicing bottom spillway outlets was estimated by the formula [15, 41]:

$$P(t+t_r) = 1 - \exp\{-\lambda \cdot t \cdot \exp(-\rho \cdot t_r)\}, \quad (8)$$

where  $\lambda$  is the failure rate of the facility before the first failure;  $t$  is the service life of mechanical equipment (ME) during which at least one work operation is expected;  $\rho$  is the repair rate of ME;  $t_r$  is the additional time to repair the facility.

The failure rate  $\lambda$  of a “gate – lifting crane” system and the repair rate  $\rho$  of ME was taken according to statistical data [15, 3638]:  $\lambda = 2 \cdot 10^{-3}$ , year $^{-1}$ ;  $\rho = 10$ , year $^{-1}$ . The additional time the “gate – lifting crane” system to repair was taken  $t_r = 0.00228$  year (20 hours) [20]. The expected service life of mechanical equipment for the bottom spillway facilities was taken  $t = 10$  years.

Finally, to overcome the essential non-stochastic uncertainty of results of long-term forecasting of discharges maxima based on using various probability distribution functions (Fig. 4) the following method was used. According to this method, results obtained by using different versions of probability distribution functions are considered as expert estimates, which further are processed by methods of fuzzy set theory and fuzzy logic [63].

When fuzzy modelling, the following fuzzy variables are used:

1) “a value of the parameter  $x$  will be greater... (not less)...”; the fuzzy variable is modelled using the  $Z$  - shaped membership function;

2) “a value of the parameter  $x$  will be less than... (not greater)...”; the fuzzy variable is modelled using the  $S$  - shaped membership function.

Membership functions  $\mu_Z(x)$ ,  $\mu_S(x)$  are given graphically based on their empirical estimates  $\hat{\mu}_Z(x)$ ,  $\hat{\mu}_S(x)$ ,  $\hat{\mu}_Z(x) + \hat{\mu}_S(x) = 1$ , which are established after the statistical hypotheses testing by the Pearson criterion  $\chi^2$  on alternative probability distribution functions by values of the hypotheses validities  $v(\chi_i^2)$ .

The following fuzzification algorithm based on simulation of  $S$ -shaped and  $Z$ -shaped membership functions of fuzzy variables is considered [63].

1. With an increase in predicted values  $X_i$  of the parameter  $x$  and a simultaneous increase in values  $v(\chi_i^2)$  with increasing indexes of  $i$ -th models, empirical estimates for the  $S$ -shaped membership function of the fuzzy linguistic variable “a value of the parameter  $x$  will be less than...” follows as:

$$\hat{\mu}_S(x_i) = \frac{v(\chi_i^2)}{v(\chi_i^2)_{\max}}, \quad (9)$$

where  $v(\chi_i^2)$  is an  $i$ -th hypothesis validity;  $v(\chi_i^2)_{\max}$  is the maximum value among validities  $v(\chi_i^2)$  of alternative probability distributions considered as separate expert assumptions on a more suitable distribution.

2. Then, for the fuzzy variable “a value of the parameter  $x$  will be greater than...” empirical estimates for the  $Z$  - shaped membership function follows as:

$$\hat{\mu}_Z(x_i) = 1 - \hat{\mu}_S(x_i). \quad (10)$$

3. With a decrease in predicted values  $X_i$  of the parameter  $x$  but an increase in values  $v(\chi_i^2)$  with increasing indexes of  $i$ -th models, empirical estimates for the  $Z$ -shaped membership function of the fuzzy linguistic variable “a value of the parameter  $x$  will be greater than...” follows as:

$$\hat{\mu}_Z(x_i) = \frac{v(\chi_i^2)}{v(\chi_i^2)_{\max}}. \tag{11}$$

4. Then, for the fuzzy variable “a value of the parameter  $x$  will be less than...” empirical estimates for the  $S$  - shaped membership function follows as:

$$\hat{\mu}_S(x_i) = 1 - \hat{\mu}_Z(x_i). \tag{12}$$

Finally, membership functions of fuzzy sets for values of linguistic variables of the type of “a value of the parameter  $x$  will be in an interval...” can be found as:  $\tilde{A} = \tilde{Z} \cap \tilde{S}$ ,  $\tilde{B} = \tilde{Z} \cap \tilde{S}$ , and  $\tilde{C} = \tilde{A} \cap \tilde{B}$ .

### 5. Results

Table 8 shows results of forecasting of the maximum water discharges inflowing into the Kyiv reservoir having annual exceedance probabilities (AEPs) ranging from 0.001 to 5.0 (per cent). When forecasting, the Vyshgorod water level gauge data and eight model probability distribution functions were used.

Table 8 – Results of forecasting of maximum water discharges inflowing into the Kyiv reservoir

Hypothesis number and probability distribution type		Calculated maximum water discharge values (m <sup>3</sup> /s) according to their AEP (per cent)					
		0.001	0.01	0.1	0.5	1.0	5.0
1	Kritsky-Menkel (K-M) ( $C_V = 0.5$ , $C_S = 2C_V$ )	21,911	18,674	15,343	12,856	11,777	9,103
2	K-M ( $C_V = 0.5$ , $C_S = 2.5 C_V$ )	25,384	20,880	16,469	13,466	12,152	9,149
3	Pearson type III	26,020	21,936	17,580	14,463	13,080	9,735
4	Extreme value type I (Gumbel I)	27,120	22,415	17,687	14,379	12,951	9,605
5	K-M ( $C_V = 0.6$ , $C_S = 2C_V$ )	27,120	22,756	18,158	15,014	13,560	10,088
6	K-M ( $C_V = 0.6$ , $C_S = 2.5 C_V$ )	32,375	25,994	19,894	15,765	14,076	10,088
7	Two-parameter lognormal	40,100	29,930	21,356	16,203	14,172	9,830
8	Logarithmic Pearson type III	45,000	33,500	23,200	17,043	14,744	10,000

After the statistical hypotheses testing by the Pearson’s criterion  $\chi^2$ , the probability distributions used in forecasting were divided into two groups of expert models. The first group included the distributions 1-3, the second – the distributions 4-8. When grouping the distributions, it was taken into account that their validities

$v(\chi_i^2)$  increase monotonically within each of the groups: from the distribution (hypothesis) 1 to the distribution (hypothesis) 3, from the distribution (hypothesis) 4 to the distribution (hypothesis) 8. The results of calculating empirical values of membership functions of forecasted values of the Dnieper water discharge maxima to appropriate fuzzy sets are given in Table 9.

Table 9 – Empirical values of membership functions of forecasted values of the Dnieper water discharge maxima depending on the probability distributions

Hypothesis number and probability distribution type		$v(\chi_i^2)$	Empirical values of membership functions	
			$\hat{\mu}_Z(x)$	$\hat{\mu}_S(x)$
1	Kritsky-Menkel (K-M) ( $C_V = 0.5$ , $C_S = 2C_V$ )	0.0418	0.7196	0.2804
2	K-M ( $C_V = 0.5$ , $C_S = 2.5 C_V$ )	0.0865	0.4195	0.5805
3	Pearson type III	0.1491	0	1
4	Extreme value type I (Gumbel I)	0.0425	0.9062	0.0938
5	K-M ( $C_V = 0.6$ , $C_S = 2C_V$ )	0.1256	0.7227	0.2773
6	K-M ( $C_V = 0.6$ , $C_S = 2.5 C_V$ )	0.2874	0.3655	0.6345
7	Two-parameter lognormal	0.3752	0.1718	0.8282
8	Logarithmic Pearson type III	0.4530	0	1

Below, Fig. 6-11 show geometric illustrations of the computed membership functions.

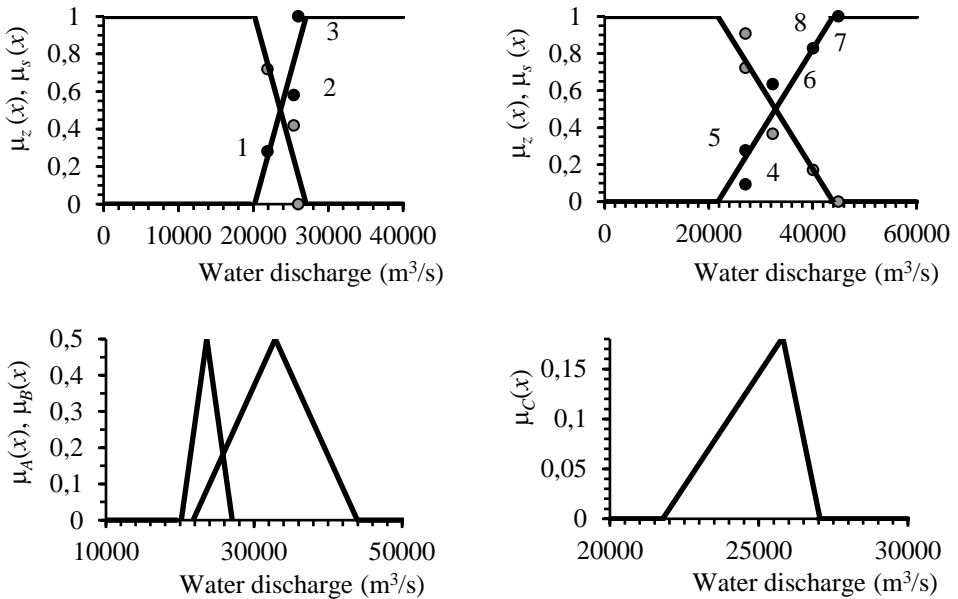


Fig. 6 – Membership functions characterizing forecasted values of the Dnieper water discharge maxima having the 0.001-per cent AEP

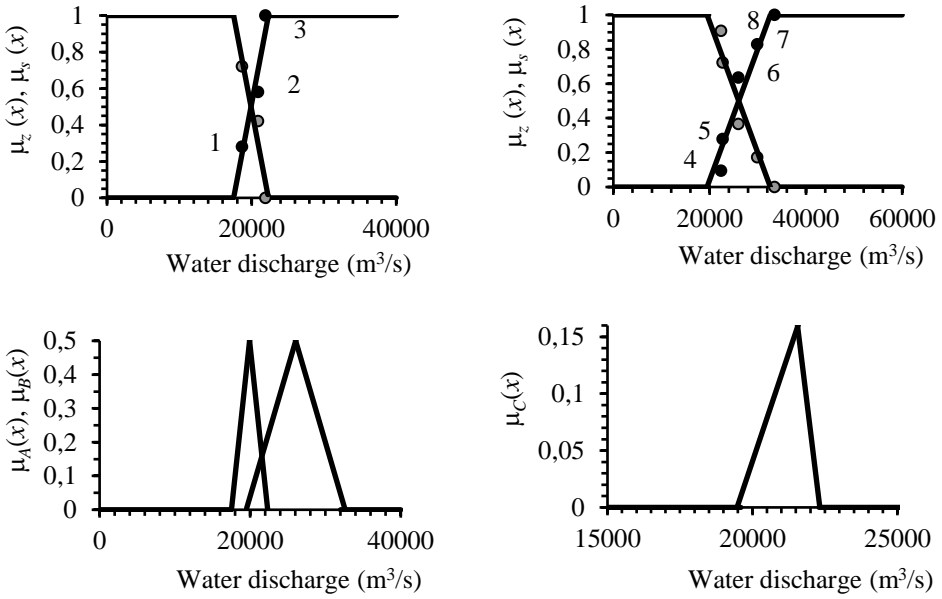


Fig. 7 – Membership functions characterizing forecasted values of the Dnieper water discharge maxima having the 0.01-per cent AEP

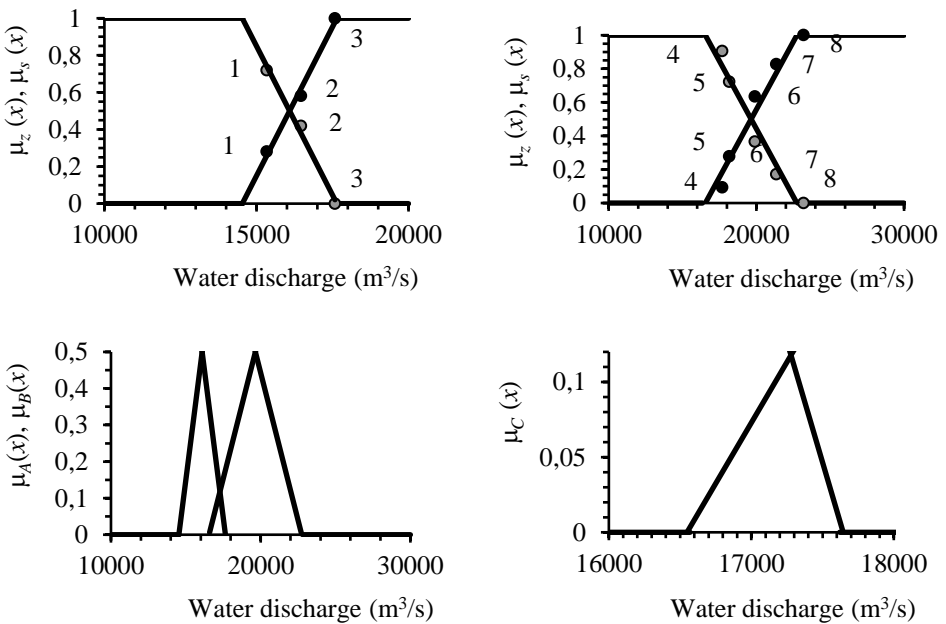


Fig. 8 – Membership functions characterizing forecasted values of the Dnieper water discharge maxima having the 0.1-per cent AEP



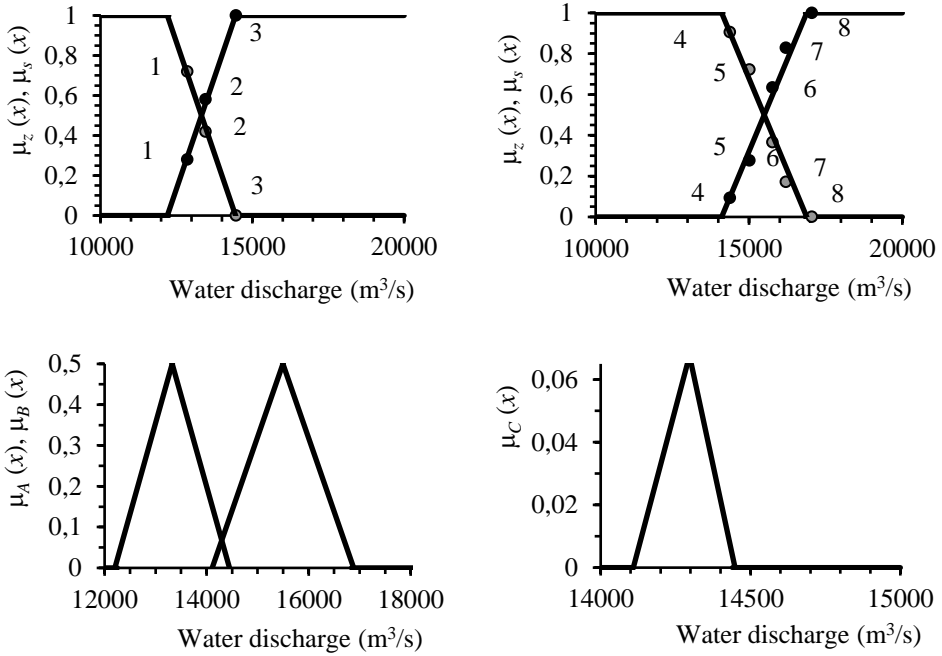


Fig. 9 – Membership functions characterizing forecasted values of the Dnieper water discharge maxima having the 0.5-per cent AEP

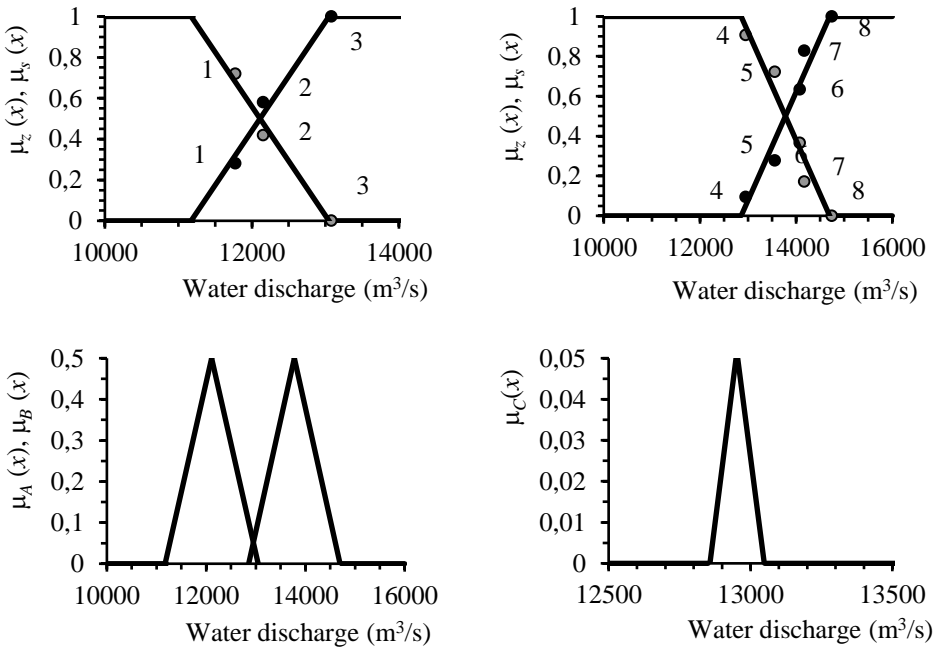


Fig. 10 – Membership functions characterizing forecasted values of the Dnieper water discharge maxima having the 1.0-per cent AEP

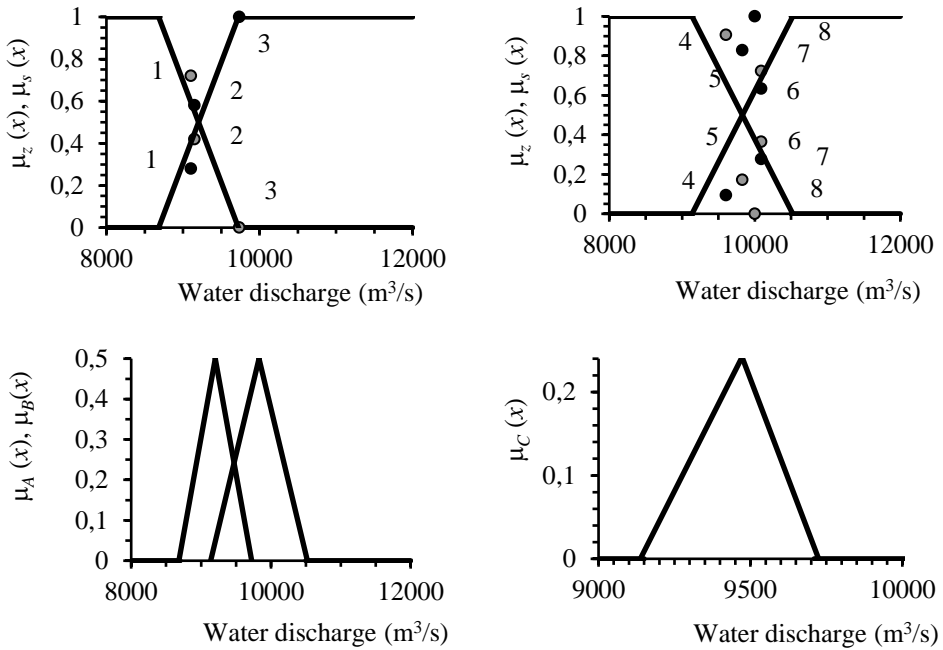


Fig. 11 – Membership functions characterizing forecasted values of the Dnieper water discharge maxima having the 5.0-per cent AEP

The membership functions of fuzzy sets for the values of linguistic variables of the type of “a maximum water discharge having an annual exceedance probability (AEP) (per cent) will be in an interval...”  $\tilde{A} = \tilde{Z} \cap \tilde{S}$  were computed on the results of forecasting by means of probability distributions with indices  $i = \overline{1,3}$ ; in turn, the membership functions  $\tilde{B} = \tilde{Z} \cap \tilde{S}$  were computed on the results of forecasting by means of probability distributions with indices  $i = \overline{4,8}$ .

After modelling of fuzzy sets  $\tilde{C}$  for linguistic variables of the type of “a maximum water discharge having an AEP (per cent) will be in an interval...”, the corresponding fuzzy intervals  $Su_C = \{Q_{max} : \mu_C(Q_{max}) > 0\}$  with searched cores  $Co_C = \{Q_{max} : \mu_C(Q_{max}) = \max\}$  of fuzzy sets were obtained. Defuzzification was performed by the centroid method [64]. Analytical modelling of membership functions was performed in MS Excel. The computed generalized water discharge maxima values of the inflow into the Kyiv reservoir (the Vyshgorod water level gauge) having annual exceedance probabilities (AEPs) ranging from 0.001 to 5.0 (per cent) are given in Table 10 and Fig. 12.

Table 10 – Generalized values of maximal water discharges inflowing into the Kyiv reservoir (the Vyshgorod water level gauge)

Annual exceedance probability (AEP) (per cent)	0.001	0.01	0.1	0.5	1.0	5.0
Maximum water discharge (m³/s)	25,000	21,215	17,170	14,285	12,954	9,450

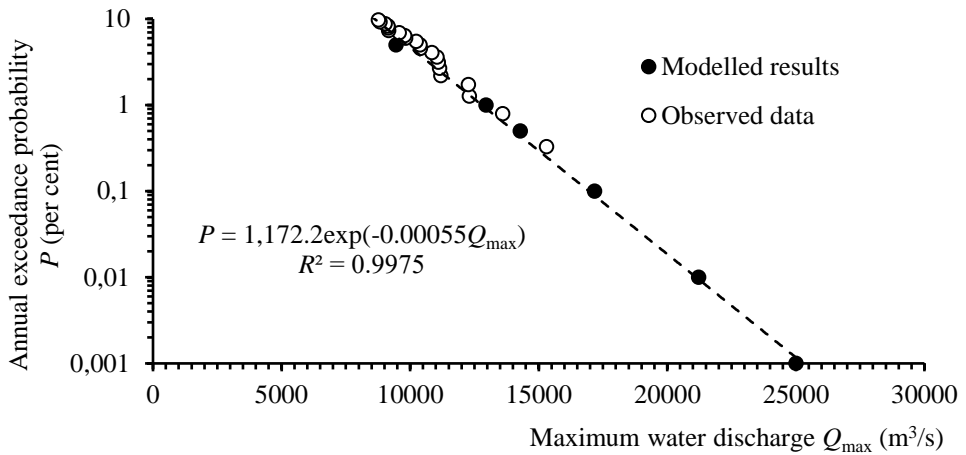


Fig. 12 – The computed curve of the generalized exceedance probability function of water discharge maxima  $Q_{\max}$  ranging from the 5.0-per cent AEP to the 0.001-percent AEP (the Vyshgorod water level gauge)

Accordingly, the annual exceedance probability (AEP)  $P$  (per cent) of calculated values of water discharge maxima  $Q_{\max}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ranging from the 5.0-per cent AEP to the 0.001-percent AEP are well described by the function

$$P = 1172.2 \exp(-0.00055Q_{\max}). \tag{12}$$

To measure the quality of the prediction performing with the function (12) for maximum discharges having AEPs less than 10.0 per cent the appropriate verification was carried out. To verify whether forecast results could adequately represent observed data, the estimators of standard error and relative standard error and the Nash-Sutcliff model efficiency criterion [65] were used. The Nash-Sutcliff model efficiency criterion (NSE) [65] is widely used for assessment of the predictive power of hydrological models. In particular, it is accepted that hydrological predictions with the NSE above 0.8 can be considered as being very good. Fig. 13 shows the graphical illustration of the NSE assessment.

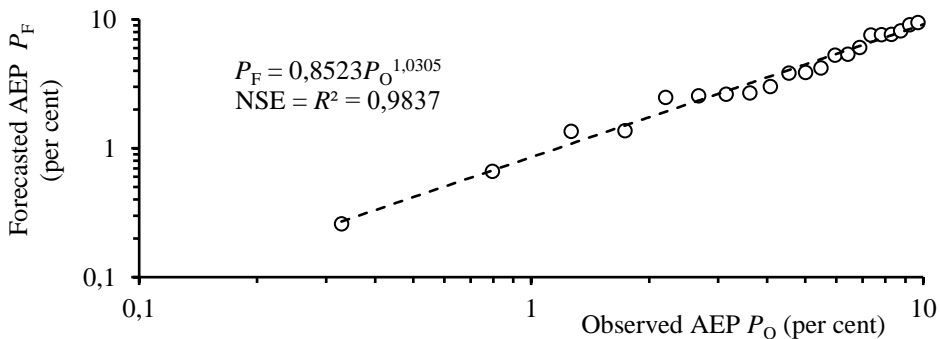


Fig. 13 – The Nash-Sutcliff model efficiency criterion (NSE) assessment

As well, the standard error for AEPs ranging from 10.0 to 0.33 (per cent) turned out to be equal 0.03 per cent. It is 0.0003 (year<sup>-1</sup>) in the interval of probability values from 0.1 to 0.0033 (year<sup>-1</sup>). The relative standard error does not exceed 6.6 per cent. According to all applied criteria the predictive power of the generalized distribution function (12) of water discharge maxima inflowing into the Kyiv reservoir can be considered as being acceptable in the interval of AEP values from 10.0 to 0.001 (per cent).

The failure and fault tree diagram used in assessing the Kyiv reservoir overflow probability is presented below in Fig. 14. Six incompatible hypothetical emergency situations at the Kyiv reservoir were considered:

$S_1$  – the maximum water discharge of the inflow into the Kyiv reservoir reaches 17,580 m<sup>3</sup>/s; the water level in the reservoir rises to the highest water level (HWL) of 104.1 m; there occurs a failure at the spillway facilities of the reservoir when one hydro unit fails or one bottom outlet stays unavailable though the mechanical equipment failure, etc.;

$S_2$  – the maximum water discharge of the inflow into the Kyiv reservoir reaches 16,475 m<sup>3</sup>/s; the water level in the reservoir rises to the highest water level (HWL) of 104.1 m because of a failure at the spillway facilities occurs when one hydro unit fails, and simultaneously two bottom outlets stay unavailable though the mechanical equipment failure, etc.;

$S_3$  – the maximum water discharge of the inflow into the Kyiv reservoir reaches 16,170 m<sup>3</sup>/s; the water level in the reservoir rises to the highest water level (HWL) of 104.1 m because of a failure at the spillway facilities occurs when two hydro units fail, and simultaneously two bottom outlets stay unavailable though the mechanical equipment failure, etc.;

$S_4$  – the maximum water discharge of the inflow into the Kyiv reservoir reaches 15,770 m<sup>3</sup>/s; the water level in the reservoir rises to the highest water level (HWL) of 104.1 m because of a failure at the spillway facilities occurs when two hydro units fail, and simultaneously three bottom outlets stay unavailable though the mechanical equipment failure, etc.;

$S_5$  – the maximum water discharge of the inflow into the Kyiv reservoir reaches 15,465 m<sup>3</sup>/s; the water level in the reservoir rises to the highest water level (HWL) of 104.1 m because of a failure at the spillway facilities occurs when three hydro units fail, and simultaneously three bottom outlets stay unavailable though the mechanical equipment failure, etc.;

$S_6$  – the maximum water discharge of the inflow into the Kyiv reservoir reaches 15,065 m<sup>3</sup>/s; the water level in the reservoir rises to the highest water level (HWL) of 104.1 m because of a failure at the spillway facilities occurs when three hydro units fail, and simultaneously four bottom outlets stay unavailable though the mechanical equipment failure, etc.

The annual probability of failure of any of the 20 hydro units of the Kyiv HPP taking into account data of S. Potashnik [32] and the current Ukrhydroenergo information on repair and maintenance works [20] was set at 0.25. Then, the expected probability of a hydro unit failure will be  $P_u = 1 - (1 - 0.25)^{1/20} = 0.0143$  (year<sup>-1</sup>). The probability of the failure of a bottom outlet  $P_b$  was calculated by the formula (7) according to statistical data [15, 36-38] including the current Ukrhydroenergo information [20] and amounted to  $P_b = 0.0194$  (year<sup>-1</sup>).

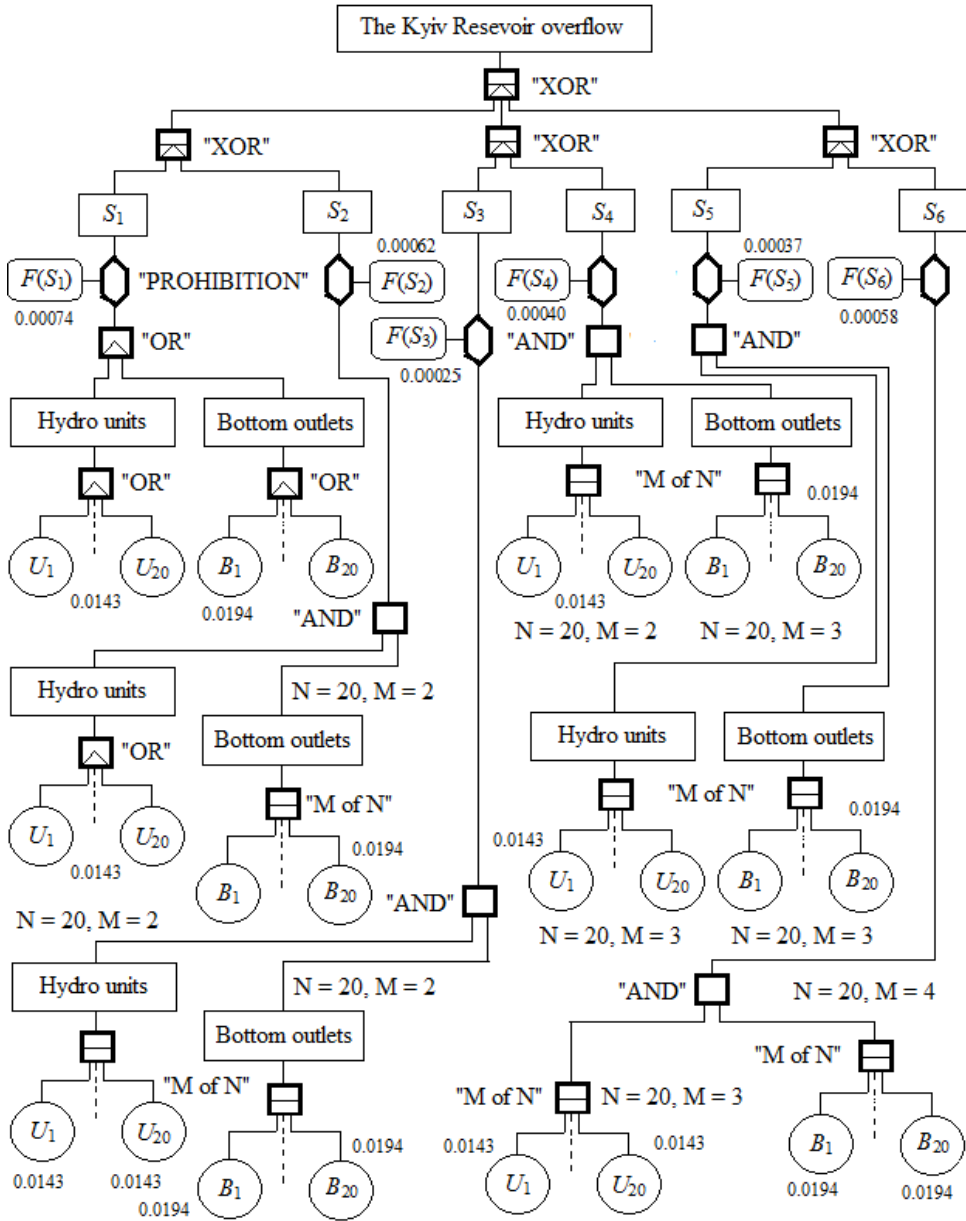


Fig. 14 – The failure and fault tree diagram to assess the Kyiv reservoir overflow probability

Table 11 shows annual exceedance probabilities ( $AEP_i$ ) (per cent) of flood conditions  $F(S_i)$  triggering the hypothetical emergency situations  $S_i$ ,  $i = \overline{1,6}$ , and the annual probabilities  $pF(S_i)$  of these condition occurrence ( $\text{year}^{-1}$ ) in a full group of events. To form the full group of events, the annual probabilities  $pF(S_i)$  ( $\text{year}^{-1}$ ) were estimated as:  $pF(S_1) = 0.01AEP_1$ ,  $pF(S_2) = 0.01(AEP_2 - AEP_1)$ , ... ,  $pF(S_6) = 0.01(AEP_6 - AEP_5)$ .

Table 11 – Parameters of the flood conditions  $F(S_i)$  triggering the hypothetical emergency situations  $S_i$ ,  $i = \overline{1,6}$

Parameters	Flood conditions					
	$F(S_1)$	$F(S_2)$	$F(S_3)$	$F(S_4)$	$F(S_5)$	$F(S_6)$
Maximum water discharge ( $m^3/s$ )	17,580	16,475	16,170	15,770	15,465	15,465
AEP (per cent)	0.074	0.136	0.161	0.201	0.237	0.295
The flood condition occurrence annual probability ( $year^{-1}$ ) in the full group of events	0.00074	0.00062	0.00025	0.00040	0.00037	0.00058

The calculation of the failure and fault tree (Fig. 14) showed the total probability of the Kyiv reservoir overflow equal to  $3.84 \cdot 10^{-4}$  ( $year^{-1}$ ). This is about four emergency cases per 10,000 years, or one such case per 2,500 years.

## 6. Discussion

The study showed that the forecasted test maximum water discharge value having 0.1-per cent AEP generalized on the eight model probability distributions calculated according to data of the Vyshgorod water level gauge is  $17,170 m^3/s$ . This forecasted discharge value is less than the value of the design discharge of  $17,580 m^3/s$  of the 0.1-per cent flood, to which the hydraulic structures of the Kyiv reservoir were calculated. The forecasted AEP of the design water discharge of  $17580 m^3/s$  is 0.074 (per cent) or  $7.4 \cdot 10^{-4}$  ( $year^{-1}$ ). It is almost 15 per cent less than the 0.1-per cent AEP design value set by current national standards [55]. The last may indicate that the hydrological safety of the Kyiv reservoir hydraulic structures meets the current national standards [55] with a 15 per cent risk margin.

In addition, the hydraulic structures reduce the probability of the reservoir overflow to the value of  $3.84 \cdot 10^{-4}$  ( $year^{-1}$ ). It is near 1.9 times less compared to the forecasted AEP of  $7.4 \cdot 10^{-4}$  ( $year^{-1}$ ) of the design discharge of  $17580 m^3/s$ , and it also confirm a high guarantee the hydrological safety of downstream territories.

Table 12 shows the occurrence probabilities of six incompatible hypothetical emergency situations at the Kyiv reservoir and their contributions to the total probability of the reservoir overflow. The obtained results indicate that the most probable dangerous event is the hypothetical emergency situation  $S_1$ . This situation can occur when the maximum water discharge of the inflow into the Kyiv reservoir reaches  $17,580 m^3/s$ , the water level in the reservoir rises to the highest water level (HWL) of 104.1 m, and there occurs a failure at the spillway facilities when one hydro unit fails or one bottom outlet stays unavailable though the mechanical equipment failure, etc. In general, the study results may indicate that the water spillway front of the Kyiv reservoir is designed with significant reserves for the passage of floods that are less than the design 0.1-per cent flood. As well, calculations showed that floods having AEPs of more than 0.136 per cent give in a sum less than 5 per cent of the total Kyiv reservoir overflow probability.

Table 12 – Analysis of probabilities of the six incompatible hypothetical emergency situations at the Kyiv reservoir

Parameter	Hypothetical emergency situations						Total
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	
Probability	$3.66 \cdot 10^{-4}$	$1.56 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$7.1 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$3.84 \cdot 10^{-4}$
Share (per cent)	95.29	4.07	0.39	0.19	0.04	0.02	100

Fig. 15 shows the curve of the reservoir overflow probability depending on the floods that are considered as triggers of the six examined hypothetical emergency situations. This curve can be used as a model curve of hydrological risk of the Kyiv reservoir overflow in consequence of floods having annual exceedance probabilities ranging from 0.295 per cent to 0.074 per cent.

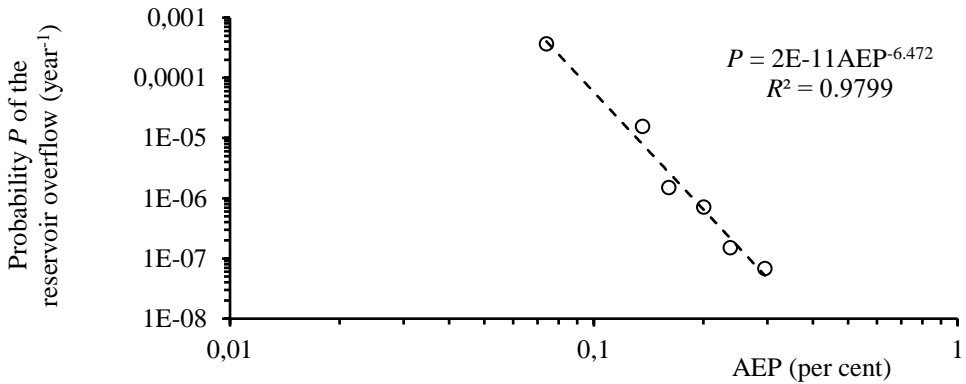


Fig. 15 – The curve of the probability of the Kyiv reservoir overflow depending on annual exceedance probabilities of floods

Eventually, it can be concluded that the risk of the Kyiv reservoir overflow through floods, the AEPs of which are greater than 0.3 per cent, is utterly low.

### 7. Conclusions

The probabilistic forecast the emergency situation occurrence on the Kyiv reservoir as a result of its uncontrolled overflow was performed. The forecast was carried out taking into account the possible inaccuracy of the hydrological forecast concerning water inflow into the reservoir and possible failures of the reservoir water passage hydraulic structures during floods.

A method of hydrological forecasting, which allows taking into account results of long-term forecasts of flood water discharges maxima based on using various probability distributions, was proposed. According to this method, results obtained by using different versions of distributions are considered as expert estimates, which further are processed by methods of fuzzy set theory and fuzzy logic.

To forecast water discharges maxima of the inflow into the Kyiv reservoir, there was taken the time series of observations data collected the Vyshgorod water level gauge from 1787 to 1999. A total of eight model probability distributions were

considered. The fuzzy modelling showed that the forecasted value of the maximum water discharge of 17,170 m<sup>3</sup>/s having the 0.1-per cent annual exceedance probability (AEP) generalized on eight model probability distributions is less than the value of the design discharge of 17,580 m<sup>3</sup>/s of the 0.1-per cent flood for which the spillway structures of the Kyiv reservoir were calculated. This indicates that the hydrological safety of the Kyiv reservoir water passage structures meets the current standards [55] with a 15 per cent risk margin.

To assess the probability of the Kyiv reservoir overflow taking into account the occurrence possibility of the capacity shortage of various hydraulic structures to water passage, the failure and fault tree method was used. Totally, six incompatible hypothetical emergency situations at the Kyiv reservoir were considered. The calculation of the failure and fault tree (Fig. 14) showed the total probability of the Kyiv reservoir overflow equal to  $3.84 \cdot 10^{-4}$  (year<sup>-1</sup>). It is near 1.9 times less compared to the forecasted AEP that is  $7.4 \cdot 10^{-4}$  (year<sup>-1</sup>) for the design discharge of 17580 m<sup>3</sup>/s, that gives quite a high guarantee of the hydrological safety of the infrastructure and population downstream of the reservoir.

## REFERENCES

1. Valuing Water. The United Nations World Water Development Report 2021. UNESCO. Paris, France. Available from <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2021/>.
2. Tadda, M.A., Ahsan, A., Imteaz, M., Shitu, A., Danhassan, U.A., and Muhammad, A.I. (2020). Operation and Maintenance of Hydraulic Structures. Hydraulic Structures – Theory and Applications. IntechOpen; DOI: 10.5772/intechopen.91949. Available from <https://www.intechopen.com/chapters/72208>.
3. Muller, M., Biswas, A., Martin-Hurtado, R. and Tortajada, C. (2015). Built infrastructure is essential. Science, Vol. 349, No. 6248, 585–586; doi.org/10.1126/science.aac7606.
4. Ukraine. Water resources. FAO of the UN. Available from [http://www.fao.org/NR/water/aquastat/countries\\_regions/Profile\\_segments/UKR-WR\\_eng.stm](http://www.fao.org/NR/water/aquastat/countries_regions/Profile_segments/UKR-WR_eng.stm).
5. Khilchevskiy, V., Grebin, V., Zabokrytska, M., Zhovnir, V., Bolbot, H. & Plichko, L. (2020). Hydrographic characteristic of ponds distribution in Ukraine – Basin and regional features. Journal of Water and Land Development. No. 46 (VII–IX), 140–145; DOI: 10.24425/jwld.2020.134206.
6. World Commission on Dams. (2000). Dams and Development: A New Framework for Decision-Making. An Overview. Earthscan Publications Ltd, London, UK, 40 p. Available from [https://www.rivernet.org/general/wcd/wcd\\_overview\\_english.pdf](https://www.rivernet.org/general/wcd/wcd_overview_english.pdf).
7. Saxena, K.R., and Sharma, V.M. (2005). Dams: Incidents and Accidents. A.A. BALKEMA PUBLISHERS. Leiden. London. New York. Philadelphia. Singapore, 228 p.
8. Costa, J.E. (1985). Floods from Dam Failures. U.S. Geological Survey Open-File Report 85-560, Denver, Colorado, 54 p.
9. Fread, D.L. (1996). Dam-Breach Floods. In: Singh, V.P. (eds). Hydrology of Disasters. Water Science and Technology Library, Vol. 24. Springer, Dordrecht; [https://doi.org/10.1007/978-94-015-8680-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8680-1_5).
10. Pierce, M.W., Thornton, C.I., and Abt, S.R. (2010). Predicting Peak Outflow from Breached Embankment Dams. J. Hydrology Eng, 15, 338–349.
11. Stefanyshyn, D.V. (2011). Forecasting accidents on dams in the tasks of assessment and ensuring their reliability and safety. Hydropower of Ukraine, № 3–4, 52–60. (in Ukrainian).
12. Dams Sector. Estimating Loss of Life for Dam Failure Scenarios. (2011). Homeland Security, 94 p. Available from [https://damsafety.org/sites/default/files/files/DamsSectorConsequenceEstimation\\_LossOfLife.pdf](https://damsafety.org/sites/default/files/files/DamsSectorConsequenceEstimation_LossOfLife.pdf).



13. Bellendir, E.N., Stefanyshyn, D.V., Filippova, E.A. (2012). Failure risk assessment and its role in safety management at the design. Proc. International Commission on Large Dams (ICOLD), 24th Congress, Q. 93, R.5, Kyoto: Japan, 68–84.
14. Aureli, F., Maranzoni, A., Petaccia, G. (2021). Review of Historical Dam-Break Events and Laboratory Tests on Real Topography for the Validation of Numerical Models. *Water*, 13, 1968; <https://doi.org/10.3390/w13141968>.
15. Veksler, A.B., Ivashintsov, D.A., and Stefanishin, D.V. (2002). Reliability, social and environmental safety of hydraulic structures: risk assessment and decision making. St. Petersburg: VNIIG B.E. Vedeneeva, 591 p. (in Russian).
16. Lessons from historical dam incidents. Project: SC080046/R1. Environment Agency, Horizon House, Bristol, 160 p. Available from [https://assets.publishing.service.gov.uk/media/603369e7e90e07660cc43890/\\_Lessons\\_from\\_Historical\\_Dam\\_Incidents\\_Technical\\_Report.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/media/603369e7e90e07660cc43890/_Lessons_from_Historical_Dam_Incidents_Technical_Report.pdf).
17. Stefanishin D.V. (2008). Breakdown forecast of the designing and constructing dams using the statistical analysis results of the previous breakdowns. *Izvestiya B.E. Vedeneev VNIIG*, V. 251, 3–9. (in Russian).
18. Toledo, M.Á., Morán, R., and Oñate, E. (Eds.).(2015). *Dam Protections against Overtopping and Accidental Leakage* (1st ed.). CRC Press, London, 328 p.; <https://doi.org/10.1201/b18292>.
19. Zhang, L.M., Xu, Y. and Jia, J.S. (2009). Analysis of earth dam failures: A database approach. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 3:3, 184–189; DOI: 10.1080/17499510902831759.
20. Ukrhydroenergo. Kyiv HPP. Available from [https://uhe.gov.ua/filiyi/filiya\\_kaskad\\_kyyivskykh\\_hes\\_i\\_haes/kyyivska\\_hes](https://uhe.gov.ua/filiyi/filiya_kaskad_kyyivskykh_hes_i_haes/kyyivska_hes). (in Ukrainian).
21. River basin management plan for the Upper Dnieper pilot basin of Ukraine. (2015). Draft. Contract No. 2011/279-666. Prepared by UNENGO “MAMA-86”. Kyiv, 115 p. Available from [http://blacksea-riverbasins.net/sites/default/files/RBMP\\_Upper%20Dnieper\\_UA\\_EN\\_final\\_1.pdf](http://blacksea-riverbasins.net/sites/default/files/RBMP_Upper%20Dnieper_UA_EN_final_1.pdf).
22. Shevchuk, S.A., Vishnevsky, V.I., Shevchenko, I.A., and Kozytsky, O.M. (2019). Research of water objects of Ukraine using the data of remote sensing of the Earth. *Land reclamation and water management*, No 2, 146–156; DOI: <https://doi.org/rn.3rn73/mivg201902-198>. (in Ukrainian).
23. Obodovskiy, O.G., Mechkin, K.R. (2018). The Dnieper Cascade as part of International Waterway E40. *Geog. and tourism*, Vol. 6, No. 1, 69–75; DOI: 10.5281/zenodo.1314030.
24. Zheleznyak, M., Blaylock, G., Gontier, G., and Konoplev, A. (1995). Modeling of radionuclide transfer in rivers and reservoirs: validation study within the IAEA/CEC VAMP Programme. *International Symposium on Environmental Impact of Radioactive Releases*, IAEA, Vol. 8, Vienna, 330–331.
25. Kivva, S., Zheleznyak, M., Bezhenar, R., Pylypenko, O., Sorokin, M., and al. (2021). Modeling of major environmental risks for the Kyiv city, Ukraine from the Dnieper river waters – inundation of coastal areas and contamination by the radionuclides deposited in bottom sediments after the Chernobyl accident, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr., EGU21-13038, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13038>, 2021.
26. Jacyk, A.V., Yakovlev, Ye.O., Osadchuk, V.O. (2002). On the question of the descent of the Kyiv reservoir. Kyiv, Oriiany, 52 p. (in Ukrainian).
27. Wieland, M., Mueller, R. (2009). Dam safety, emergency actions plans and water alarm systems. *International Water Power & Dam Construction*. January, 34–38.
28. Rogers, J.D. (2002). *Dams and disasters: a brief overview of dam building triumphs and tragedies in California’s past*. Berkeley, University of California, 158 p. Available from [https://web.mst.edu/~rogersda/dams\\_of\\_ca/Dams-of-California-Presentation-2012.pdf](https://web.mst.edu/~rogersda/dams_of_ca/Dams-of-California-Presentation-2012.pdf).
29. Serra-Llobet, A., Tàbara, J.D., and Sauri, D. (2013). The Tous dam disaster of 1982 and the origins of integrated flood risk management in Spain. *Nat Hazards* 65, 1981–1998; <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0458-0>.

30. Taum Sauk Pumped Storage Project (No. P-2277). (2006). Dam Breach Incident. Incident Description. FERC Staff Report. Available from <http://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/projects/taum-sauk/staff-rpt.asp>.
31. Stefanishin, D.V., Romanchuk, E.G. (2011). Probabilistic modeling of hypothetical scenarios of two atypical accidents at hydropower facilities in case of automation failures. Prevention of accidents of buildings and structures. Available from <https://pamag.ru/src/vmgs-heo/vmgs-heo.pdf>. (in Russian).
32. Potashnik, S.I. (1986). Cascade of Sredne Dnieper HPPs: Development and Operation Experience. Moscow, Energoatomizdat, 144 p. (in Russian).
33. Independent forensic team report Oroville dam spillway incident. (2018), 584 p. Available from <https://damsafety.org/sites/default/files/files/Independent%20Forensic%20Team%20Report%20Final%2001-05-18.pdf>.
34. Koskinas, A., Tegos, A., Tsira, P., Dimitriadis, P., Iliopoulou, T., Papanicolaou, P., Koutsyiannis, D., and Williamson, T. (2019). Insights into the Oroville Dam 2017 Spillway Incident. *Geosciences*, 9, 37; doi:10.3390/geosciences9010037.
35. Salmon, G.M., and Hartford, D.N.D. (1995). Risk analysis for dam safety. Part I, II. *Int. Water Power and Dam Construction*. March, 42–47.
36. Lagerholm, S. (1996). Safety and reliability of spillway gates. Repair and upgrading of dams Symposium, Stockholm, 362–373.
37. Johansen, P.M., Vick, S.G., and Rikartsen, C. (1997). Risk analyses of three Norwegian rockfill dams. *Hydropower'97*, Balkema Rotterdam, 431–442.
38. Lecornu, J. (1998). Dam Safety: from the Engineer's Duty to Risk Management. *The International Journal on Hydropower & Dams*, Vol. 5, 43–56.
39. Stefanyshyn, D.V. (2008). Assessment of accident risks to support safety of the Boureya dam. Proc. of Int. Scientific School "Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems", Saint-Petersburg, 377–382.
40. Romanchuk, K.G., and Stefanyshyn, D.V. (2015). Probabilistic predicting of the emergencies on waterworks due to failures of spillway capacity of weirs. *Environmental safety and natural resources*, № 4 (20), 70–79. (in Ukrainian).
41. Stefanyshyn, D., Benatov, D. Application of a logical-probabilistic method of failure and fault trees for predicting emergency situations at pressure hydraulic facilities (The case of Kakhovka hydroelectric complex). (2020). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/2 (106), 55–69. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.208467.
42. Blöschl, G., Bierkens, M.F.P., Chambel, A., Cudennec, Ch., Destouni, G., Fiori, A., Kirchner, J.W., McDonnell, J. J., Savenije, H. H.G., Sivapalan, M., Stumpp, Ch., Toth, E., Volpi, E., and al. (2019) Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 64:10, 1141-1158; DOI: 10.1080/02626667.2019.1620507.
43. Tarasova, L., Merzl, R., Kiss, A., Basso, S., Blöschl, G., Merz, B., Alberto Viglione, A., Plötner, S., and al. (2019). Causative classification of river flood events. *WIREs Water* published by Wiley Periodicals, Inc., 23 p; DOI:10.1002/wat2.1353.
44. Chow, Y.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Company, 294 p.
45. *Handbook of Engineering Hydrology. Fundamentals and Applications*. (2014). Edited by Saeid Eslamian. Taylor & Francis Group, LLC, 624 p.
46. Flood flow frequency. (1982). Guidelines for determining. Bull. #17B of the Hydrology Subcommittee. U.S. Department of the Interior, Reston, Virginia, 194 p.
47. *Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security (NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences)*. (2007). Paperback: Editors: O. F. Vasiliev, P. H. A. J. M. van Gelder, E. J. Plate, M. V. Bolgov. Springer; 1 edition, 480 p. Available from <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-1-4020-5741-0>.
48. Koutsyiannis, D. (2008). Probability and statistics for geophysical processes. National Tech. University of Athens. Available from <https://www.itia.ntua.gr/en/docinfo/1322/>.

49. Apel, H., Merz, B., and Thielen, A.H. (2008). Quantification of uncertainties in flood risk assessments. *International Journal of River Basin Management*, 6, 2, 149–162.
50. Review of Applied European Flood Frequency Analysis Methods. (2012). Editors: Castellarin, A., Kohnová, S., Gaál, L., Fleig, A., Salinas, J.L., Toumazis, A., and al. Centre for Ecology & Hydrology, 130 p. Available from [https://www.academia.edu/2172432/Review\\_of\\_applied-statistical\\_methods\\_for\\_flood-frequency\\_analysis\\_in\\_Europe](https://www.academia.edu/2172432/Review_of_applied-statistical_methods_for_flood-frequency_analysis_in_Europe).
51. Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., and Kjeldsen, T.R. (2012). A Review of Applied Methods in Europe for Flood Frequency Analysis in a Changing Environment. [Research Report] irstea, 189 p. Available from <https://hal.inrae.fr/hal-02597863/document>.
52. Hrachowitz, M., and P. Clark, M. (2017). HESS Opinions: The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 3953–3973; <https://doi.org/10.5194/hess-21-3953-2017>
53. Stefanyshyn, D.V. (2018). On the use of the type I Gumbel distribution to assess risks given floods. *Mathematical modeling in economy*, №1, 74–83.
54. Korbutiak, V., Stefanyshyn, D., Lahodniuk, O., and Lahodniuk, A. (2020). The combined approach to solving issues of the flood hazard assessment using water gauge records and spatial data. *Acta Sci. Pol. Architectura* 19 (1), 111–118; DOI: 10.22630/ASPA.2020.19.1.12.
55. DNB B.2.4-3: 2010. (2010). Hydrotechnical, energy and reclamation systems and structures, underground mining. Substantive provisions, Kyiv, 37 p. (in Ukrainian).
56. Andres, M. (2000). Design flood definition and reservoir characteristics. Seasonal flood storage influence. The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. *Trans. of the 20-th Int. Congress on Large Dams*, Vol. 1, Q. 76, R.26, Beijing-China, 387–403.
57. Loukola, E., and Maijala, T. (1998). New dam safety guidelines in Finland. In L. Berga (ed.), *Dam Safety; Proc. Intern. Symp.*, Barcelona, 17-19 June, Rotterdam, Balkema.
58. Small dams. Guidelines for design, construction and monitoring. (2002). Coordination by G. Degoutte. French Committee on Large Dams, 179 p. Available from <https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/pb2002-en.pdf>.
59. Ren, M., He, X., Kan, G., Wang, F., Zhang, H., Li, H., Cao, D., Wang, H., Sun, D., Jiang, X., Wang, G., and Zhang, Z. (2017). A Comparison of Flood Control Standards for Reservoir Engineering for Different Countries. *Water*, 9, 152; [doi.org/10.3390/w9030152](https://doi.org/10.3390/w9030152).
60. Stefanyshyn, D.V. (2008). Application of risk analysis to support safety of dams and flooded territories against floods. *Proc. of Int. Scientific School “Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems”*. June 24–28, Saint-Petersburg, Russia, 371–376.
61. Dnipro waterway Ukraine. (2016). Engineering evaluation report. Final, 175 p. Available from <https://mtu.gov.ua/files/USACEReport.pdf>.
62. Stefanyshyn, D.V., and Shtilman, V.B. (2012). Towards assessing the probability of water overflow across the dam crest. *Magazine of Civil Engineering*, № 9, 70–78; [doi: 10.5862/MCE.35.9](https://doi.org/10.5862/MCE.35.9). (in Russian).
63. Stefanyshyna-Gavryliuk, Yu.D., and Stefanyshyn, D.V. (2013). The use of fuzzy measure to overcome the uncertainty of long-term predictions based on extrapolations. *System Research and Information Technologies*, № 4, 99–110; <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7021>. (in Ukrainian).
64. Zimmermann, H.-J. (2001). *Fuzzy set Theory and its applications*. Springer, 4-th edition, 544 p.
65. Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles, *J. Hydrol.*, 10 (3), 282–290.

*The article was received 02.07.2021 and was accepted after revision 21.10.2021*

**Д.В. Стефанишин**

## **ОЦІНКА ЙМОВІРНОСТІ ПЕРЕПОВНЕННЯ КИЇВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА**

***Анотація.** Водосховища є невід'ємною частиною світової гідротехнічної інфраструктури і формують основу сучасного управління водними ресурсами в більшості країн. Однак водосховища також є джерелами потенційної небезпеки для навколишнього середовища, інфраструктури та населення, особливо в нижніх б'єсах великих гребель. Потенційна небезпека та ризики для населення, що проживає поблизу водосховищ, особливо нижче за течією, можуть бути не меншими, ніж для людей, які проживають поблизу ядерних установок або хімічних підприємств, з чим експерти та громадськість зазвичай пов'язують проблеми техногенної безпеки. Причому, статистика показує, що близько третини всіх аварій на греблях і дамбах сталося через переповнення водосховищ, коли рівень води у верхньому б'єфі перевищував проектні або допустимі значення.*

*В Україні налічується 1103 водосховища загальним об'ємом води близько 55 500 млн м<sup>3</sup>. Київське водосховище – третє за обсягом та площею поверхні води в країні. Крім того, це водосховище утворюється однією з найдовших гребель у світі. Загальна довжина гідротехнічних споруд Київського водосховища сягає 70 км.*

*Загальновизнано, що неконтрольоване переповнення водосховища може викликатися надзвичайним паводком з параметрами припливу, що перевищують пропускну здатність гідротехнічних споруд. Проблемою є те, що пропускну здатність гідротехнічних споруд може бути недостатньою як через неточність гідрологічного прогнозу, так і через несправності, погане функціонування або відмови гідроспоруд під час проектного паводку. Зокрема, довгострокові прогнози максимальних витрат паводкових вод Дніпра в створі Київського водосховища на основі використання різних функцій розподілу ймовірностей показують істотну розбіжність їх результатів. Також, як показує практика, неготовність деяких водопропускних трактів Київського водосховища може досягати кількох місяців на рік. Іноді ремонтні роботи на цих спорудах проводилися навіть під час паводків.*

*Метою дослідження було ймовірнісне прогнозування надзвичайної ситуації на Київському водосховищі внаслідок його неконтрольованого переповнення внаслідок можливої неточності гідрологічного прогнозу щодо фактичного притоку води у водійму та через відмови водопропускних споруд під час паводку.*

*Для досягнення мети були вирішені наступні завдання: (1) запропоновано метод гідрологічного прогнозування, який дозволяє враховувати результати довгострокових прогнозів максимальних витрат паводкових вод на основі використання різних функцій розподілу ймовірностей та нечіткого моделювання; (2) проведено гідрологічне прогнозування максимальних витрат Дніпра, що впливають на стан Київського водосховища, на основі фактичних даних, зібраних на гідрологічному посту «Вишгород»; (3) оцінено ймовірність переповнення Київського водосховища з урахуванням можливості виникнення дефіциту пропускну здатності гідротехнічних споруд з використанням методу дерева відмов та несправностей. Всього було розглянуто шість несумісних гіпотетичних надзвичайних ситуацій на Київському водосховищі. Розрахунки показали, що ймовірність переповнення Київського водосховища не перевищує  $3,84 \cdot 10^{-4}$  (рік<sup>-1</sup>), що є прийнятним в контексті гарантування гідрологічної безпеки інфраструктури та населення.*

***Ключові слова:** щорічна ймовірність перевищення; метод дерева відмов та несправностей; паводки; прогнозування; нечітке моделювання; гідрологічна безпека; переповнення Київського водосховища*

**Стефанишин Дмитро Володимирович**

доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7620-1613> e-mail: [d.v.stefanyshyn@gmail.com](mailto:d.v.stefanyshyn@gmail.com)

УДК 55; 504; 574

**Volodymyr Mokryi**, Assoc. prof., Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Ecological Safety and Nature Protection Activity of Viacheslav Chornovil Institute of Sustainable Development  
ORCID ID 0000-0002-5814-5160 *e-mail*: mokryi@ukr.net

**Ihor Petrushka**, Professor, Doctor of Engineering Sciences, Head of the Department of Ecological Safety and Nature Protection Activity of Viacheslav Chornovil Institute of Sustainable Development  
ORCID ID 0000-0003-3344-4196 *e-mail*: petim@ukr.net

**Elvira Dzhumelia**, PhD, Assistant at the Software Department of Institute of Computer Science and Information Technologies  
ORCID ID 0000-0003-3146-8725 *e-mail*: elviradzhumelia@gmail.com

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

## **RESTORATION OF CROSS-BORDER UKRAINIAN-POLISH MAN-MADE TERRITORIES OF ROZTOCHIA BY PHYTOMELIORATIVE METHODS**

**Abstract.** *Extraction leads to the formation of specific anthropogenic landscapes, which are mining. They are inferior in the area to agriculture and forestry. As a result, the lithogenic basis of landscapes is broken, and there is a fast alteration of a surface therefore the man-made neo relief is formed.*

*The purpose of the work is theoretical substantiation of phytocoenotic bases of afforestation of dump landscapes and practical realization of biological-coenotic grounds of technology of creation of forest cultures on the reclaimed lands which correspond to concepts of nature conservation paradigms and are based on data of morphophysiological monitoring and application of mycorrhizal technologies.*

*The object of comparative studies are selected syngenetic phytomeliorants: common reed (*Phragmites australis*); buttercup caustic (*Ranunculus acris*); horsetail (*Equisetum arvense*); Reed warbler (*Phalaroides arundinacea*); goat willow (*Salix coprea*). The experimental material was taken from the territory of underground smelting of sulfur, areas adjacent to Yavoriv quarry, control samples – from the adjacent intact area. Quantitative determination of pigments was performed by the standard spectrophotometric method, as well as by the method of derivative spectroscopy. The activity of the photosynthetic apparatus was studied by photoinduced chlorophyll fluorescence.*

*Studies have shown statistically significant changes in the quantitative composition of plastid pigments in plant leaves in all studied areas compared to their appropriate background values.*

*The technology of forest reclamation of anthropogenic geocomplexes has been developed and tested by creating silvicultural areas based on mycorrhized planting material. The system of landscape-ecological reclamation measures, together with complex ecological monitoring, serves as a basis for sustainable development of cross-border Ukrainian-Polish man-made territories of Roztochia.*

**Key words:** *Roztochia; environmental monitoring; photosynthesis; fluorescence; recultivation; mycorrhiza*

В.І. Мокрий, І.М. Петрушка, Е.А. Джумеля

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

## ВІДНОВЛЕННЯ ТРАНСКОРДОННИХ УКРАЇНСЬКО-ПОЛЬСЬКИХ ТЕХНОГЕННИХ ТЕРИТОРІЙ РОЗТОЧЧЯ ФІТОМЕЛІОРАТИВНИМИ МЕТОДАМИ

**Анотація.** Видобування призводить до формування специфічних антропогенних ландшафтів, які називають гірничопромисловими. Площею вони поступаються сільськогосподарським та лісгосподарським. У результаті порушується літогенна основа ландшафтів, а також відбувається швидка перебудова поверхні, унаслідок чого формується техногенний неорельєф.

Мета роботи – теоретичне обґрунтування фітоценотичних основ заліснення відвальних ландшафтів та практична реалізація біологоценотичних засад технології створення лісових культур на рекультивованих землях, які відповідають концепціям природозберігаючих парадигм і базуються на даних морфологічного моніторингу та застосуванні мікоризаційних технологій у лісокультурній практиці.

Об'єктом порівняльних досліджень вибрані сингенетичні фітомеіоранти: очерет звичайний (*Phragmites australis*); жовтець їдкий (*Ranunculus acris*); хвоць польовий (*Equisetum arvense*); очеретянка звичайна (*Phalaroides arundinacea*); верба козяча (*Salix caprea*). Дослідний матеріал відібрано з території підземної виплавки сірки, ділянок, прилеглих до Яворівського кар'єру, контрольні зразки – з прилеглої непорушеної місцевості. Кількісне визначення пігментів проводилось стандартним спектрофотометричним методом, а також методом похідної спектроскопії. Активність фотосинтетичного апарату досліджувалась методом фотоіндукованої флуоресценції хлорофілу.

Проведені дослідження показали статистично достовірні зміни кількісного складу пластидних пігментів у листках рослин на всіх досліджених ділянках стосовно відповідних їм фонових значень.

Розроблено і апробовано технологію лісомеліорації антропогенних геокомплексів, шляхом створення лісокультурних площ, на основі мікоризованого лісопосадкового матеріалу. Система ландшафтно-екологічних рекультиваційних заходів, разом із комплексним екологічним моніторингом, слугить основою сталого розвитку транскордонних українсько-польських техногенних територій Розточчя.

**Ключові слова:** Розточчя; екологічний моніторинг; фотосинтез; флуоресценція; рекультивація; мікориза

DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.100-109>

### Вступ

Природні ландшафти транскордонних українсько-польських техногенних територій Розточчя знаходяться на межі стійкого функціонування, а їхнє подальше руйнування може призвести до повної втрати самовідновлюючих біосферних функцій природи. На теренах України площа техногенних ландшафтів займає понад 220 тисяч гектарів, із них близько 70% порушено внаслідок відкритого видобутку покладів корисних копалин. При застосуванні цього способу знищується рослинний та ґрунтовий покрив, пригнічується ріст

рослин, внаслідок чого знижується їх життєздатність та довговічність [1–5]. За таких умов суттєво погіршується екологічний стан відвальних ландшафтів, їхні санітарні, естетичні та рекреаційні якості [6–12]. Тому реалізація стратегії природовідтворення, фітомеліорація техногенних ландшафтів, вирішення соціально-екологічних проблем на основі сучасних інформаційно-аналітичних методів та біотехнологій є актуальним для Яворівського гірничопромислового району (ГПР), який є частиною транскордонних українсько-польських техногенних територій Розточчя.

Враховуючи, що лісові ценози використовують до 90% сонячної енергії (агроценози – лише 40%), а також зважаючи, що гармонійний розвиток суспільства з природою потребує співвідношення лісової рослинності до агроландшафтів у межах 50% [13, 14], на землях, які зазнали техногенного впливу, доцільно створювати лісові культурфітоценози, які виконували б різноманітні життєво важливі захисні функції. Заліснення таких земель буде сприяти покращенню якості довкілля, збільшенню лісистості гірничодобувних районів та залученню до господарського обігу земель з порушеним ґрунтовим покривом.

**Мета дослідження** – теоретичне обґрунтування фітоценотичних основ заліснення відвальних ландшафтів та практична реалізація біологоценотичних засад технології створення лісових культур на рекультивованих землях, які відповідають концепціям природозберігаючих парадигм і базуються на даних морфологічного моніторингу та застосуванні мікоризаційних технологій у ліскокультурній практиці.

## Методи досліджень

Об'єктом порівняльних досліджень вибрані сингенетичні фітомеліоранти: очерет звичайний (*Phragmites australis*); жовтець їдкий (*Ranunculus acris*); хвощ польовий (*Equisetum arvense*); очеретянка звичайна (*Phalaroides arundinacea*); верба козяча (*Salix coprea*). Дослідний матеріал відібрано з території підземної виплавки сірки (ПВС), ділянок, прилеглих до Яворівського кар'єру, контрольні зразки – з прилеглої непорушеної місцевості.

Кількісне визначення пігментів проводилось стандартним спектрофотометричним методом, а також методом похідної спектроскопії. Активність фотосинтетичного апарату досліджувалась методом фотоіндукованої флуоресценції хлорофілу [15, 16]. Активність мікоризації визначено за кількістю спор на см<sup>3</sup> препарату. Для оцінки результатів досліджень використано критерій Стьюдента.

## Результати дослідження

Отримані результати [17] вказують на інактивацію фотосинтезу внаслідок дисбалансу пігментного комплексу. Зміна вмісту пігментів впливає не лише на інтенсивність фотосинтезу, але і на загальний рівень метаболізму, рух асимілянтів, синтез ростових речовин. Порівняльний аналіз результатів визначення вмісту пігментів вказує на високу точність методу похідної спектроскопії (рис. 1) в порівнянні з спектрофотометричним.

Проведені дослідження показали статистично достовірні зміни кількісного складу пластидних пігментів у листках рослин на всіх досліджених ділянках

стосовно відповідних їм фонових значень. При цьому, відзначено появу видоспецифічних змін пігментного комплексу деревних рослин у трансформованих умовах середовища існування. У рослинних тканинах зафіксовано загалом знижений вміст каротиноїдів, статистично достовірно відмінний від фонових значень, що обумовлено морфофізіологічними особливостями досліджуваних рослин.

Зміни в пігментному комплексі відображають адаптованість фізіологічних функцій рослин до різних екологічних умов і є основною причиною інактивації фотосинтезу. Для досліджених видів характерним є зниження суми пластидних пігментів у ряді: поля підземної виплавки сірки < кар'єрні відвали < непорушена фонові територія. Простежується відмінність у характері зміни окремих пластидних пігментів деревних рослин на територіях різного функціонального призначення. В досліджуваних зразках рослин спостерігається достовірно послідовне зниження вмісту хлорофілів «a» та «b» у ряді досліджених ділянок стосовно до відповідних фонових. Відзначено зміни у співвідношенні хлорофілів «a», «b» та каротиноїдів у листках досліджених видів на різнофункціональних деастрованих ландшафтах Яворівського ГПР порівняно із фонові територією. Спостерігається зниження відсоткової частки хлорофілу «a» та зростання частки каротиноїдів у асиміляційних органах рослин.

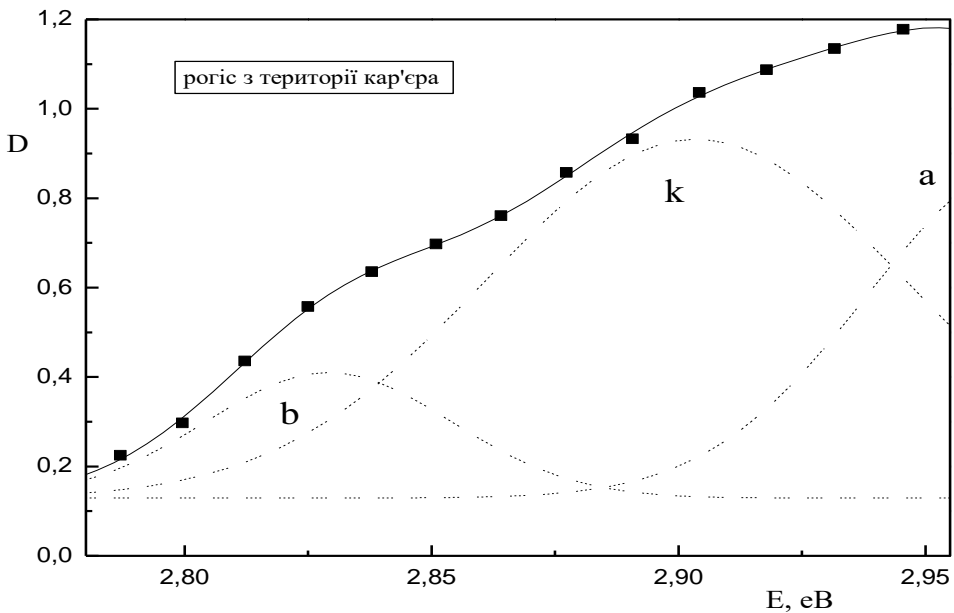


Рис. 1 – Спектр поглинання екстрагованої витяжки пігментів листків очерету звичайного (*Phragmites australis*) з трьома вибраними аналітичними довжинами хвиль відповідно для хлорофілу «a», «b» і каротиноїдів

Отримані параметри фотоіндукованої флуоресценції хлорофілу показують, що в умовах деградованого середовища Яворівського ГПР індекс життєвості рослин у порівнянні з контрольними зразками нижчий. Згідно з даними флуоресцентного тестування, на фоні відносно високих значень індексу життєвості досліджуваних рослин, прослідковується тенденція його



зниження в умовах деградованого середовища, у порівнянні з контролем. Фіксовані значення індексу життєвості рослин вказують на відносну достатність деградованих умов для існування і розвитку піонерного рослинного покриву.

Кореляція даних вимірювань вмісту пігментів і флуоресцентного тестування рослин показує, що адаптація пігментного апарату рослин до відповідних екологічних умов є складовою стратегії виживання видів в конкретному середовищі.

Отримані результати і літературні дані про лісові культури, що зростають на порушених ґрунтах, свідчать про можливу успішність рекультивациі сучасних відвалів гірничодобувних кар'єрів за допомогою культур змішаного складу за участю *Quercus robur* та домішкою *Alnus glutinosa*, *Populus tremula*, *Pinus sylvestris*. Незважаючи на низьку продуктивність, ці насадження відзначаються достатньою біологічною стійкістю. Успішність фітомеліорації в першу чергу залежить від правильного підбору комплексу агротехнічних та лісокультурних заходів у відповідності до екологічної специфіки девастрованих ландшафтів. При цьому особливе значення має підбір асортименту фітомеліорантів та послідовність їх застосування. Здійснення фітомеліоративних заходів повинно забезпечити послідовне формування стійких серійних рослинних угруповань. Кінцевою метою фітомеліорації є рослинні угруповання субкліматического характеру – у лісостеповій зоні деревно-чагарникових та лучно-степових типів. В межах суходільних поверхонь кар'єрів локальні гідрокліматичні та геліотопічні умови близькі за своїми характеристиками до умов навколишнього ландшафту, вкритого лісовою та лучною рослинністю.

При розробці фітомеліоративних заходів та підборі фітомеліорантів відзначається будова техногенних форм рельєфу, умови формування едафотопічних умов девастрованих ландшафтів, береться до уваги специфіка кожного елементу кар'єрно-відвальних ландшафтів. На основі цього синтезуються координаційно-класифікаційні схеми кар'єрно-відвальних комплексів.

На схилах відвалів, де лише ініціюються ерозійні процеси, ефективними природними фітомеліорантами є *Calamagrostis epigeios*, *Phragmites australis*, *Tussilago farfara*. Прибережні зони заповнених водами кар'єрних виїмок та підтоплювані суходільні схили потребують фітомеліоративних заходів з метою припинення водної ерозії шляхом створення смуг з *Phragmites australis* та гігрофільної деревної та чагарникової рослинності, зокрема вільшаників, верболізів тощо.

Процес фітомеліорації території Яворівського ГПР (рис. 2) проходить екстенсивно (самозаростання) та інтенсивно (штучне зарощування), забезпечуючи припинення техногенної деградації земель та повернення девастрованих територій до рекреаційно-господарського використання.

На ділянках земель цієї категорії переважають ґрунти різного механічного складу та еродовані (різного ступеня змиті та розмиті), виходи материнських порід. Найкращим чином такі землі можуть бути використані для вирощування лісомеліоративних насаджень, які відіграють значну роль у охороні земель від руйнування та деградації, підтримують екологічну рівновагу в регіонах, забезпечують відновлення функцій саморегуляції ландшафтних систем, утрачених у процесі високого антропогенного навантаження.

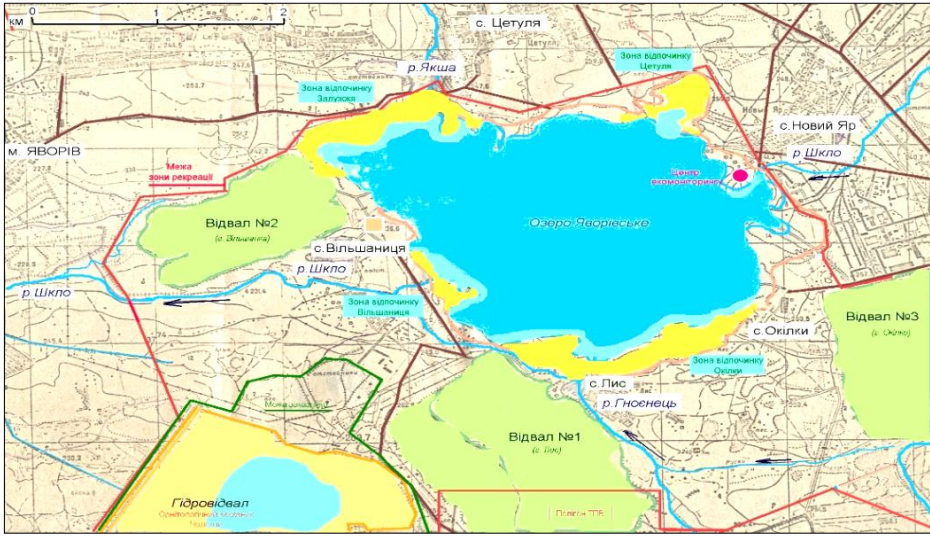


Рис. 2 – Територія Яворівського рекреаційно-господарського комплексу

Такі принципи [18] розміщення лісових насаджень на площі землекористувань пройшли широке випробування у світі і знайшли позитивну оцінку у землевласників та підтримку у впровадженні від урядів і міжнародних екологічних фондів. Наукові програми з лісового землеробства підтримуються Радою Європи протягом останніх десятиліть.

Таким чином, першочерговими завданнями та пріоритетами лісомеліорації регіону є:

- розробка нового лісомеліоративного районування на основі комплексного оцінювання несприятливих природно-антропогенних явищ;
- захист, збереження і формування земельних ресурсів шляхом застосування адаптивних лісомеліоративних комплексів;
- розробка оптимальних екологічних параметрів техногенних ландшафтів, які забезпечать стійкість їх функціонування й підвищення використання біокліматичного потенціалу (БКП);
- поступове створення за допомогою систем захисних лісових насаджень умов для відновлення у ландшафтів функцій саморегулювання й самопоновлення, здатності реалізації додаткових можливостей БКП;
- стабілізація водно-ресурсного потенціалу басейнів основних річок, що впадають у Яворівське озеро, у системах захисних лісових насаджень і поліпшення якості озерної води;
- перехід захисного лісорозведення на селекційно-генетичні та біонанотехнологічні основи створення нових насаджень;
- підвищення кормового, технічного та екологічного потенціалу існуючих і майбутніх лісомеліоративних насаджень;
- розробка програми інтродукції лісомеліоративних насаджень для ефективного використання інтродукованих порід;
- розробка ефективних систем лісових насаджень на специфічних техногенних ландшафтах.

Яворівський ГПР розташований (80%) в межах Передгірно-височинної фізико-географічної області і лише незначна частина – в межах Розточчя. Авторами [19] закартовано 4 ландшафти та 15 видів індивідуальних антропогенних місцевостей (13,3% площі району), в тому числі 1 – кар’єрного, 3 – відвального, 4 – відстійного і 7 – аквального видів та 43 антропогенних урочища.

Для Яворівського ГПР характерні процеси заболочення, площинний змив і карст. Ці дані враховані для проєктивних і посадкових лісомеліоративних робіт.

Для фітооптимізації техногенних ландшафтів [20] створено препарат мікоризації лісопосадкового матеріалу на основі видів *Suillus luteus*, *Amanita muscaria*, *Tuber melanosporum*, а також дріжджів *Torulopsis candida*. Отриманий мікоризований лісопосадковий матеріал використано при створенні біогруп на девастрованих ділянках. Це дасть змогу ефективно використати три функції мікоризи: трофічну (забезпечення рослин якісним живленням і водою); гормонально-інформаційну (регулювання і сприяння плодоношенню); комунікаційну (створення складних екосистем), що забезпечить ендоекогенетичну сукцесійну стадію фітомеліорації Яворівського ГПР.

## Висновки

Аналіз природно-кліматичних умов Розточчя свідчить про доцільність і необхідність лісомеліоративної трансформації техногенних, деградованих і малопродуктивних земель. Регіональні особливості прояву деградаційних процесів зумовлюють суттєві переваги застосування лісомеліоративного захисту земель над іншими.

Розроблена ефективна ґрунто-водо-охоронна система забезпечує оптимальну рекультивацію техногенних ландшафтів шляхом лісомеліоративного облаштування.

Завдяки високій ефективності мікоризованого лісопосадкового матеріалу, лісомеліорація техногенних ландшафтів посідає чільне місце у комплексі заходів щодо екологічного моніторингу, екологічної безпеки, локалізації деградаційних процесів, вдосконалення структури земельного фонду та стійкого розвитку транскордонних українсько-польських техногенних територій Розточчя.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Білявський, Г.О., Падун, М.М., Фурдуй, Р.С. (1993) *Основи загальної екології*. "Либідь", 316 с.
2. Tyuleneva, T. (2018). Environmental consequences of coal mine elimination. *Proceedings of the 9th China-Russia Symposium "Coal in the 21st Century: Mining, Intelligent Equipment and Environment Protection"*. <https://doi.org/10.2991/coal-18.2018.65>.
3. Štofějová, L., Fazekaš, J., Fazekašová, D. (2021). Analysis of heavy metal content in soil and plants in the dumping ground of Magnesite Mining Factory Jelšava-Lubeník (Slovakia). *Sustainability*, 13(8), 4508. <https://doi.org/10.3390/su13084508>
4. Копач, П.І., Горобець, Н.В., Данько, Т.Т., Бондаренко, Л.В. (2009). Основні положення методології створення системи моніторингу наукового середовища гірничодобувних регіонів. *Екологія і природокористування*, 12, 181-187.

5. Прохорова, Н.В., Кавеленова, Л.М. (2003). *Проблеми організації системи фітотомоніторингу городської середовища в умовах лесостепи*. Изд-во «Самарський університет».
6. Rudko, G., Shkitsa, L. (2002). Ecological consequences of the activity of Western Ukraine mining complexes. *Rocznik AGH, Wiertnictwo Nafta Gaz, Poland*, T. 19/2, pp. 415-418.
7. Dzhumelia, E., Pohrebennyk, V. (2021). Methods of soils pollution spread analysis: Case study of mining and chemical enterprise in Lviv region (Ukraine). *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 22(4), pp. 39-44.
8. UNDP and UN Environment. (2018). *Managing mining for sustainable development. A sourcebook*. Bangkok: United Nations Development Programme.
9. Rhind, S. M. (2009) Anthropogenic pollutants: a threat to ecosystem sustainability, *Phil. Trans. R. Soc. B*, 364, pp. 3391-3401.
10. Lee, S., Ji, W., Yang, H. (2017). Reclamation of mine-degraded agricultural soils from metal mining: lessons from 4 years of monitoring activity in Korea, *Environ Earth Sci*, vol. 76, no. 720, pp. 1-7.
11. Carvalho, F. P. (2017). Mining industry and sustainable development: time for change, *Food and Energy Security*, pp. 61-77.
12. Bryk, M., Kołodziej, B. (2009). Reclamation problems for the area of a former borehole sulfur mine with particular reference to soil air properties, *Land Degrad. Dev.*, 20, pp. 509-521.
13. Бровко, Ф.М. (2009). *Лісова рекультивация відвальних ландшафтів Придніпровської височини України: монографія*. "Арістей", 263 с.
14. Трохимчук, С.В., Ковальчук, І.В., Кравчук, Я.С. (1978). Некоторые аспекты изучения антропоических изменений природы Западного Подолья. *Тез. докл. респ. научн. конф. "Природные ресурсы Карпат и Приднестровья, вопросы их рационального использования и охраны"*. С. 125–127.
15. Капустяник, В.Б., Мокрий, В.І. (2004). *Опτικο-спектральні методи в науково-технічній експертизі: Практикум*. "Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка", 207 с.
16. Ломницька, Я.Ф., Василечко, В.О., Чихрій, С.І. (2011). *Склад та хімічний контроль об'єктів довкілля*. Львів, Новий Світ-2000, 589 с.
17. Копій, Л.І., Мокрий, В.І., Оліферчук, В.П. (2009) Експрес-тестування та оптимізація фітомеліорантів девастрованих ландшафтів Яворівського ГПР. *Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. Зб. матеріалів I Міжнародного конгресу*. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», с. 41-42.
18. Гладун, Г.Б., Дем'яненко, Л.В. (2009) *Лісівництво і агролісомеліорація*. Харків: УкрНДЦЛГА, Вип. 115.
19. Іванов, Є.А. (2001). *Еколого-ландшафтознавчий аналіз гірничопромислових територій (на прикладі Львівської області)* (Автореф. дис. на здобуття наук. ст. к. географ. н.).
20. Мокрий, В.І., Копій, Л.І., Paslavskyy, M.M., Pankivskyy, Y.I. (2010). The complex monitoring of the degraded landscapes of Chervonograd mining-industrial region. *Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna «Przyrodnicze wykorzystanie ubocznych produktów spalania węgla, biomasy oraz węgla z biomasa» Szczecin-Ostoja 5.11.2010*, Zachodniopomorski uniwersytet technologiczny w Szczecinie, p. 41-44.

Стаття надійшла до редакції 07.09.2021 і прийнята до друку після рецензування 09.12.2021

## REFERENCES

1. Biliavskiyii H. O., Padun, M. M., & Furdii, R. S. (1993). *Osnovy Zahalnoi Ekolohii. "Lybid"* (in Ukrainian).
2. Tyuleneva, T. (2018). Environmental consequences of coal mine elimination. In *Proceedings of the 9th China-Russia Symposium "Coal in the 21st Century: Mining, Intelligent Equipment and Environment Protection"*. <https://doi.org/10.2991/coal-18.2018.65>
3. Štofejová, L., Fazekaš, J., Fazekašová, D. (2021). Analysis of heavy metal content in soil and plants in the dumping ground of Magnesite Mining Factory Jelšava-Lubenik (Slovakia). *Sustainability*, 13(8), 4508. <https://doi.org/10.3390/su13084508>
4. Kopach, P. I., Horobets, N. V., Danko, T. T., & Bondarenko, L. V. (2009). Osnovni polozhennia metodolohii stvorennia systemy monitorynhu navkolyshnoho seredovyshcha hirnychodobuvnykh rehioniv. *Ekolohiia I Pryrodokorystuvannia*, 12, 181-187 (in Ukrainian).
5. Prokhorova, N. V., & Kavelenova, L. M. (2003). Problemy orhanyzatsii systemy fitomonitoryngha gorodskoi sredey v uslovyakh lesostepu. *Yzd-vo «Samarskyi universytet»* (in Russian).
6. Rudko, G., & Shkitsa, L. (2002). Ecological consequences of the activity of Western Ukraine mining complexes. *Rocznik AGH, Wiertnictwo Nafta Gaz*, 19/2, 415-418.
7. Dzhumelia, E., & Pohrebennyk, V. (2021). Methods of soils pollution spread analysis: Case study of mining and chemical enterprise in Lviv region (Ukraine). *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 22(4), 39-44.
8. UNDP and UN Environment. (2018). *Managing mining for sustainable development. A sourcebook*. Bangkok: United Nations Development Programme.
9. Rhind, S. M. (2009) Anthropogenic pollutants: a threat to ecosystem sustainability. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 364, 3391-3401.
10. Lee, S., Ji, W., & Yang, H. (2017). Reclamation of mine-degraded agricultural soils from metal mining: lessons from 4 years of monitoring activity in Korea. *Environ Earth Sci*, 76(720), 1-7.
11. Carvalho, F. P. (2017). Mining industry and sustainable development: time for change. *Food and Energy Security*, 61-77.
12. Bryk, M., & Kołodziej, B. (2009). Reclamation problems for the area of a former borehole sulfur mine with particular reference to soil air properties. *Land Degrad. Dev.*, 20, 509-521.
13. Brovko, F. M. (2009). Lisova rekultyvatsiia vidvalnykh landshaftiv Prydniprovskoi vysochyny Ukrainy: monohrafiia. "Aristei" (in Ukrainian).
14. Trohimchuk, S. V., Kovalchuk, I. V., & Kravchuk, Ya. S. (1978). Nekotorye aspekty izucheniya antropicheskikh izmeneniy pripody Zapadnogo Podolya. In *Tez. dokl. resp. nauchn. konf. "Pripodnye resursy Karpat i Pridnestrovyia, voprosy ih racionalnogo ispolzovaniya i ohrany"* (pp. 125-127) (in Russian).
15. Kapustianyk, V. B., & Mokryi, V. I. (2004). Optyko-spektralni metody v naukovotekhnichnii ekspertyzi: Praktykum. "Vydavnychiy tsentr LNU imeni Ivana Franka" (in Ukrainian).
16. Lomnytska, Ya. F., Vasylechko, V. O., & Chykhrii, S. I. (2011). *Sklad ta khimichniy kontrol ob'ektiv dovkillia*. Lviv: Novyi Svit-2000 (in Ukrainian).
17. Kopii, L. I., Mokryi, V. I., & Oliferchuk, V. P. (2009). Ekspres-testuvannia ta optymizatsiia fitomeliorantiv devastovanykh landshaftiv Yavorivskoho HPR. In *Zakhyst navkolyshnoho seredovyshcha. Enerhooshchadnist. Zbalansovane pryrodokorystuvannia. Zb. materialiv I Mizhnarodnoho konhresu*, (pp. 41-42). Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnikha» (in Ukrainian).
18. Hladun, H. B., & Demianenko, L. V. (2009). *Lisivnytstvo i ahrolisomelioratsiia*. Kharkiv: UkrNDILHA, Vyp. 115 (in Ukrainian).
19. Ivanov, Y. A. (2001). *Ekoloho-landshaftoznavchyi analiz hirnychopromyslovykh terytorii (na prykladi Lvivskoi oblasti)* (Doctoral dissertation) [Abstract] (in Ukrainian).

20. Mokryi, V., Kopyi, L., Paslavskyy, M., & Pankivskyy, Y. (5.11.2010). The complex monitoring of the degraded landscapes of Chervonograd mining-industrial region. In *Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna «Przyrodnicze wykorzystanie ubocznych produktów spalania węgla, biomasy oraz węgla z biomasa»* (pp. 41-44). Szczecin-Ostoja: Zachodniopomorski uniwersytet technologiczny w Szczecinie.

*The article was received 07.09.2021 and was accepted after revision 09.12.2021*

**Мокрий Володимир Іванович**

доктор технічних наук, доцент, професор кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності Інституту сталого розвитку ім. В. Чорновола Національного університету «Львівська політехніка»

**Адреса робоча:** 79013 Україна, м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12

ORCID ID 0000-0002-5814-5160 **e-mail:** mokriy@ukr.net

**Петрушка Ігор Михайлович**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності Інституту сталого розвитку ім. В. Чорновола Національного університету «Львівська політехніка»

**Адреса робоча:** 79013 Україна, м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12

ORCID ID 0000-0003-3344-4196 **e-mail:** petim@ukr.net

**Джумеля Ельвіра Анатоліївна**

доктор філософії, асистентка кафедри програмного забезпечення Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

**Адреса робоча:** 79013 Україна, м. Львів, вул. Ст. Бандери, 12

ORCID ID 0000-0003-3146-8725 **e-mail:** elviradzhumelia@gmail.com

УДК 628.4.03

**Ihor V. Satin**<sup>1,2</sup>, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Landscaping and Municipal Waste Management of the Scientific, Research, Design and Technology Institute of Municipal Economy, State Enterprise  
ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-2028-9791> **e-mail:** satin@nikti.org.ua

**Olena S. Panchenko**<sup>2</sup>, Senior Research Fellow  
ORCID ID <http://orcid.org/0000-0003-3680-7036> **e-mail:** panchenko@nikti.org.ua

<sup>1</sup> Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Scientific, Research, Design and Technology Institute of Municipal Economy, State Enterprise, Kyiv, Ukraine

## IMPROVING THE METHODOLOGY FOR ANALYSES OF THE MORPHOLOGICAL COMPOSITION OF MUNICIPAL SOLID WASTE WITH STRATIFICATION APPROACH

**Abstract.** *First, problem-solving for solid waste management should be based on solid field analysis of their morphological composition. It is important to conduct research for both urban and rural settlements to obtain results that are more reliable.*

*The aim of this article is to improve methodological approaches to determining the morphological composition of solid waste. From the data analysis, it is established that the lack of morphological composition of solid waste in the methodology of research requirements for representativeness of research results, error rate and common approaches to the research plan leads to the inability to compare the results of such studies and reduces their value. This study presents a new approach to determining the morphological composition of solid waste. The process of field research of morphological composition in Sumy city took place in 4 stages – preliminary research, sampling planning, field research, evaluation of results. Obtained results show the importance of using the requirements for statistical reliability of results. The application of such an approach allows us to unify the results of the study, and to compare the individual results of determining the morphological composition between settlements and by years.*

**Key words:** *solid waste management; stratification; representativeness; sample; mixed household waste*

**I.V. Сатін**<sup>1,2</sup>, **О.С. Панченко**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

<sup>2</sup> Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства», м. Київ, Україна

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ МОРФОЛОГІЧНОГО СКЛАДУ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ З УРАХУВАННЯМ СТРАТИФІКАЦІЇ

**Анотація.** *Вирішення проблеми управління побутовими відходами насамперед повинно базуватись на ґрунтовному натурному аналізі їх морфологічного складу. Причому важливо проводити дослідження як для міських, так і для сільських населених пунктів для отримання більш достовірних результатів.*

*Метою роботи є удосконалення методологічних підходів до визначення морфологічного складу побутових відходів. Из аналізу літературних даних встановлено, що відсутність в методології досліджень морфологічного складу твердих побутових відходів вимог до репрезентативності результатів дослідження, рівня похибки та єдиних підходів до плану проведення дослідження призводить до неможливості порівнювати між собою результати таких досліджень та знижує їх цінність. У представленій роботі застосовано новий підхід до визначення морфологічного складу побутових відходів. Проведення процесу натурного дослідження морфологічного складу у м. Суми відбувалось у 4 етапи: попередні дослідження, планування вибірки, проведення польових досліджень, оцінка результатів. На прикладі проведеного дослідження показано значимість використання вимог щодо статистичної достовірності результатів. Застосування такого підходу дозволяє уніфікувати результати дослідження та порівнювати окремі результати визначення морфологічного складу між населеними пунктами та за роками.*

**Ключові слова:** управління побутовими відходами; стратифікація; репрезентативність; вибірка; змішані побутові відходи

**DOI:** <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.110-120>

## Вступ

**Постановка завдання.** Морфологічний склад побутових відходів має суттєвий вплив на техніко-економічні показники об'єктів поводження з відходами. Саме тому на етапі передпроектних досліджень щодо майбутніх об'єктів важливим є ґрунтовне дослідження морфологічного складу побутових відходів.

Тверді побутові відходи (ТПВ) характеризуються як гетерогенна суміш невизначеної кількості предметів, матеріалів, речовин з великим різноманіттям механічних, фізико-хімічних та інших властивостей. Склад цієї суміші є непередбачуваним і має випадковий характер, оскільки до складу ТПВ можуть потрапляти різноманітні матеріали, що використовуються в побуті та на виробництві, і водночас він є прогнозованим за основними складовими. Відомо, що морфологічний склад ТПВ залежить від видів джерел утворення ТПВ, пори року, містобудівних характеристик міста, соціально-економічних умов життя населення та його загальноосвітнього і культурного рівнів, рівня благоустрою житла, технології пакувальних матеріалів і тари, технології та системи оптової та роздрібної торгівлі тощо.

Таким чином, методологія проведення дослідження має враховувати можливі впливи на морфологічний склад побутових відходів.

В Україні діють методичні рекомендації з визначення морфологічного складу твердих побутових відходів, які затверджені наказом Міністерства з питань житлово-комунального господарства №39 від 16.02.2010. Але ці методичні рекомендації передбачають мінімальні вимоги до визначення морфологічного складу та не відображають детальний вміст компонентів, які можуть впливати на вибір технології, параметрів обладнання та на економічні показники підприємства.

Відсутність в методології досліджень вимог до репрезентативності результатів дослідження, рівня похибки та єдиних підходів до плану проведення дослідження призводить до неможливості порівнювати між собою результати таких досліджень та знижує їх цінність.



Робота виконується в рамках реалізації Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України № 820-р від 8 листопада 2017 року.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Науковцями Центру навколишнього середовища та здоров'я Імперського коледжу в Лондоні (Imperial College London), Королівського коледжу у Лондоні (King's College London) та Швейцарського інституту тропічного та громадського здоров'я в 2017 році у виданні «Environmental Science & Technology» опубліковані результати багаторічних досліджень з оцінки впливу сміттєспалювальних установок (MWIs) на навколишнє середовище. Досліджувались викиди всіх 22 сміттєспалювальних установок у Великобританії протягом 2003–2010 рр. Сировиною для сміттєспалювання є папір, харчові відходи, залишки пластику після оброблення, скло, електричні прилади та інші матеріали. Як відмічають науковці, за результатами досліджень морфологічний склад сировини змінюється щодня та відрізняється один від одного на всіх 22 установках. При цьому склад димових газів напряму залежить від складу сировини (ТПВ, які поступають для спалювання) [1]. Результати досліджень містять статистичні стандарти, а саме рівень достовірності 95% та значення максимальної допустимої похибки менше 20%.

Дослідження щодо складу побутових відходів проводились протягом одного року (2018–2019 рр.) у м. Нур-Султан, Республіка Казахстан з метою пошуку ефективних практик управління відходами [2]. Отримані авторами результати містять рівень достовірності – 90%, рівень похибки – 20%, кількість зразків – 10. Досить ґрунтовно автори [3] підійшли до вирішення питання щодо достовірності статистичних даних при оцінці морфологічного складу побутових відходів. У своїй праці [3] науковці впроваджують новий підхід до оцінки складу побутових відходів на регіональному та/або державному рівні. Основна увага приділяється отриманню точних і достовірних даних, оскільки вони мають вирішальне значення для ефективного планування системи управління відходами. Так, у статті описано методи стратифікації досліджуваної території, розроблено модель відбору представників, а також запропоновано модель для вибору репрезентативного регіону (на прикладі Чеської Республіки). У подальшому авторами планується застосувати та перевірити запропоновані моделі в польових умовах. Звертають увагу на важливість статистичних стандартів також інші дослідники [4–9].

При визначенні морфологічного складу побутових відходів в населених пунктах України науковцями акцентується увага на визначенні рівня репрезентативності вибірки, виборі варіанта відбору проб та описі характерних складових компонентів [10–12]. Такий же підхід демонструють деякі зарубіжні дослідники [13–15].

Таким чином, встановлення вимог до статистичної точності, встановлення рівня репрезентативності та планування дослідження дозволить уніфікувати результати дослідження та порівнювати окремі результати визначення морфологічного складу між населеними пунктами та роками.

**Мета дослідження.** Встановити мінімальні стандарти, за якими результати визначення морфологічного складу побутових відходів повинні завжди відповідати визначеній статистичній точності, шляхом удосконалення методології.

## Результати дослідження

Проведення процесу дослідження морфологічного складу відбувалось за наступними етапами: 1) попередні дослідження; 2) планування вибірки; 3) проведення польових досліджень; 4) оцінка результатів.

**Попередні дослідження.** Етап попереднього дослідження стосується збору необхідної довідкової інформації про населений пункт. Це повинно лягти в основу подальшого етапу планування вибірки та проведення польових досліджень. Цей етап надає деякі передумови, необхідні для ефективної оцінки результатів проведених досліджень.

Для м. Суми зібрано наступні дані (табл. 1), які мають вплив на морфологічний склад побутових відходів.

Таблиця 1 – Загальна інформація про місто Суми

№	Найменування показника	Характеристика
1	Чисельність населення, чол.	263 760
2	Середній розмір домогосподарства по Сумській області, осіб	2,43
3	Середній дохід за місяць на одне домогосподарство, грн	10 398,0
4	Питома вага багатоквартирної забудови (з усіма видами благоустрою), %	80,9

*Загальний опис організації системи поводження з відходами у м. Суми.* Збирання відходів у м. Суми відбувається за планово-регулярною системою в багатоквартирній, садибній (приватній) забудові та нежитлових об'єктах (організації, установи, підприємства). Збирання ТПВ відбувається у три типи контейнерів за незмінною схемою: 1-й тип – для ПЕТ-пляшки; 2-й тип – «Дзвін» (скло, папір, пластик за переліком) та 3-й тип – для змішаних відходів. Всі контейнери 2-го класу за ДСТУ-8476. Місце видалення відходів – полігон ТПВ (розташований на території Верхньосироватської сільської ради). Об'єкт сортування вторинної сировини (скло, пластик, папір) розташований на території ТОВ «А-Муссон». Об'єкт ущільнення та сортування вторинної сировини (пластик) розташований на території ТОВ «Сервісресурс». Спеціально обладнані транспортні засоби із бічним та заднім завантаженням, також оснащені ущільнювачем (коефіцієнт ущільнення становить 2-3).

Побутові відходи, які утворюються в Сумах, за джерелами походження можна поділити на три основні групи: змішані ТПВ (утворюються від житлового сектору, невиробничої сфери: адміністративних установ, громадських зон та комерційних закладів, та виробничого сектору, комунально-складських зон та інше); ремонтні відходи або будівельні відходи (БВ), які потрапляють до планово-регулярної системи вивезення побутових відходів, та велико-габаритні відходи (ВГВ). Для захоронення на полігон ТПВ постачаються змішані ТПВ, ВГВ, БВ, які дозволено захоронювати на полігоні ТПВ.

Змішані тверді побутові відходи від домогосподарств збираються окремо у контейнери та транспортуються спеціально обладнаними транспортними засобами до місць видалення відходів – полігонів ТПВ. Ремонтні та будівельні

відходи, великогабаритні відходи транспортуються окремо від змішаних ТПВ до місць видалення відходів.

При проведенні досліджень виключено змішування твердих, великогабаритних, ремонтних, промислових та рідких відходів.

**Планування вибірки.** Слід зазначити, що морфологічний склад – це процентний вміст окремих компонентів в побутових відходах, що відрізняються за своїми властивостями. Визначення морфологічного складу здійснюють шляхом розділення змішаних побутових відходів та зважування всіх компонентів.

Дослідити всі побутові відходи, які утворюються в місті Суми, неможливо. Досліджується певна частина побутових відходів за деякий проміжок часу. Кількість відходів, яка визначена для дослідження, – це вибірка сукупність.

Одиниці вибірки – це найменші елементи вибіркової сукупності, які окремо відбираються, збираються, сортуються та аналізуються і для яких отримуються окремі результати аналізу. Для початкових досліджень за одиницю вибірки можна прийняти 1 куб. м побутових відходів. В подальших дослідженнях за одиницю вибірки рекомендується прийняти 1 контейнер об'ємом 1 100 л (або інше значення).

При виборі одиниці вибірки слід зазначити наступне:

- чим менший об'єм або значення одиниці вибірки, тим більша статистична точність результатів;
- чим менший об'єм або значення одиниці вибірки, тим більше часу потрібно для процесу сортування та аналізу для еквівалентного обсягу вибірки.

Загальна кількість одиниць вибірки залежить від двох основних критеріїв:

1. Неоднорідність показників морфологічного складу відходів, яка відображена коефіцієнтом варіації. Цей коефіцієнт варіації на початку досліджень, як правило, невідомий, але в подальших дослідженнях його слід оцінювати на основі результатів минулого дослідження (сезон або рік).

2. Бажана точність результатів (рівень достовірності або похибка).

Для початкових досліджень приймаємо об'єм вибірки 45 м<sup>3</sup> (Methodology for the Analysis of Solid Waste (SWA-Tool)), табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристики вибірки, які прийняті для м. Суми

Одиниця вибірки	Загальний обсяг вибірки для дослідження, м <sup>3</sup>
1 м <sup>3</sup>	45 (еквівалентно ≈ 41 контейнеру об'ємом 1 100 л)

Для підвищення точності та інформативності результатів використовують методи стратифікації, табл. 3. Це статистичний розподіл неоднорідної вибіркової сукупності (наприклад, відходи, що утворюються в адміністративній одиниці населеного пункту) на більш однорідні групи або підгрупи (наприклад, відходи, що утворюються у певних житлових багатоквартирних будинках або приватному секторі), які в подальшому називаються шари.

Слід враховувати, що велика кількість факторів може впливати на склад або кількість побутових відходів і вони, в свою чергу, можуть різнитися залежно від місцевості. Наприклад:

- Тип житлової забудови (процентне співвідношення різних типів забудови);
- Тип системи опалення (рівень охоплення пічним опаленням);
- Сезонні міграції населення;
- Об'єм контейнерів;
- Періоди відпусток;
- Тип системи збору відходів (рівень охоплення роздільним збиранням);
- Рівні громадської освіти та обізнаності з питань управління відходами.

Таблиця 3 – Визначена стратифікація вибірки для м. Суми

Населений пункт	Обрані критерії розшарування	Проведені сезонні дослідження
Суми	<p><b>Соціально-економічний рівень:</b> За типом житлової забудови:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• приватний сектор;</li> <li>• багатоквартирна забудова;</li> </ul> <p><b>Збір в будній день:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Понеділок</li> <li>• П'ятниця</li> </ul>	Літо Осінь

**Польові дослідження** з визначення морфологічного складу ТПВ проводились з урахуванням наказу Міністерства з питань житлово-комунального господарства України від 16.02.10 р. №39 «Про затвердження Методичних рекомендацій з визначення морфологічного складу твердих побутових відходів».

Дослідження морфологічного складу змішаних твердих побутових відходів проводились на господарській ділянці полігону ТПВ.

До виконання дослідження з визначення морфологічного складу ТПВ залучені спеціально навчені, підготовлені та проінструктовані працівники (далі – сортувальники). Інструктаж з методів сортування, техніки безпеки та охорони праці проводиться до початку польових досліджень.

Сортувальники забезпечуються спецодягом та засобами індивідуального захисту. Сортувальникам щоденно видають поліетиленові пакети для роздільного збирання компонентів твердих побутових відходів.

Маршрути сміттевозів обираються випадково. Схеми маршрутів не змінюються.

Загальний обсяг вибірки набирався з відповідного об'єму сміттевозів. Сміттевоз вивантажується на обраному майданчику польових досліджень з твердим покриттям поруч з картами захоронення ТПВ. Із загального обсягу ТПВ, що вивантажені зі сміттевозів, відбираються проби сумарним об'ємом 45 м<sup>3</sup> (це орієнтовно дорівнює 3 повним сміттевозам об'ємом кузова 7 м<sup>3</sup>). Проба для зважування становила не менше 50 кг. Залишок ТПВ бульдозером зсовують з майданчика до тіла полігону, вивільнюючи його для проведення досліджень.

Сортувальники збирають визначені за морфологічним складом компоненти ТПВ у поліетиленові пакети. Компоненти розділяються на складові за матеріалами або маркуванням. Наприклад, кришечки пляшок відкручуються та пляшки спорожняються від рідини. Компоненти очищуються від бруду. Рідини та бруд також зважують. Для наповнення пакетів використовують

лопати та інші спецзасоби. Після закінчення відбору окремих компонентів у пакети завантажують залишок ТПВ, що не піддається класифікації та сортуванню.

Проводиться почергове зважування компонентів ТПВ у поліетиленових пакетах, а також залишку відходів. Сортувальник фіксує вагу для кожного типу матеріалу, відсортованого за формою відбору проб, переглядає форму, а потім заносить результати зважування у протокол. Після зважування заповнені пакети видаляють до приймальної карти полігону ТПВ.

Опрацювання результатів дослідження виконуються у наступному порядку:

- визначають масу кожного відсортованого компонента ТПВ шляхом підсумовування відповідних даних зважування;
- визначають загальну масу проби, що була розсортована, шляхом підсумовування усіх даних, одержаних в ході важення компонентів ТПВ та їх залишку;
- прийнявши за 100% (за масою) масу ТПВ, що була розсортована, розраховують вміст (у відсотках) кожного компонента ТПВ;
- за загальними даними з усіх проб шляхом статистичного оброблення визначають похибку серії вимірювань та оцінюють репрезентативність вибірки;
- визначають середній морфологічний склад ТПВ, що надходять на господарську ділянку полігону ТПВ у сміттевозах.

Кожний зразок проби позначається наступними даними, які зібрані та записані в протоколі для кожного окремого зразка командою сортувальників відходів під час збору:

*I. Номер протоколу.*

*II. Адреса зразка.*

*III. Дата збору.*

## Оцінка результатів

Результати досліджень зведено у табл. 4. На рис. 1 представлено морфологічні групи у складі змішаних ТПВ, ранжовані від найменшої до найбільшої частки у складі змішаних ТПВ.

Таблиця 4 – Маса компонентів за морфологічними групами у складі змішаних ТПВ, червень 2019 р.

№ п/п	Назва морфологічної групи	Найменування компонента ТПВ	Вміст компонентів (за масою), (%)
1	Картон та папір	Картон	0,61
		Папір	4,79
		Композитний папір	6,43
2	Скло та кераміка	Скляні пляшки білі та прозорі	9,50
		Скляні пляшки кольорові	4,04
		Віконне скло	0,44
		Кераміка	0,87
		Інші види скла	0,07

№ п/п	Назва морфологічної групи	Найменування компонента ТПВ	Вміст компонентів (за масою), (%)
3	Метали	Чорні метали	0,06
		Кольорові метали	0,81
4	Пластмаси	РЕТ-пляшки	3,09
		HDPE-контейнери	1,04
		Інші пластикові матеріали	2,15
		PP-пластик	0,42
		Композитний пластик	1,22
5	Відходи електронного та електричного обладнання	Невелика побутова техніка	1,31
		Комп'ютерна техніка	0,09
		Телевізори та інші прилади, що містять електронно-променеву трубку	0,00
6	Органічні відходи	Рослинна їжа	32,80
		Нерослинна їжа	7,49
		Опале листя та трава	1,37
		Гілки та рослинна деревина	2,64
7	Гума та шкіра	Гума та шкіра	0,75
8	Текстиль	Текстиль	3,98
9	Будівельні та ремонтні відходи*	Бетон	1,31
		Асфальт	0,00
		Пиломатеріали	0,00
		Гіпсокартон	0,42
		Ґрунти	0,00
		Змішані відходи будівництва	4,21
10	Небезпечні відходи	Фарба	0,00
		Відходи транспортних засобів та їх обладнання	3,18
		Відпрацьовані масла	0,00
		Акумулятори	0,09
		Змішані шкідливі побутові засоби	0,00
11	Залишок твердих побутових відходів після вилучення компонентів		4,82
12	<b>Загальна маса проби твердих побутових відходів</b>		<b>100</b>

Примітки: \* – відходи у складі змішаних ТПВ

За результатами дослідження (рис. 1) у складі побутових відходів м. Суми переважають органічні відходи, а саме рослинна їжа, яка складає 32,80% від загальної кількості компонентів. На вміст скляних пляшок прозорих та білих припадає 9,5%, композитний папір складає 6,43%. Інші компоненти ТПВ не перевищують 5%.

Отримані результати корелюють з даними інших авторів, в тому числі зарубіжних [3, 4, 10], що дозволяє використовувати запропонований підхід до визначення морфологічного складу побутових відходів.



Рис. 1 – Ранжування компонентів у складі змішаних ТПВ

### Висновки і перспективи подальших досліджень

На основі проведеного дослідження показано важливість впливу стратифікації на етапі вибору об'єктів для дослідження морфології побутових відходів, в тому числі для формування вибірки досліджень.

Основними критеріями для вибору кількості одиниць вибірки є неоднорідність показників морфологічного складу відходів, яка відображена коефіцієнтом варіації, а також бажана точність результатів. Також показано вплив стратифікації.

Проведене дослідження щодо визначення морфологічного складу побутових відходів м. Суми з використанням вимог щодо статистичної достовірності результатів дозволяє уніфікувати результати дослідження та порівнювати окремі результати визначення морфологічного складу між населеними пунктами та роками. У подальших дослідженнях планується застосувати запропонований підхід для дослідження морфологічного складу побутових відходів інших міст України.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Douglas, P., Freni-Sterrantino, A., Leal Sanchez, M., Ashworth, D. C., Ghosh, R. E., Fecht, D., ... & Hansell, A. L. (2017). Estimating particulate exposure from modern municipal waste incinerators in Great Britain. *Environmental science & technology*, 51(13), 7511-7519.

2. Abylkhani, B., Guney, M., Aiymbetov, B., Yagofarova, A., Sarbassov, Y., Zorpas, A. A., ... & Inglezakis, V. (2021). Detailed municipal solid waste composition analysis for Nur-Sultan City, Kazakhstan with implications for sustainable waste management in Central Asia. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(19), 24406-24418.
3. Šramková, K., Šomplák, R., Nevrlý, V., Jirásek, P., Smejkalová, V., & Popela, P. (2021). Stratification and multi-representative optimization approach to waste composition analysis. *Optimization and Engineering*, 1-28.
4. Kropáč, J. I. Ř. Í., Gregor, J. I. Ř. Í., & Pavlas, M. A. R. T. I. N. (2020, May). Municipal Waste Composition Analysis – Approaches to and Solutions for Czech Waste Management. In 2nd International Conference on: Technologies & Business Models for Circular Economy: Conference Proceedings, International Conference on Technologies & Business Models for Circular Economy (Vol. 21, pp. 85-94).
5. Zhang, J., Qin, Q., Li, G., & Tseng, C. H. (2021). Sustainable municipal waste management strategies through life cycle assessment method: A review. *Journal of Environmental Management*, 287, 112238.
6. Sarigiannis, D. A., Handakas, E. J., Karakitsios, S. P., & Gotti, A. (2021). Life cycle assessment of municipal waste management options. *Environmental Research*, 193, 110307.
7. Mladenov, M. K. (2021). Potential of municipal solid waste generated in Bulgaria for energy production. *BULGARIAN CHEMICAL COMMUNICATIONS*, 180.
8. Van der Sloot, H. A., Kosson, D. S., & Hjelmar, O. (2001). Characteristics, treatment and utilization of residues from municipal waste incineration. *Waste Management*, 21(8), 753-765.
9. Nizar, M., Munir, E., & Munawar, E. (2021). Analysis of the Composition of Household Waste from the Community within the Framework of a Waste Prevention and Reduction Strategy. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 22.
10. Крайнов, І. П., Крилюк, В. М., & Прокопчук, О. Л. (2014). Розподіл твердих побутових відходів за морфологічним складом для використання в якості альтернативного палива.
11. Погрібний, І. Я. (2012). Проблеми визначення морфологічного складу твердих побутових відходів з урахуванням сучасних умов переробки. *Ефективна економіка*, (11).
12. Sigal, O., Boulanger, Q., Vorobiov, L., Pavliuk, N., & Serhiienko, R. (2018). Research of Energy Characteristics of Municipal Solid Waste in Cherkassy.
13. Azarov, V. N., Stefanenko, I. V., Azarov, A. V., Menzelintseva, N. V., & Statyukha, I. M. (2020, August). Morphological composition of municipal solid waste in urban areas (on the Dagestan Republic example). In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 913, No. 5, p. 052061). IOP Publishing.
14. Özer, B., & Yay, A. S. E. (2021). Comparative life cycle analysis of municipal waste management systems: Kırklareli/Turkey case study. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-11.
15. Dvalishvili, N. L., & Tabatadze, M. S. (2019). The influence of municipal solid waste of Georgia on climate changes. In *Waste Management and Resource Efficiency* (pp. 189-194). Springer, Singapore.

*Стаття надійшла до редакції 17.08.2021 і прийнята до друку після рецензування 23.11.2021*

## REFERENCES

1. Douglas, P., Freni-Sterrantino, A., Leal Sanchez, M., Ashworth, D. C., Ghosh, R. E., Fecht, D., et al. (2017). Estimating particulate exposure from modern municipal waste incinerators in Great Britain. *Environmental science & technology*, 51(13), 7511-7519.
2. Abylkhani, B., Guney, M., Aiymbetov, B., Yagofarova, A., Sarbassov, Y., Zorpas, A. A., et al. (2021). Detailed municipal solid waste composition analysis for Nur-Sultan City, Kazakhstan with implications for sustainable waste management in Central Asia. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(19), 24406-24418.



3. Šramková, K., Šomplák, R., Nevrlý, V., Jirásek, P., Smejkalová, V., & Popela, P. (2021). Stratification and multi-representative optimization approach to waste composition analysis. *Optimization and Engineering*, 1-28.
4. Kropáč, J. I. Ř. Í., Gregor, J. I. Ř. Í., & Pavlas, M. A. R. T. I. N. (2020, May). Municipal Waste Composition Analysis – Approaches to and Solutions for Czech Waste Management. In *2nd International Conference on: Technologies & Business Models for Circular Economy: Conference Proceedings, International Conference on Technologies & Business Models for Circular Economy* (Vol. 21, pp. 85-94).
5. Zhang, J., Qin, Q., Li, G., & Tseng, C. H. (2021). Sustainable municipal waste management strategies through life cycle assessment method: A review. *Journal of Environmental Management*, 287, 112238.
6. Sarigiannis, D. A., Handakas, E. J., Karakitsios, S. P., & Gotti, A. (2021). Life cycle assessment of municipal waste management options. *Environmental Research*, 193, 110307.
7. Mladenov, M. K. (2021). Potential of municipal solid waste generated in Bulgaria for energy production. *Bulgarian chemical communications*, 180.
8. Van der Sloot, H. A., Kosson, D. S., & Hjelmar, O. (2001). Characteristics, treatment and utilization of residues from municipal waste incineration. *Waste Management*, 21(8), 753-765.
9. Nizar, M., Munir, E., & Munawar, E. (2021). Analysis of the Composition of Household Waste from the Community within the Framework of a Waste Prevention and Reduction Strategy. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 22.
10. Krainov, I. P., Kryliuk, V. M., & Prokopchuk, O. L. (2014). Distribution of solid household waste by morphological composition for use as an alternative fuel (in Ukrainian).
11. Pohribnyi, I. Ya. (2012). Problems of determining the morphological composition of solid waste taking into account modern processing conditions. *Efficient economy*, (11) (in Ukrainian).
12. Sigal, O., Boulanger, Q., Vorobiov, L., Pavliuk, N., & Serhienko, R. (2018). Research of Energy Characteristics of Municipal Solid Waste in Cherkassy.
13. Azarov, V. N., Stefanenko, I. V., Azarov, A. V., Menzelintseva, N. V., & Statyukha, I. M. (2020, August). Morphological composition of municipal solid waste in urban areas (on the Dagestan Republic example). In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 913, No. 5, p. 052061). IOP Publishing.
14. Özer, B., & Yay, A. S. E. (2021). Comparative life cycle analysis of municipal waste management systems: Kirklareli/Turkey case study. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-11.
15. Dvalishvili, N. L., & Tabatadze, M. S. (2019). The influence of municipal solid waste of Georgia on climate changes. In *Waste Management and Resource Efficiency* (pp. 189-194). Springer, Singapore.

*The article was received 17.08.2021 and was accepted after revision 23.11.2021*

### **Сатін Ігор Валентинович**

кандидат технічних наук, доцент Київського національного університету будівництва і архітектури, завідувач відділу благоустрою, озеленення населених пунктів та поводження з побутовими відходами Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31

**ORCID ID** <http://orcid.org/0000-0002-2028-9791> **e-mail:** [satin@nikti.org.ua](mailto:satin@nikti.org.ua)

### **Панченко Олена Сергіївна**

старший науковий співробітник Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»

**Адреса робоча:** 03035 Україна, м. Київ, вул. Митрополита В. Липківського, 35

**ORCID ID** <http://orcid.org/0000-0003-3680-7036> **e-mail:** [panchenko@nikti.org.ua](mailto:panchenko@nikti.org.ua)

## ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ ТА СИСТЕМИ INFORMATION RESOURCES AND SYSTEMS

УДК 681.5(042.3)

**Viktor V. Semko**<sup>1</sup>, D.S., Associate Professor, Professor of the Department of Computerized Control Systems  
ORCID ID: 0000-0001-5157-4264 *e-mail*: semko\_viktor@meta.ua

**Oleksiy V. Semko**<sup>2</sup>, PhD, Researcher of Information Security Department  
ORCID ID: 0000-0001-6473-1329 *e-mail*: semalek@meta.ua

<sup>1</sup> National Aviation University, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU, Kyiv, Ukraine

### RESEARCH OF FUNCTIONING PROCESSES OF WIRELESS SENSOR NETWORKS

**Abstract.** *The article is devoted to the research of problems of optimal control of data flow routing in heterogeneous sensor networks of variable topology under conditions of constraints and uncertainties. To solve the problem of synthesis of optimal data transmission routes in sensor networks, it is necessary to synthesize a graph model, formally define the optimization problem, investigate the processes of functioning of network elements and obtain formalized descriptions of the dependence of network elements. The mathematical model of functioning of the distributed system of intelligent data flow control in sensor networks of variable topology is considered based on the formal model of the functioning of the distributed system of intelligent network management, the properties of the processes of optimal load management of nodes and the data network as a whole are investigated. The results of the research allowed to obtain formal descriptions of the dependence of the load of the computing system of the sensor network on the time of the data transmission process, waiting time, service time on the load of the computing system of the sensor network, to determine quantitative indicators of delay and loss of data packets depending on the functioning modes.*  
**Keywords:** *sensor network; distributed system; load; network nodes; routing; data flows; optimal control; conflict; uncertainties*

© B.B. Семко, O.B. Семко, 2021

В.В. Семко<sup>1</sup>, О.В. Семко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

<sup>2</sup> Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОБЧИСЛЮВАНОВОГО СЕРЕДОВИЩА ЕЛЕМЕНТІВ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

***Анотація.** Стаття присвячена питанням дослідження проблем оптимального управління маршрутизацією потоків даних в гетерогенних сенсорних мережах варіативної топології в умовах обмежень та невизначеностей. Для вирішення задачі синтезу оптимальних маршрутів передачі даних в сенсорних мережах необхідно синтезувати граф-модель, формально визначити задачу оптимізації, дослідити процеси функціонування елементів мережі та отримати формалізовані описи залежності параметрів функціонування обчислювального середовища елементів мережі. Розглянуто математичну модель функціонування розподіленої системи інтелектуального управління потоками даних в сенсорних мережах варіативної топології. Виходячи з формальної моделі функціонування розподіленої системи інтелектуального управління мережею, досліджено властивості процесів оптимального управління навантаженням вузлів і мережі передачі даних в цілому. Результати проведених досліджень дозволили отримати формальні описи залежності завантаженості обчислювальної системи вузла сенсорної мережі від часу процесу передачі даних, часу очікування, часу обслуговування від завантаженості обчислювальної системи вузла, визначити кількісні показники затримки і втрати пакетів даних в залежності від режимів функціонування сенсорної мережі.*

***Ключові слова:** сенсорна мережа; розподілена система; навантаження; вузли мережі; маршрутизація; потоки даних; оптимальне управління; конфлікт; невизначеності*

DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.121-138>

### Вступ

В галузі інформаційно-телекомунікаційних технологій, зокрема в контексті розробки телекомунікаційних та багатофункціональних мережевих технологічних рішень, відбувається швидка зміна тенденції практичного використання сенсорних мереж (СМ) передачі даних (ПД) з різномірною топологічною структурою та імплементованими апаратно-програмними складовими. Такі СМ забезпечують бездротову передачу даних та обробку інформації за умов довільного розташування вузлів мереж, впливу зовнішніх й внутрішніх завад і збурень, варіативності топології (ВТ).

Використання бездротових інженерно-технічних і топологічних рішень призводить до ускладнення структур конфігурації фізичних зв'язків і регламенту ПД між елементами СМ у зв'язку з їх гетерогенністю та технологічною складністю їх архітектури.

Параметри функціонування елементів бездротових СМ безпосередньо впливають на управління процесом маршрутизації при ПД і визначають показники гарантоздатності відповідних інформаційно-телекомунікаційних систем (ІТС).

## Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вимоги щодо гарантоздатності і функціональної надійності забезпечуються технологічними рішеннями щодо побудови ІТС на основі СМ з врахуванням невизначеності станів елементів ІТС за умов внутрішніх і зовнішніх впливів.

Поточні і прогностичні значення параметрів функціонування елементів бездротових СМ дозволяють визначити методи вирішення проблеми забезпечення гарантоздатності бездротових мережевих технологій та управління маршрутизацією ПД як задачу побудови технологічно якісної сучасної технології функціонування ІТС.

Станом на сьогодні найбільш ефективними та такими, які широко використовуються, рішеннями управління маршрутизації ПД в сенсорних мережах є протоколи DD (Directed Diffusion), RR (Rumor Routing), GBR (Gradient-based routing), GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing), MCF (Minimum Cost Forwarding), LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy), TEEN (Threshold sensitive Energy Efficient Sensor Network), GAF (Geographic Adaptive Fidelity), TTDD (Two-Tier Data Dissemination), SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation), IDSQ (Information-driven Sensor Querying), CADR (Constrained Anisotropic Diffusion Routing), QARP (QoS aware routing protocol), EAR (Energy Aware Routing), EQSR (Efficient and QoS aware multi-path routing protocol), VGA (Virtual Grid Architecture routing), HPAR (Hierarchical Power-aware Routing), EADAT (Energy-aware data aggregation tree).

Вищезазначені протоколи є технологічними рішеннями, які забезпечують доставку даних на основі процедури взаємного обміну службовою інформацією, централізовану модель збирання даних з доставкою по запиті, технологію кластерного розбиття елементів мережі і використовують інформацію про просторове розташування вузлів СМ, дволанковий механізм ПД з використанням відомостей про місцезнаходження вузлів мережі, вирішують окремі питання ефективного використання енергоресурсу вузлами мережі.

Одним із сучасних методів управління маршрутизацією ПД в СМ є мурашиний алгоритм, який відноситься до поліноміальних алгоритмів та методів природних обчислень і регламентується алгоритмом ACO (ant colony optimization – алгоритм оптимізації мурашиної колонії).

Іншим методом є метод роевого інтелекту, що розглядається як метод оптимізації і описує поведінку розподіленої децентралізованої самоорганізованої СМ при оптимальному управлінні маршрутизацією ПД з використанням інтелектуального перетворювача (ІП), як однієї з базових технологічних складових системи управління (СУ) з використанням технологій штучного інтелекту (ШІ).

Слід зазначити, що для вирішення задачі управління маршрутизацією в сучасних СМ використовується протокол OSPF (Open Shortest Path First), який забезпечує процес ПД найкоротшим шляхом з використанням алгоритму Дейкстри [1], [2], що знаходить дерево найкоротших шляхів на основі топології мережі і не враховує значення параметрів, які визначають навантаження її елементів.

Існуючі на сьогоднішній день методи вирішення задачі оптимального управління маршрутизацією ПД в СМ, а саме алгоритми і методи як інтелектуального, так і управління маршрутизацією ПД в цілому, в тому числі реактивні, проактивні та гібридні протоколи в сервіс-орієнтованих СМ,

технологічно забезпечують визначення окремих технічних функцій, а саме – проблему управління маршрутизацією ПД від вузла-відправника до вузла-отримувача ПД за умов масштабованості, включаючи умову розширеності [3], [4], [5], [6], [7].

Вищезазначені методи не забезпечують вирішення проблеми варіативності топологічної структури СМ, не враховують особливості технологій функціонування бездротових мереж, навантаження на елементи мережі, оптимальність використання обчислювальних потужностей вузлів і мережі в цілому. Слід також зазначити, що існуючі методи і алгоритми управління маршрутизацією ПД не враховують фактори обмеження енергоємності джерел енергії вузлів мережі за умови забезпечення гарантованого управління маршрутизацією ПД в межах припустимих обмежень і невизначеностей значень параметрів, що визначають стан елементів мережі.

### **Мета та задачі дослідження**

Синтез і вибір рішень щодо стратегій управління маршрутизацією і вибору маршруту ПД в мережі здійснюється у відповідності до значення функції ціни (ФЦ) для кожного елемента мережі [7]. В такому разі кожен елемент маршруту ПД можна розглядати як гегелівський об'єкт у відповідності до метрики мережевого інтерфейсу, а маршрут ПД можна уявити як ланцюжок об'єктів в гегелівському уявленні елементів маршруту [6].

Незалежно від обраної метрики мережевого інтерфейсу метою управління маршрутизацією в СМ є визначення оптимального шляху ПД на граф-моделі мережі, яка відображає її топологічну структуру [5].

При моделюванні архітектури і топологічної структури управління маршрутизацією в мережі визначальною умовою є мінімальне використання ресурсів елементів СМ [4]. Таким чином, процеси ПД в мережі забезпечуються в припущенні гарантованого знаходження маршруту від вузла-джерела до вузла-отримувача даних за умов резервування частки пропускної спроможності каналів ПД між вузлами мережі та оцінки навантаження на ресурси обчислювальних систем вузлів мережі.

В такому разі можна застосувати модель самоорганізованої СМ із заявками на послідовну в часі передачу ПД між вузлами мережі з використанням оригінального евристичного алгоритму інтегрального усікання варіантів [8] за умов забезпечення найбільшого сумарного об'єму мережевого трафіку і мінімізації ресурсів мережі, що забезпечують її пропускну спроможність.

Гарантоздатність сенсорної мережі потоків даних забезпечується алгоритмом маршрутизації та технологічно імплементованими засобами забезпечення конфіденційності і цілісності при обміні даними – засобами криптографічного захисту інформації (КЗІ). Саме засоби КЗІ забезпечують рівень гарантій безпеки інформації в мережі. Таким чином, враховуються моделі функціонування мережі, а також віртуалізація простору функціонування мережі.

Таким чином, для вирішення задачі синтезу оптимальних маршрутів ПД в СМ ВТ необхідно синтезувати граф-модель, формально визначити задачу оптимізації, дослідити процеси функціонування елементів мережі та отримати формалізовані описи залежності параметрів функціонування обчислювального середовища елементів мережі.

## Дослідження впливу внутрішніх та зовнішніх чинників на параметри функціонування елементів бездротових сенсорних мереж передачі даних

Процес синтезу і вибору рішення щодо маршруту ПД в СМ складається з трьох етапів [9]: визначення маршрутів ПД від вузла-відправника до вузла-отримувача як мети; вибір найбільш прийняттого варіанта маршруту ПД, який веде до досягнення мети, відповідно значення функції ціни рішення з врахуванням параметрів функціонування мережі і її елементів; реалізація маршруту ПД в СМ як рішення (обраного варіанта дії).

В такому разі дослідження способу визначення оптимального маршруту ПД, як задачі конфлікту в технічній системі [11], [12], [7], має здійснюватись на функціональному і структурному рівнях.

На функціональному рівні розглядається динамічний процес рішення задачі управління маршрутизацією ПД і всі його характеристики безвідносно до структури управління як опису самого процесу в цілому без його поділу на окремі складові частини.

На структурному рівні функціональні рішення задачі синтезу оптимального маршруту ПД в СМ розглядаються з точки зору можливості реалізації синтезованої стратегії управління в умовах обмежень і невизначеностей значення параметрів стану елементів і варіативності топології мережі. Таким чином, на функціональному рівні досліджується функціональна модель управління маршрутизацією ПД в СМ ВТ методами ситуаційного управління з використанням автоматних граматик [13], [14], [15]. В такому разі задачу синтезу і вибору маршруту ПД, як задачу управління маршрутизацією, доцільно вирішувати на структурному рівні при динамічній зміні значень параметрів стану елементів мережі та процесів управління за умови наявності гарантованого управління.

Математична модель сенсорної мережі може бути представлена зв'язковим графом

$$G = (V, E),$$

де  $V$  – множина вузлів графа, що представляє мережа;  $E$  – множина ребер графа, що з'єднує вузли і відображає можливий маршрут слідування ПД.

Кожному ребру  $e_{ij} \in E \forall \{i, j\} \in V$  графа  $G$  поставлено у відповідність невід'ємне число  $c_{ij} \geq 0$ , що визначає пропускну здатність ребра як функцію ціни при передачі ПД.

Введемо поняття функції  $f$ , яка характеризує процес ПД між вершинами  $s$  і  $t$  мережі і є невід'ємною для ребер графу  $G$ . Тобто  $f_{ij} \geq 0$  за умови того, що процеси передачі не накопичуються в проміжних вузлах мережі  $G$  між вузлами  $s$  і  $t$ .

Таким чином, для маршруту ПД між вузлами  $s$  і  $t$  мережі  $G$  отримуємо значення показника оцінки якості обраного маршруту щодо процесів ПД

$$W_{st} = \sum_k f_{ki} = \sum_j f_{ij}, \forall i \in V, i \neq \{s, t\}.$$

Слід зазначити, що отримане значення показника  $W_{st}$  враховує тільки такі маршрути ПД між вузлами  $s$  і  $t$  мережі  $G$ , які включають ребра, ПД в яких не перевищують пропускну спроможності відповідного каналу та можливостей обчислювальних систем вузлів маршруту, а саме  $f_{ij} \leq c_{ij}$  і  $e_{ij} \in E$ .

Залишкова пропускна здатність ребра  $e_{ij}$  визначається як різниця пропускну здатності ребра і ПД по ньому, тобто  $c_{ij}^f = c_{ij} - f_{ij}$ . В такому разі з графу мережі  $G$  отримуємо залишкову мережу  $G' = (V, E^f)$ , в якій залишаються ребра з додатною залишковою пропускну спроможністю.

Маршрут ПД в мережі для розподіленої системи управління маршрутизацією ініціюється подією виникнення заявки в мережі на процес ПД між парою вершин з множини  $\{\{s_1, t_1\}, \dots, \{s_n, t_n\}\}$  полюсів. Слід зазначити, що час життя заявок при ПД мережею обмежений їх обслуговуванням за умови встановленого маршруту ПД між вузлами. Тим самим забезпечується вивільнення пропускну спроможності ребер мережі у разі задоволення заявки на передачу. Якщо маршрут ПД між вузлами був визначений, то після закінчення часу життя заявка скидається, звільняючи відповідну пропускну здатність ребер мережі. Множина ПД між кожною парою полюсів через вузол є продуктом  $\{s_m, t_m\}$  і визначається як продукт  $v_m$ .

В якості обмеженого ресурсу сенсорної мережі, що визначає функцію ціни, обрано пропускну спроможність каналів зв'язку, які визначають ребра (дуги) моделі мережі  $G$ .

Залежно від способу визначення вартості дуг моделі мережі для визначення функції ціни застосовується субоптимальний мінімально-розрізний алгоритм, орієнтований на синтез і вибір маршруту ПД із застосуванням ребер граф-моделі сенсорної мережі, які мають найбільший резерв пропускну спроможності каналів і мінімальну кількість елементів синтезованого маршруту. Такий алгоритм забезпечує обслуговування найбільшої кількості заявок.

Гарантоздатність розподіленої сервіс-орієнтованої СМ забезпечується шляхом використання засобів криптографічного захисту інформації, віртуалізацією простору функціонування мережі та управлінням щільністю навантаження каналів ПД при інформаційній взаємодії вузлів мережі. Засоби криптографічного захисту інформації забезпечують вимоги доступності, цілісності і конфіденційності при обміні. Щільність навантаження каналів ПД між вузлами мережі враховується функцією ціни при синтезі і виборі рішень щодо управління маршрутизацією в мережі.

Рішення задачі взаємодії конфліктуючих вузлів мережі доцільно розглядати в постановці задачі дискретної динамічної оптимізації [16] для множини усіх значень цільової функції

$$j(x) = \min \{ j(x) : x \in X \},$$

де  $X$  – припустима область значень параметрів;  $j$  – цільова функція; кожен елемент  $x \in X$  – припустиме рішення задачі дискретної оптимізації  $(J, X)$  за умови скінченності множини  $X$ .

Оптимальному рішенню  $x^* \in X$  відповідає значення цільової функції  $j(x^*) = \min \{j(x) : x \in X\}$ .

Тоді дискретний процес для рівняння стану можна уявити у вигляді

$$y_t = W(y_{t-1}, x_{t-s}, \dots, x_t), t = 1, 2, \dots, T,$$

де  $x_{t-s}, x_{t-s+1}, \dots, x_t$  – управління при перетворенні стану  $y_{t-1}$  етапу  $t-1$  в стан  $y_t$  етапу  $t$ . Стан  $y_t$  обирається, виходячи з множин станів  $Y_t$ , областей існування управління  $X_t$  і множин  $Z_t$ . Множини  $X_t$  скінченні, а цільова функція  $J$  для кожного  $t$  дозволяє визначити мінімум сумарної оцінки  $j(\cdot, \cdot, \dots, \cdot)$  на множині  $Y_{t-1} \times X_{t-s} \times \dots \times X_t$ .

Для синтезу і вибору оптимального управління маршрутизацією ПД в СМ визначимо немарківську динамічну задачу динамічної дискретної оптимізації у вигляді

$$\sum_{t=1}^T j_t(y_{t-1}, x_{t-s}, \dots, x_t) + j_0(y_T) \rightarrow \min,$$

де  $y_t = W_t(y_{t-1}, x_{t-s}, \dots, x_t)$ ,  $x_t \in X_t$ ,  $y_t \in Y_t$ ,  $(y_{t-1}, x_{t-s}, \dots, x_t) \in Z_t$ ,  $t = 1, 2, \dots, T$ ,  $x_t = x_t^0$ ,  $t = 1-s, \dots, 0$ ,  $y_0 = y^0$ .

Визначимо скінченні множини  $\overset{\circ}{Y}_t$ , що вміщують стани, в яких може знаходитись процес вирішення задачі динамічної дискретної оптимізації, що визначена вищенаведеними співвідношеннями, і для яких є справедливим включення:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_t \in Y_t : y_t = W_t(y_{t-1}, x_t), x_t \in X_t, (y_{t-1}, x_t) \in Z_t, y_{t-1} \in \overset{\circ}{Y}_{t-1}, \\ t = 1, 2, \dots, T, Y_0 = \{y^0\} \end{array} \right\}.$$

В такому разі алгоритм синтезу і вибору стратегій управління маршрутизацією ПД в СМ, як задачі дискретної динамічної оптимізації, можна представити послідовністю кроків:

1. Для усіх  $y \in \overset{\circ}{Y}_T$  визначаємо функцію ціни для немарківської динамічної задачі  $J_{t+1}(x) = j_0(t)$ .

2. Для усіх  $y \in \overset{\circ}{Y}_{t-1}$  і  $t = \{T, T-1, \dots, 1\}$  обчислюємо  $J_t(y) = \min \{j_t(y, x + J_{t+1}(W_t(y, x))) : x \in X_t, W_t(y, x) \in Y_t, (y, x) \in Z_t\}$ .

Якщо задача  $J_t(y)$  не може бути вирішена, припускаємо, що  $J_t(y) : +\infty$ . В іншому випадку визначаємо оптимальне рішення, як  $x_t(y)$ .



3.  $J_1(y^0)$  є мінімальним значенням функції для немарківської динамічної задачі.

4. Визначаємо  $x_1 : x_1(y^0)$  та  $y_1 := W_1(y^0, x_1)$ .

5. Для усіх  $t = \{2, 3, \dots, T\}$  припускаємо  $x_t := x_t(y_{t-1})$ ,  $y_t := W_t(y_{t-1}, x_t)$ .

При  $J_1(y^0) < +\infty$  немарківська динамічна задача має оптимальне рішення  $\{x_t, y_{t-1}\}_{t=1}^T$ . Кроки 4 і 5 алгоритму породжують оптимальне рішення, оскільки  $x_t(y)$  визначає відповідне оптимальне управління на першому етапі процесу, який складається з етапів  $t, t+1, \dots, T$  і починається зі стану  $y$ . Тим самим здійснюється перехід до нового стану  $W(y, x_t(y))$ , для якого відомо оптимальне управління  $x_{t+1}(W(y, x_t(y)))$  першого етапу процесу, який вміщує етапи  $\{t, t+1, \dots, T\}$ .

Алгоритм управління маршрутизацією забезпечує стійкість функціонування СМ в разі нестабільного функціонування мережевого інтерфейсу, відмов обладнання, а також зовнішніх і внутрішніх впливів на функціональний стан елементів мережі.

Синтез і вибір рішення в розподіленій системі інтелектуального управління (СІУ) маршрутизацією ПД в СМ ВТ за умов обмежень, невизначеностей і забезпечення гарантоздатності здійснюється на основі певної альтернативи, що отримана на основі аналізу об'єкта управління (ОУ), яким є мережа, і його функціонального стану.

На підставі відомостей про навколишнє середовище і стан СМ при наявності пам'яті і мотивації синтезується мета, яка поряд з іншими даними сприймається СІУ кожного вузла, як елементом розподіленої СІУ маршрутизацією ПД при обслуговуванні запиту на процес передачі.

Робота математичної моделі синтезу і вибору управління маршрутизацією ПД базується на теоретичних передумовах.

Визначимо множину критеріїв або ситуацій, що можуть бути визначені  $n$ -мірним вектором, компоненти якого  $h_i \in R^+, \forall i = \overline{1, n}$  описують спосіб, якість або передумову використання того чи іншого методу управління за параметром, що належить скінченній впорядкованій множині можливих значень  $n$ .

При цьому створюється взаємозв'язок, що визначається множинним відношенням

$$(h_1, h_2, \dots, h_n) \in H_1 \times H_2 \times \dots \times H_n.$$

Набору векторів  $(h_1, h_2, \dots, h_n)$  приписують значення  $y_j, j = \overline{1, \dots, k}, k \leq n$ , що встановлює відповідність певної множини наборів передумов  $h_i$  і стратегії управління  $y_i$ .

Таким чином може бути обрана функція, що визначає множину стратегій управління маршрутизацією

$$\left\{ \begin{array}{l} f : H_1 \times H_2 \times \dots \times H_n \rightarrow Y \\ Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \forall y_j \in [0, \dots, 1], j = \overline{1, \dots, k}, k \leq n \end{array} \right.$$

В такому разі синтез і вибір стратегії управління маршрутизацією ПД формально має вигляд таблиці, яка задається наборами маршрутів

$$\left( (h_1, h_2, \dots, h_n), y_j \right), \forall j = \overline{1, \dots, k}.$$

Враховуючи те, що в загальному випадку таблиця має великий розмір, множину стратегій для вибору маршруту ПД в СМ ВТ можна визначити геделівськими парами, як ребрами граф-моделі  $G$  мережі

$$\left( (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n), y_j \right), \forall j = \overline{1, \dots, k},$$

де  $\sigma_i, i = \overline{1, \dots, n}$  – підмножина  $h_i$ ,  $(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$  – стратегії, які визначають маршрути ПД.

Таким чином, в повній системі завдання вибору  $\left( (\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n), y_j \right)$  згідно з критерієм обирається рішення щодо маршруту ПД в мережі.

Відповідно до прийнятого рішення виробляється управління щодо послідовності взаємодії вузлів СМ на маршруті від вузла-відправника до вузла-отримувача даних. По завершенню ПД вузол-відправник завершує обслуговування заявки на ПД.

Виходячи з топологічності математичного простору функціонування СМ ВТ, визначаємо теоретико-множинну модель синтезу і вибору рішень щодо управління маршрутизацією ПД при взаємодії конфліктуючих вузлів мережі в умовах обмежень і невизначеностей. В такому разі задачу синтезу управління маршрутизацією можна сформулювати як задачу розв'язання конфлікту взаємодії вузлів мережі у відповідності до принципу оптимальності та правила зупинки, як задачу динамічної дискретної оптимізації.

Розглянемо модель  $M$  взаємодії елементів СМ ВТ за умови замкненості простору  $Q$  функціонування СМ ВТ з границею  $\Gamma_{zp}(Q)$ . При цьому варіативність топології мережі пов'язана не тільки з кількістю активних вузлів СМ, а й з гетерогенністю мережі, що обумовлено можливістю виходу в сегмент мереж *Internet i Intranet*, використовуючи маршрутизацію за моделлю *OSI*.

В такому разі модель  $M$  взаємодії вузлів СМ в топологічній схемі, яка відображає наявність ребер графу мережі  $G$ , можна визначити як

$$M = \bigcup_{i=1}^N M^i,$$

де  $N$  – кількість вузлів СМ;  $M^i$  – часткова модель  $i$ -го вузла СМ, яка відображає кількісні характеристики зв'язків з іншими вузлами мережі – ребрами графу і може бути представлена у вигляді

$$M^i = \langle B^i, F^i, \Gamma_{np}^i \rangle,$$

а множини  $\Gamma_{np}^i$  визначають граматику та правила утворення співвідношень при взаємодії вузлів мережі в просторі  $Q$

$$\Gamma_{np} = \bigcup_{i=1}^N \Gamma_{np}^i .$$

Тобто в загальному випадку можна ввести поняття мови для формального опису процесів, пов'язаних з вирішенням задачі формування топології СМ ВТ в просторі  $Q$ .

В загальному випадку мова є нескінченною множиною, а нескінченні об'єкти важко задати, наприклад, простим перерахуванням елементів [17], [18]. Будь-який кінцевий механізм задавання мови є граматикою  $\Gamma_{np}^i$ .

В моделі  $M^i$  базис  $B^i$  визначає потенційні можливості взаємодії  $i$ -го вузла СМ з іншими вузлами мережі при визначенні можливостей маршрутизації і кількісних характеристик зв'язків ребер графу мережі  $G$  в просторі  $Q$

$$B^i = (X^i, Y^i, A^i),$$

де  $X^i$  – множини потенційно можливого місця знаходження  $i$ -го вузла мережі в просторі  $Q$ , які визначаються як множини керованих та напівкерованих станів мережі  $G$  в просторі параметрів у відповідності з припущенням невизначеності та прогнозу переміщення  $i$ -го вузла; множина  $Y^i$  визначається характеристиками переміщення  $i$ -го вузла в просторі керованих і напівкерованих станів та враховує наявні ресурси управління щодо зміни динамічних характеристик маршрутизації (щільності ПД за напрямком передачі) для  $i$ -го вузла мережі у відповідності з припущенням  $A^i$ , яке враховує прогноз, невизначеність, динаміку та небезпечність переміщення  $i$ -го вузла щодо вузла-відправника для співвідношення  $F^i$ , що враховує прогноз, динаміку та безпечність маршруту ПД в просторі  $Q$  з базисом  $B^i$ .

Для СМ в цілому невизначеність стану можна описати співвідношенням  $A = \bigcup_{i=1}^N A^i$ .

Значення  $F^i$  визначає властивості функціонування  $i$ -го вузла мережі при побудові маршруту ПД в просторі  $Q$

$$F^i = (f_x^i, f_c^i, d^{ij}),$$

де  $f_x^i$  – згладжені значення координат для  $i$ -го вузла в просторі  $Q$  для кожного моменту ПД;  $f_c^i$  – згладжені значення першої похідної (вектора швидкості зміни координат) при переміщенні вузла в просторі  $Q$ ;  $d^{ij}$  – відстань взаємодії  $i$ -го вузла із суміжним  $j$ -м вузлом мережі, яка враховує

зміну параметрів функціонування відповідних каналів ПД (ребер графу мережі  $G$  в просторі  $Q$ ).

Виходячи з формального опису математичних моделей взаємодії вузлів СМ в процесі синтезу і прийняття рішень щодо стратегій управління маршрутизацією ПД, визначимо мінімально-перебірну процедуру синтезу і вибору рішення [8], [19] у відповідності до критерію оптимальності  $\Phi$ , який фактично є адитивним критерієм вибору, що визначається співвідношенням

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi = \sum_{i=1}^k C_i \lambda_i \\ \lambda_i = \frac{\Delta u_i}{\sup |u_i|}, \forall \lambda_i \in \lambda \cdot \\ \sum_{i=1}^k C_i = 1 \end{array} \right.$$

Значення коефіцієнтів  $C_i$  визначається для кожного виду конфліктів окремо.  $\lambda_i$  визначає "витрати на управління" параметрами функціонування СМ згідно з обраною стратегією управління на множині ребер граф-моделі  $G$ , що відповідає формальній моделі  $M$  за рахунок управління  $u_i$  для  $i$ -го елемента маршруту ПД в просторі  $Q$ .

В такому разі задачу синтезу управління можна сформулювати як конфлікт взаємодії вузлів мережі  $G$  в просторі  $Q$

$$K = \langle M, A, \Gamma_{np}, G, \mu \rangle,$$

а процедуру синтезу стратегій вирішення конфлікту  $\mu$  згідно з принципом оптимальності  $\chi$ , який реалізовує вимоги критерію  $\Phi$ , можна представити у вигляді

$$\left\{ \begin{array}{l} K = \langle M, A, \Gamma_{np}, G, \mu \rangle \\ \chi K = \mu \end{array} \right.$$

Вибір оптимальної стратегії вирішення конфлікту  $\mu^*$  з врахуванням правила зупинки  $\Gamma_{зуп}$  при переборі формулюється у вигляді

$$\mu^* = \inf_{\chi, \Gamma_{зуп}} K,$$

що визначає постановку конфлікту взаємодії об'єктів та синтезу оптимального рішення в просторі  $Q$ .

## Дослідження чинників, які впливають на функціональний стан елементів бездротових сенсорних мереж передачі даних

В СМ існує поняття *QoS* (*Quality of Service* – якість обслуговування). В більшості випадків *QoS* визначається чотирма параметрами:

- смуга пропускання каналу зв'язку;
- затримка при передачі пакетів даних;
- коливання затримки при передачі пакетів даних;
- втрата пакетів даних при передачі.

Разом з тим, на параметри *QoS* впливає взаємне розташування вузлів СМ, що визначає топологічні характеристики мережі, залежить від властивостей бездротових каналів зв'язку вузлів, показників якості обслуговування трафіку та завантаження обчислювальних систем СІУ вузлів.

В загальному випадку, обслуговування трафіку ПД в мережі проводиться по маршрутах, які синтезуються і обираються розподіленою СІУ маршрутизацією з використанням протоколів мережевого рівня, що реалізують метод вибору маршрутів. Маршрут ПД вмщує певну кількість транзитних елементів мережі, що включають в себе вузли і з'єднуючі їх канали зв'язку, які в сукупності визначають затримку доставки даних від вузла-відправника до вузла-одержувача. Також, на кожній з ділянок маршруту ПД може відбутися втрата даних.

Таким чином, якість обслуговування, яку визначають втрати і затримка пакетів даних, залежить від характеристик маршруту ПД, якими є кількість транзитних вузлів СМ, довжини транзитних ділянок маршруту, завантаженість каналів зв'язку між транзитними вузлами, наявність радіозавад та завантаженість обчислювального середовища СІУ вузлів мережі.

У загальному випадку, ці характеристики є випадковими, отже, необхідно визначити їх опис у формальній формі. Також слід мати на увазі, що якість обслуговування залежить і від властивостей трафіку, як процесу.

Для дослідження характеристик завантаження транзитних вузлів СМ було проведено імітаційний експеримент, результати якого відображені на рис. 1.



Рис. 1 – Залежність завантаженості обчислювальної системи вузла СМ від часу процесу ПД

За результатами дослідження отримано ідентифікаційну модель у формі поліноміальної функції

$$\eta_{зав}^i = \frac{0.0003t^6 - 0.0367t^5 + 1.8956t^4 - 45.549t^3 + 500.01t^2 - 2302.1t + 15446}{200000},$$

де  $\eta_{зав}^i$  – завантаження транзитного вузла СМ (%),  $t$  – час від початку процесу ПД ( $ms$ ).

Завантаженість вузла також впливає на час очікування обслуговування запитів на ПД (рис. 2).

Перетин графіків часових значень очікування обслуговування і завантаженості вузла визначає оптимальне функціонування СІУ маршрутизацією вузла СМ.

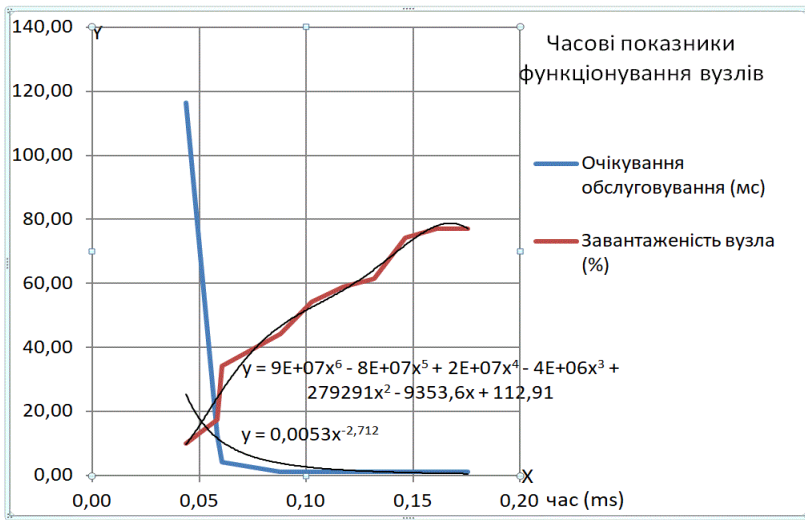


Рис. 2 – Залежність часу очікування обслуговування від завантаженості обчислювальної системи вузла СМ

За результатами дослідження отримано ідентифікаційні моделі завантаженості вузла і очікування обслуговування в СМ.

$$\eta_{завантаженості}^i = 9 \times 10^7 t^6 - 8 \times 10^7 t^5 + 2 \times 10^7 t^4 - 4 \times 10^6 t^3 + 279291 t^2 + 112,91,$$

де  $\eta_{завантаженості}^i$  – завантаженість транзитного вузла СМ (%),  $t$  – час від отримання запиту на ПД ( $ms$ ).

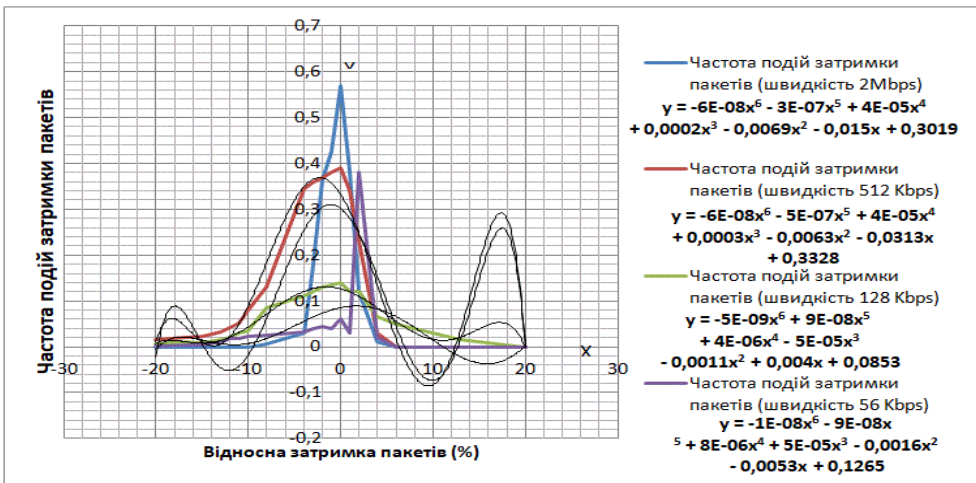
$$\eta_{вузла}^i = 0.0053t^{-2,712},$$

де  $\eta_{вузла}^i$  – час очікування обслуговування транзитного вузла СМ ( $ms$ ),  $t$  – час від отримання запиту на ПД ( $ms$ ).

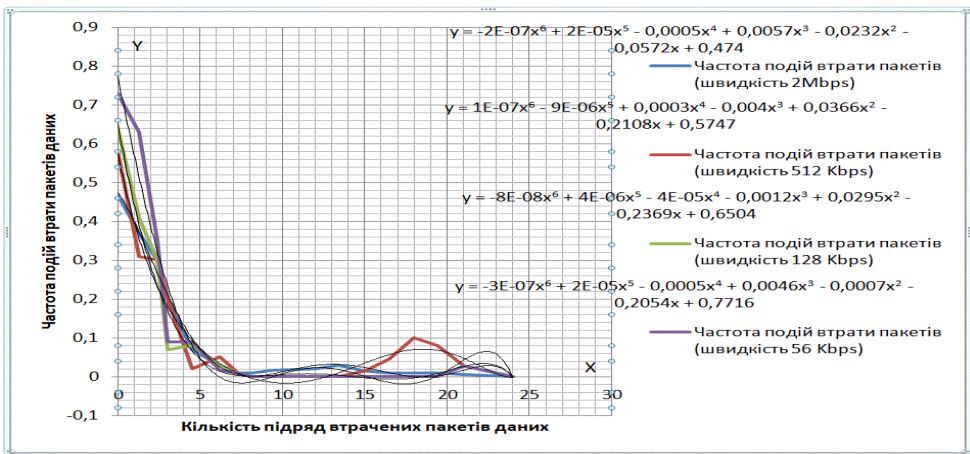
Оптимальне співвідношення, що визначає оптимальне функціонування вузла СМ, є рішенням рівняння  $\eta_{завантаженості}^i = \eta_{вузла}^i$ .

Надалі при аналізі втрат пакетів даних і швидкості передачі даних з використанням бездротових технологій слід враховувати те, що підтримка протоколів передачі даних може бути апаратною, програмною або змішаною. Протоколи прикладного і мережевого рівня практично завжди підтримуються програмно. Протоколи фізичного та канального рівнів тісно пов'язані із середовищем передачі даних і підтримуються апаратно мережевими інтерфейсними адаптерами (картами). Мережевий рівень може підтримуватися як апаратно, так і програмно.

Результати імітаційних експериментів щодо дослідження подій затримки і втрати пакетів даних при передачі бездротовими каналами ПД стандарту IEEE 802.11/a/b/g/n наведені на рис. 3.



а)



б)

Рис. 3 – Результати дослідження подій затримки і втрати пакетів даних

Отримані ідентифікаційні моделі дозволяють забезпечувати управління якістю обслуговування при мінімізації втрат пакетів шляхом зміни швидкості передачі даних при інформаційному обміні вузлів СМ.

## **Висновки**

Сервіс-орієнтовані СМ є розподіленими самоорганізованими мережами збирання і передачі даних до певного хоста або до зовнішньої мережі через інші сенсори з використанням бездротового каналу передачі даних. Такі мережі, як правило, мають радіуси взаємодії з вузлами, що можуть перевищувати гранично припустимі. В такому разі вибір топології СМ має безпосередній вплив на вибір протоколів, параметрів каналів взаємодіючих вузлів та маршрут ПД. Саме тому дослідження моделей СМ ВТ і методів інтелектуального управління маршрутизацією ПД за умов забезпечення гарантоздатності мереж є актуальним науковим завданням.

Сучасні СІУ самоорганізованими гарантоздатними СМ і процесами, що обумовлені їх функціонуванням, структурно та функціонально є складними і багатомірними. Їх прагматична сутність обумовлюється перш за все наявністю взаємозв'язків, правил та відношень, як між власне внутрішніми компонентами, так і з компонентами зовнішнього середовища. Взаємозв'язки між компонентами описуються, як правило, моделями, які відображають специфіку взаємодії цих компонент, елементів та підсистем із зовнішнім і внутрішнім середовищем в умовах невизначеностей, довільних обмежень та конфлікту. При цьому невизначеності обумовлені неоднозначністю, неповнотою або відсутністю даних про вектор стану і параметри функціонування СІУ; неконтрольованими завадами вимірювання значення параметрів; зовнішніми та внутрішніми збуреннями; властивостями простору існування СМ; наявністю об'єктів, які знаходяться в стані конфлікту. Під конфліктом в цьому сенсі розуміють явище взаємодії по-різному цілеспрямованих сторін – об'єктів технічних систем (ТС), які або мають складний опис, що не може бути використаним практично, або взагалі не можуть бути повною мірою описаними як формально, так і вербально.

Проблемам дослідження властивостей та характеристик, що впливають на процеси функціонування і управління сучасними мережами ПД, присвячені роботи вітчизняних та закордонних вчених, таких як Д. Бертсекас [20], Л.Н. Беркман [21], Б.С. Гольдштейн [22], А.Е. Кучерявий [23] та інших. За їх висновками встановлено, що процеси функціонування гарантоздатних самоорганізуючих СМ ВТ потребують створення новітніх СІУ на основі дискретних моделей та методів вирішення задач вибору з використанням методів динамічної дискретної оптимізації.

В цьому сенсі особливий інтерес має дослідження процесів підвищення ефективності управління маршрутизацією ПД в СМ ВТ за рахунок використання СІУ в умовах забезпечення гарантоздатності при наявності обмежень і невизначеностей. За результатами аналізу та узагальнення загальнонаукових і методологічних засад щодо існуючих підходів і методів управління маршрутизацією об'єктами-процесами в роботі, по-перше, проведено обґрунтування та досліджено проблеми управління маршрутизацією власне у сервіс-орієнтованих СМ ВТ за умов конфлікту взаємодії їх вузлів, по-друге, запропоновано математичну модель



функціонування СМ ВТ в умовах обмежень і невизначеностей, по-третє, досліджені процеси функціонування обчислювальних систем вузлів мереж передачі даних.

При дослідженні методів управління маршрутизацією ПД в СМ ВТ за умов невизначеностей і обмежень запропоновано застосовувати методологію системно-структурного аналізу процесів взаємодії конфліктуючих вузлів мережі, як дослідження явища в цілому.

СІУ маршрутизацією ПД розглянуто в якості розподіленої системи, що складається з підструктур, які, у свою чергу, складаються з елементів і в якості підсистем входять в системи більш високого рівня.

Результати проведених досліджень дозволили отримати формальні описи залежності завантаженості обчислювальної системи вузла СМ від часу процесу ПД, часу очікування, часу обслуговування від завантаженості обчислювальної системи вузла СМ, визначити кількісні показники затримки і втрати пакетів даних в залежності від режимів функціонування СМ.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Олифер В.Г. и Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб: Питер, 2010. – 944 с.
2. Frank Miller. Designing & Deploying Network Solutions for Small and Medium Business. Instructor Textbook Rev. 1.0. 2014. – 602 p.
3. Гніденко М.П., Серих С.О. і Прокопов С.В. Конвергентна мережна інфраструктура. Навчальний посібник. – Київ: ДУТ, 2019. – 173 с.
4. Семко В.В., Семко О.В., Бурячок В.Л. і Складаний П.М. Методологія інтелектуального управління маршрутизацією в конфліктуючих сенсорних мережах варіативної топології, *Сучасна спеціальна техніка*, 2018, С. 64–76.
5. Семко В.В. і Семко О.В. Розробка формальної моделі інтелектуального управління маршрутизацією в конфліктуючих сенсорних мережах варіативної топології, *Математичне моделювання в економіці*, 2019, С. 5–19.
6. Семко О.В. Логіко-семантична модель управління маршрутизацією потоків даних в сенсорних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. №52. С. 135–139.
7. Семко В.В. і Семко О.В. Метод управління маршрутизацією потоків даних в гетерогенних мережах за умов конфлікту, невизначеностей і збурень. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 2021, С. 73–84.
8. Семко В.В. Вирішення задачі конфлікту за методом інтегрального усікання варіантів. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2015. № 2. С. 40–50.
9. Подиновский В.В. Математическая теория выработки решений в сложных ситуациях. Учебник. – М: МО СССР, 1981. – 211 с.
10. Касьянов В.А. Субъективный анализ: Монография. Киев: НАУ, 2007. – 512 с.
11. Павлов В.В. Конфликты в технических системах. – К: Вища школа, 1982. – 184 с.
12. Павлов В.В. и Павлова С.В. Интеллектуальное управление сложными нелинейными динамическими системами. Аналитика интеллекта. – К: Наукова думка, 2016. – 215 с.
13. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. – М: Наука, 1986. – 288 с.
14. Рихтер К. Динамические задачи дискретной оптимизации. – М: Радио и связь, 1985. – 136 с.
15. Семко О.В. і Семко В.В. Розробка формальної моделі інтелектуального управління маршрутизацією в конфліктуючих сенсорних мережах варіативної топології. *Математичне моделювання в економіці*. 2019. № 1. С. 5–19.

16. Пападимитру Х. і Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность. – М: Мир, 1985. – 510 с.
17. Дюбин Г.Н. и Суздаль В.Г. Введение в прикладную теорию игр. – М: Наука, 1969. – 336 с.
18. Исследование операций. Методологические основы и математические методы / под ред. Дж. Моудера и С. Элмаграби. – М: Мир, 1981. – 712 с.
19. Семко О.В. і Семко В.В. Дослідження властивостей рішення задачі конфлікту за методом інтегрального усікання варіантів. *Проблеми інформатизації та управління*. 2014. № 2. С. 60–71.
20. Бертсекас Д. и Галлагер Р. Сети передачи данных. – М: Мир, 1989. – 544 с.
21. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Проективання телекомунікаційних мереж – Київ: Техніка, 2002. – 792 с.
22. Гольдштейн Б.С. Сети связи пост-NGN. СПб: БХВ-Петербург, 2014. – 160 с.
23. Кучерявый, А.Е., Цуприков А.Л. Сети связи следующего поколения. – М: Изд-во ФГУП ЦНИИС, 2006. – 278 с.

*Стаття надійшла до редакції 01.07.2021 і прийнята до друку після рецензування 08.09.2021*

## REFERENCES

1. Olifer, V.G., & Olifer, N.A. (2010). *Komp'yuternye seti. Principy, tekhnologii, protokoly*. SPb: Piter (in Ukrainian).
2. Frank Miller. (2014). *Designing & Deploying Network Solutions for Small and Medium Business. Instructor Textbook Rev. 1.0*.
3. Hnidenko, M.P., Serykh, S.O., & Prokopov, S.V. (2019). *Konverhentna merezhna infrastruktura. Navchalnyi posibnyk*. Kyiv: DUT (in Ukrainian).
4. Semko, V.V., Semko, O.V., Buryachok, V.L., & Skladannij, P.M. (2018). Metodologiya intelektual'nogo upravlinnya marshrutyzatsiieu v konfliktuyuchih sensornih merezhah variatyvnoi topologii. *Suchasna special'na tekhnika*, 64-76 (in Ukrainian).
5. Semko, V.V., & Semko, O.V. (2019). Rozrobka formal'noi modeli intelektual'nogo upravlinnya marshrutyzatsiieu v konfliktuyuchih sensornih merezhah variatyvnoi topologii. *Matematichne modelyuvannya v ekonomici*, 5-19 (in Ukrainian).
6. Semko, O.V. (2018). Logiko-semantichna model' upravlinnya marshrutyzatsiieu potokiv danih v sensornih merezhah. *Sistemi upravlinnya, navigacii ta zv'yazku*, 52, 135-139 (in Ukrainian).
7. Semko, V.V., & Semko, O.V. (2021). Metod upravlinnya marshrutyzatsiieu potokiv danih v heterogenih merezhah za umov konfliktu, nevznachenostej i zburen'. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, 73-84 (in Ukrainian).
8. Semko, V.V. (2015). Virishennya zadachi konfliktu za metodom integral'nogo usikannya variantiv. *Telekomunikacijni ta informacijni tekhnologii*, 2, 40-50 (in Ukrainian).
9. Podinovskij, V.V. (1981). *Matematicheskaya teoriya vyrabotki reshenij v slozhnyh situacijah*. Uchebnik. Moscow: MO SSSR (in Russian).
10. Kas'yanov, V.A. (2007). *Sub'ektivnyj analiz: Monografiya*. Kiev: NAU (in Russian).
11. Pavlov, V.V. (1982). *Konflikty v tekhnicheskikh sistemah*. Kyiv: Vishcha shkola (in Russian).
12. Pavlov, V.V., & Pavlova, S.V. (2016). *Intellectual'noe upravlenie slozhnymi nelinejnymi dinamicheskimi sistemami. Analitika intellekta*. Kyiv: Naukova dumka (in Russian).
13. Pospelov, D.A. (1986). *Situacionnoe upravlenie: teoriya i praktika*. Moscow: Nauka (in Russian).
14. Rihter, K. (1985). *Dinamicheskie zadachi diskretnoj optimizacii*. Moscow: Radio i svyaz' (in Russian).

15. Semko, O.V., & Semko, V.V. (2019). Rozrobka formal'noi modeli intelektual'nogo upravlinnya marshrutzatsiieiu v konfliktuyuchih sensornih mrezhah variatyvnoi topologii. *Matematichne modelyuvannya v ekonomici*, 1, 5-19 (in Ukrainian).
16. Papadimitru, H., & Stajglic, K. (1985). *Kombinatornaya optimizaciya. Algoritmy i slozhnost'*. Moscow: Mir (in Russian).
17. Dyubin, G.N., & Suzdal', V.G. (1969). *Vvedenie v prikladnyuyu teoriyu igr*. Moscow: Nauka (in Russian).
18. Moudier, D., & Jelmagrabi, S. (Eds.). (1981). *Issledovanie operacij. Metodologicheskie osnovy i matematicheskie metody*. Moscow: Mir (in Russian).
19. Semko, O.V., & Semko, V.V. (2014). Doslidzhennya vlastivostej rishennya zadachi konfliktu za metodom integral'nogo usikannya variantiv. *Problemi informatizacii ta upravlinnya*, 2, 60-71 (in Ukrainian).
20. Bertsekas, D., & Gallager, R. (1989). *Seti peredachi danyh*. Moscow: Mir (in Russian).
21. Steklov, V.K., & Berkman, L.N. (2002). *Proektuvannya telekomunikacijnih mrezh*. Kyiv: Tekhnika (in Ukrainian).
22. Gol'dshtejn, B.S. (2014). *Seti svyazi post-NGN*. SPb: BHV-Peterburg (in Russian).
23. Kucheryavyj, A.E., & Cuprikov, A.L. (2006). *Seti svyazi sleduyushchego pokoleniya*. Moscow: Izd-vo FGUP CNIIS (in Russian).

*The article was received 01.07.2021 and was accepted after revision 08.09.2021*

**Семко Віктор Володимирович**

доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютеризованих систем управління факультету кібербезпеки, комп'ютерної і програмної інженерії Національного авіаційного університету

**Адреса робоча:** 03058, Україна, м. Київ-58, Проспект Гузара Любомира, 1

**ORCID ID:** 0000-0001-5157-4264 **e-mail:** [semko\\_viktor@meta.ua](mailto:semko_viktor@meta.ua)

**Семко Олексій Вікторович**

кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу інформаційної безпеки Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

**Адреса робоча:** 02000, Київ, Україна, Чоколівський бульвар, 13

**ORCID ID:** 0000-0001-6473-1329 **e-mail:** [semalek@meta.ua](mailto:semalek@meta.ua)

UDC УДК 627.51 : 001.8

**Oleksiy V. Petrochenko**<sup>1</sup>, PhD, Director of the Institute of Innovative Education of Kyiv National University of Construction and Architecture  
ORCID ID: 0000-0003-2184-4811 *e-mail*: a\_petr89@ukr.net

**Vyacheslav I. Petrochenko**<sup>2</sup>, PhD, Leading researcher at the Institute of Water Problems and Land Reclamation  
ORCID ID: 0000-0001-8306-2554 *e-mail*: v\_petr47@ukr.net

<sup>1</sup>Institute of Innovative Education of Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Institute of Water Problems and Land Reclamation, Kyiv, Ukraine

## **ANALYSIS OF TERMINOLOGICAL DEFINITIONS OF NATURAL PHENOMENA ASSOCIATED WITH RISING WATER LEVELS IN WATERCOURSES AND FLOODING**

**Abstract.** *To define natural phenomena associated with an increase in flow rates and water levels in watercourses and flooding of settlements and territories outside the coastline, there are a significant number of terms in the Ukrainian language, some of which are perceived as synonyms. The use of all these terms in information materials and reports of natural phenomena associated with the problem of intensive increase in costs and water levels in watercourses, or the problem of "high water", of course, makes some sense. However, when solving the problem of "high water", which is to develop and implement the concept of protection against the harmful effects of water, researchers and engineers face some difficulties in using a large number of terms to define "high water". This article attempts to establish, among the total number of terms defining natural phenomena associated with the problem of "high water", one dominant term suitable for universal use in solving the problem of "high water". According to the results of logical and terminological analysis, the term "flood" is dominant among many terms of determining natural phenomena related to the problem of "high water", which should be used as a universal when developing and implementing the concept of solving the problem of "high water". The article presents and proposes for consideration by experts and stakeholders a new definition of floods occurring in a channel watercourse (river), as well as a broader definition of floods that can occur in both channel and non-channel watercourses. The article presents and proposes for the consideration of specialists and interested parties a new definition of flood in a channel watercourse (river), and also proposes a broader definition of a flood, both in a channel and off-channel watercourse.*

**Keywords:** *watercourse; spontaneous manifestation; flood; flooding of territories; protection from floods*

---

© O.V. Petrochenko, V.I. Petrochenko, 2021

О.В. Петrenchенко<sup>1</sup>, В.І. Петrenchенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут інноваційної освіти Київського національного університету будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

<sup>2</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН України, м. Київ, Україна

## АНАЛІЗ ТЕРМІНОЛОГІЧНИХ ВИЗНАЧЕНЬ СТИХІЙНИХ ЯВИЩ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ПІДВИЩЕННЯМ РІВНЯ ВОДИ У ВОДОТОКАХ ТА ЗАТОПЛЕННЯМ ТЕРИТОРІЙ

***Анотація.** Для визначення стихійних явищ, пов'язаних із збільшенням витрат і рівнів води у водотоках та затопленням населених пунктів і територій, в українській мові існує значна кількість термінів, деякі з яких сприймаються як синоніми. Використання усіх цих термінів в інформаційних матеріалах та повідомленнях про стихійні явища, пов'язані з проблемою інтенсивного збільшення витрат і рівнів води у водотоках, або з проблемою «високої води», безумовно, має певний сенс. Однак під час вирішення проблеми «високої води», яке полягає в розробці та впровадженні концепції захисту від наслідків «високої води», дослідники та інженери стикаються з певними труднощами використання великої кількості термінів визначення «високої води». В даній статті зроблена спроба встановити серед усієї кількості термінів, що визначають стихійні явища, пов'язані з проблемою «високої води», один домінуючий термін, придатний для універсального використання під час вирішення проблеми «високої води». За результатами логічного та термінологічного аналізу встановлено, що серед багатьох термінів визначення стихійних явищ, пов'язаних з проблемою «високої води», домінуючим є термін «паводок», який доцільно використовувати як універсальний під час розробки та впровадження концепції захисту від шкідливої дії «високої води». В статті наведено та запропоновано на розгляд фахівців та зацікавлених осіб нове визначення паводку у русловому водотоку (річці). Запропоновано нові терміни: «нерушловий водоток» і «нерушловий паводок». Запропоновано узагальнене визначення паводку у русловому та нерушловому водотоку.*

***Ключові слова:** водотік; проблема «високої води»; паводок; затоплення території*

DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.139-148>

### Вступ

Життєдіяльність людини тісно пов'язана з водними ресурсами. Вода є важливим елементом багатьох фізіологічних процесів живих організмів та їх найбільшим структурним компонентом, який становить 75–90% маси організмів. У сфері виробництва і господарської діяльності важко знайти технологічний процес, в якому б не використовувалась вода. Проте вода, що є основним джерелом життя на Землі, за певних обставин створює для людства серйозну загрозу. Серед інших стихійних лих на Землі перше місце за кількістю людських жертв та розміром економічних і екологічних збитків займають гідрологічні лиха, спричинені інтенсивним збільшенням витрат і рівнів води в водотоках та подальшим виходом води за берегову лінію. У таких випадках говорять про паводки, повені, водопілля, поводі, повіддя.

Безумовно, що використання всього переліку вказаних назв стихійних явищ, пов'язаних з проблемою інтенсивного збільшення витрат і рівнів води в водотоках та затопленням територій, або з проблемою «високої води» («high water», англ.), має певний сенс в інформаційних матеріалах та повідомленнях. Однак дослідники та інженери, вирішуючи свою основну задачу, яка полягає у розробці та впровадженні концепції захисту від шкідливої дії води, стикаються з певними труднощами спільного використання навіть двох таких основних термінів, як «паводок» і «повінь».

Паводки та повені часто ототожнюють і використовують їх в дослідженнях як синоніми, сприймаючи паводки і повені як різні назви одного й того ж стихійного явища [1]. Таке ототожнення має певні підстави. Так, під час розробки заходів захисту від шкідливої дії води не можна встановити різницю між заходами протипаводковими і протиповеневими, оскільки ці заходи однакові за їх функціональним призначенням. Не можна також встановити різницю між протипаводковою і протиповеневою спорудою тільки за її назвою, наприклад, водосховищем, яке призначене для тимчасового затримання та акумулювання води, що може запобігти затопленню території.

Зваживши на те, що базовим структурним елементом удосконалення та стандартизації певної галузі є термінологія, а термін – це слово або словосполучення зі спеціальним значенням, що виражає й формує специфічне поняття, яке застосовують у процесі пізнання та засвоєння наукових і фізичних об'єктів, а також відношень між ними, в даній статті зроблена спроба виконати аналіз термінів, що визначають стихійні явища, пов'язані з інтенсивним збільшенням витрат і рівнів води в водотоках, та встановити серед них домінуючий термін, придатний для універсального використання під час вирішення проблеми «високої води».

**Мета дослідження** – виконати аналіз існуючих термінів визначення стихійних явищ інтенсивного збільшення витрат і рівнів води в водотоках, встановити серед них домінуючий термін та запропонувати його для універсального використання під час розробки та впровадження концепції захисту від шкідливої дії води.

**Метод дослідження** – логічний та термінологічний аналіз.

### **Виклад результатів дослідження**

Аналіз термінів, що використовують в різних мовах для визначення стихійних явищ, пов'язаних з «високою водою», показує, що найбільшу кількість таких термінів застосовують в українській мові (табл. 1). Україномовні терміни («повідь» і «повіддя») в багатьох інших мовах не використовують.

Разом з тим тільки в українській і російській мовах існують два різні за визначенням терміни, які в інших мовах не розрізняють. В українській мові – це «паводок» і «повінь», а в російській – це «паводок» і «наводнение». Для встановлення різниці між паводком і повінню проаналізуємо їх визначення в офіційних документах і словниках, а також в інших джерелах.

Таблиця 1 – Терміни, що використовують у різних мовах для визначення стихійних явищ, пов'язаних з «високою водою» («high water»)

Мова	українська	англійська	російська	білоруська	польська
Назва стихійного явища	паводок	flood	паводок	паводка	powódź
	повінь	flood	наводнение	паводка	powódź
	повідь	*	*	*	*
	повіддя	*	*	поведдзя	powódź
	водопілля	floodplain	половодье	разводдзе	teren zalewowy

\*не перекладається

ГОСТ 19179-73 Гідрологія суші. Терміни та визначення [2].

69. **Гідрологічний рік** – річний інтервал, який включає період накопичення і період витрачання вологи в річковому басейні.

70. **Гідрологічний сезон** – частина гідрологічного року, у межах якої режим річки характеризується загальними рисами його формування та проявами, зумовленими сезонними змінами клімату.

71. **Фаза водного режиму річки** – характерний стан водного режиму річки, що повторюється у певні гідрологічні сезони у зв'язку із зміною умов живлення.

72. **Водопілля** – фаза водного режиму річки, щорічно повторювана в даних кліматичних умовах в один і той же сезон, що характеризується найбільшою водністю, високим і тривалим підйомом рівня води, що викликається сніготаненням або спільним таненням снігу і льодовиків.

73. **Паводок** – фаза водного режиму річки, яка може багаторазово повторюватися в різні сезони року, характеризується інтенсивним зазвичай короткочасним збільшенням витрат і рівнів води і викликається дощами або сніготаненням під час відлиг.

77. **Повінь** – затоплення території водою, що є стихійним лихом.

**Зауваження** до визначень термінів, наведених у джерелі [2].

Паводок не є фазою водного режиму річки, оскільки він за п.73 [2] може багаторазово повторюватися в різні сезони року, а отже, в різні гідрологічні сезони. Проте згідно з п.71 [2] фазою водного режиму річки є стан водного режиму річки, що повторюється у певні гідрологічні сезони.

Якщо проаналізувати назви загальноприйнятих в гідрології фаз водного режиму річки: льодохід, весняне водопілля, літній межень, осіннє водопілля, льодостав, зимовий межень, то неважко встановити, що головною інформацією, закладеною в ці назви, є сезон року, в якому спостерігається водний режим річки, а не характерні ознаки цього режиму, чого не можна сказати про паводок.

ДСТУ 3517-97 Гідрологія суші. Терміни та визначення основних понять [3].

#### 6.33 водопілля; повінь

Фаза водного режиму річки в період весняного сніготанення, що характеризується високою водністю.

#### 6.34 паводок

Фаза водного режиму річки, що може багаторазово повторюватися в різні сезони року, характеризується інтенсивним збільшенням витрат і рівнів води внаслідок дощів чи сніготанення під час відлиг.

#### 6.41 повінь

Затоплення території водою, що часто стає стихійним лихом.

**Зауваження** до визначень термінів, наведених у джерелі [3].

Визначення паводку за п.6.34 [3] співпадає з його визначенням за п.73 [2].

Визначення поводі за п.6.41 [3] цілком співпадає з визначенням повені за п.77 [2].

За п.6.33 [3] для водопілля і повені наведено спільне визначення, за яким водопілля і повінь визнано як однакове стихійне явище, що є помилковим, оскільки повінь (затоплення території водою), на відміну від водопілля, може бути у різні сезони року, а отже, повінь не може бути фазою водного режиму річки. Крім того, за п. 6.33 [3] ознаки водопілля є більш обмеженими, порівняно з ознаками водопілля за п.72 [2], оскільки за п. 6.33 [3] враховано тільки період весняного сніготанення. Але відомо, що, крім весняного водопілля, є інші сезонні водопілля – водопілля в сезон осінніх дощів або водопілля в сезон мусонних дощів.

Таким чином, в офіційних документах [2] і [3] паводок помилково визначено як фазу водного режиму річки, а в документі [3] зроблено ще одну помилку – повінь також визначено фазою водного режиму річки. Помилкові визначення паводку і повені в документах [2] і [3] були відображені в багатьох наступних джерелах [4–6]. Так, у гідроекологічному словнику [6] наведено визначення паводку, яке цілком співпадає з його визначенням за п. 6.34 [3]. Повінь наведена за такою редакцією.

**Повінь** – щорічно повторювана фаза водного режиму, яка характеризується найбільшою кількістю води в річці та максимальними рівнями, що часто стає стихійним лихом.

Ми вважаємо, що серед інших літературних джерел найбільш точно визначення паводку і повені наведено у гідрологічному словнику О.І. Чеботарьова [7].

**Паводок** – швидкий, порівняно короткочасний підйом рівня води в будь-якому фіксованому створі річки, що завершується майже настільки ж швидким спадом і, на відміну від водопілля, виникає нерегулярно.

**Повінь** – затоплення водою місцевості в межах річкової долини і населених пунктів, розташованих вище заплави, що щорічно затоплюється.

**Зауваження** до визначень термінів, наведених у джерелі [7].

Паводок не можна порівнювати з водопіллям. Паводок – це «підйом та спад рівня води», а отже, це процес, а не фаза формування водного режиму річки, незалежно від того, тривалий цей процес чи короткочасний. Водопілля – сезон року, в якому відбувається процес формування водного режиму річки, тобто сезон, в якому щорічно відбувається паводок. При цьому повінь у вигляді затоплення території є кульмінаційною стадією паводку.

Таким чином, паводок слід визнати як процес формування водного режиму річки, який характеризується збільшенням витрат і рівнів води в річці, а повінь – як стадію паводку, на якій досягається найвищий рівень води в річці та прилеглих до річки територіях. Це дає підставу вважати термін «паводок» домінуючим терміном визначення стихійних явищ, пов'язаних з «високою водою».

Для руслових водотоків (річок) нами запропоновано таке визначення водопілля, паводку і повені.

**Водопілля** – згідно з визначенням за п.72 [2].

**Паводок** – стихійний динамічний процес формування водного режиму річки, що містить: стадію зростання витрати і рівня води в річці внаслідок сніготанення чи інтенсивних дощів; стадію досягнення найбільших витрат та



рівнів води в річці, що часто супроводжується затопленням населених пунктів та територій в долинах річки; стадію спаду витрати та рівня води в річці, що може супроводжуватись зсувами ґрунту на прилеглих до річки територіях.

**Повінь** – стадія паводку, на якій досягаються найбільші витрати та рівні води в річці, що часто супроводжується затопленням населених пунктів та територій в долинах річки.

**Повідь** – синонім повені.

Таким чином, встановлено, що термін «паводок» є домінуючим серед інших термінів визначення стихійних явищ, пов'язаних з проблемою «високої води». Цей термін використовувався як універсальний в роботах [8, 9], де розглядалися питання захисту від шкідливої дії води та питання інтегрованого управління водними ресурсами.

Дослідження кожного паводку доцільно виконувати за його трьома стадіями. При цьому предметом досліджень є гідрологічні параметри паводку та показники наслідків. Основними гідрологічними параметрами паводку є витрата води та висота її підйому в руслі річки. Наслідки проходження паводків поділяють на втрати, які визначають у фізичних показниках, і збитки, які відповідають втратам, визначеним у грошових одиницях.

Стадії паводку, що стався на річках Прикарпаття у 20-х числах 2020 року, наведено на рис. 1.



Рис. 1 – Стадії та наслідки проходження паводку у червні 2020 року на Прикарпатті:  
*а* – збільшення витрати і рівня води в річці Бистриця-Надвірнянська, м. Івано-Франківськ;  
*б* – затоплення села Довбіці в момент досягнення найбільших витрат та рівнів води в річці Дністер;  
*в* – наслідки руйнування русла річки Прут та дороги біля с. Яремче в період проходження паводку;  
*з* – зсуви берегів річки Рибниця (притока Прута) в с. Смодна після проходження паводку

Наслідками першої стадії паводку «зростання витрати і рівня води в річці» (рис. 1а) можуть бути: руйнування русла річки та прилеглих до русла об'єктів (рис. 1в).

Основним наслідком другої стадії паводку «досягнення найбільших витрат та рівнів води в річці» є затоплення населених пунктів та прилеглих до річки територій (рис. 1б).

Наслідками третьої стадії паводку «спад витрати та рівня води в річці» є зсуви ґрунту та руйнування об'єктів, розташованих на берегах річок (рис. 1г).

Паводки можуть відбуватися не тільки в руслових водотоках (річках), а й в неруслових водотоках, що тимчасово утворюються в басейнах поверхневого водозбору в період інтенсивного надходження до басейну або ділянки басейну води. У такому разі паводок відбувається у вигляді потоку води від вище розташованого джерела надходження води до нижче розташованих територій у різних напрямках ухилів поверхні землі. Кульмінаційною стадією неруслового паводку є повінь.

Якщо джерелом надходження паводкової води є дощові зливи, відбувається паводковий потік, розосереджений по поверхні землі за різними напрямками (рис. 2).



Рис. 2 – Паводки в містах України, викликані сильними зливами літку 2021 року: а – Житомир (3 травня); б – Маріуполь (8 червня); в – Миколаїв (26 червня); г – Одеса (4 липня)

Кульмінаційною стадією такого паводку є затоплення населених пунктів та низинних територій. У зв'язку зі змінами клімату частота та наслідки неруслових паводків в населених пунктах стрімко зростають. Прикладом цьому є масштабні паводки в містах Західної Європи у 2021 році.

Нерусловий паводок може бути спричинений також внаслідок аварійного руйнування дамби водосховища. У такому випадку вода водосховища, рівень якої перевищує гранично допустимий, шляхом перетікання через дамбу або гідростатичного тиску руйнує дамбу. Паводковий потік через тимчасово створене русло (проран) надходить до низинних територій, які стають осередками повені.

Нерусловий паводок може бути спричинений ще й хвилями цунамі. У такому випадку виникає паводковий потік, розосереджений по поверхні землі за різними напрямками. Наслідками паводку є руйнування об'єктів на шляху потоку води та затоплення територій, зазвичай урбанізованих.

З урахуванням можливого проходження паводку як у русловому, так і нерусловому водотоку пропонується узагальнене визначення паводку та повені.

**Паводок** – стихійний динамічний процес формування водного режиму водотоку, що містить: стадію зростання витрати та рівня води у водотоку внаслідок інтенсивного зовнішнього надходження води до водотоку; стадію досягнення найбільших витрат та рівнів води у водотоку, що часто супроводжується затопленням населених пунктів та низинних територій; стадію спаду витрати та рівня води у водотоку, що може супроводжуватись зсувами ґрунту.

**Повінь** – стадія паводку, на якій досягаються найбільші витрати та рівні води у водотоку, що часто супроводжується затопленням населених пунктів та низинних територій.

## **Висновки**

1. Для ефективного вирішення проблеми захисту від наслідків стихійних явищ, пов'язаних зі збільшенням витрат і рівнів води у річці та затопленням населених пунктів і територій, або проблеми «високої води», виникає потреба корегувань загальноприйнятих термінів визначення «високої води».

2. За результатами логічного і термінологічного аналізу встановлено, що паводок та повінь, на відміну від водопілля, не є фазами водного режиму річки. Паводок є стихійним динамічним процесом формування водного режиму річки, а повінь – кульмінаційною фазою цього процесу, тобто паводку.

3. Доведено, що серед інших термінів визначення «високої води» домінуючим терміном є «паводок», який доцільно та необхідно використовувати як універсальний термін під час розробки та впровадження концепції захисту від шкідливої дії «високої води».

4. Запропоновано на розгляд фахівців та зацікавлених осіб нове визначення паводку та повені у русловому водотоку (річці).

5. Відмічено, що в умовах змін клімату стрімко зростають частота та наслідки паводків в населених пунктах, спричинених інтенсивними дощами. Для паводків, які не залежать від водного режиму річок, запропоновано нові терміни: «нерусловий водоток» і «нерусловий паводок».

6. До неруслових паводків запропоновано також відносити паводки внаслідок прориву греблі або дамби водосховища, а також паводки, спричинені хвилями цунамі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Колодницька Р. В. Вплив катастрофічних паводків та повеней на структуру агроландшафтів Карпатського національного природного парку / Р. В. Колодницька // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2015. – Т.2(37). – С. 166–170.
2. ГОСТ 19179-73 Гидрология суши. Термины и определения. Утверждены Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 29 октября 1973 г. N 2394.
3. ДСТУ 3517-97 Гідрологія суши. Терміни та визначення основних понять. : Київ. Держстандарт України. – 1997.
4. Паводок, половодье, наводнение – есть ли разница? URL : <https://fireman.club/statyi-polzovateley/pavodok-polovode-navodnenie-est-li-raznitsa/>. (дата звернення : 15.11.2021).
5. Анахов П. В. Пропозиції щодо уточнення класифікації гідродинамічних аварій / П. В. Анахов. – Київ : Інститут геохімії навколишнього середовища НАН та МНС України. URL: <https://sworld.com.ua/konfer22/595.htm> (дата звернення : 15.11.2021).
6. Петровська М. А. Гідроекологічний словник / М. А. Петровська. Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка. – 2010. – 140 с.
7. Чеботарев А. И. Гидрологический словарь / А. И. Чеботарев. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1978. – 308 с.
8. Петроченко О. В. Науково-методичне забезпечення розробки планів управління ризиками затоплення в річкових басейнах / О. В. Петроченко, В. І. Петроченко // Екологічні науки. – 2020. – №6 – С. 35–44.
9. Петроченко О. В. Методологія інтегрованого управління земельними і водними ресурсами / О. В. Петроченко, В. І. Петроченко // Екологічна безпека та природокористування. – 2021. – №3 вип. 39 – С. 102–120.

*Стаття надійшла до редакції 16.07.2021 і прийнята до друку після рецензування 30.09.2021*

## REFERENCES

1. Kolodnyts'ka, R. V. (2015). Vplyv katastrofichnykh pavodkiv ta povoney na strukturu ahrolandshaftiv Karpat-s'koho natsional'noho pryrodnohoo parku [Influence of catastrophic floods and floods on the structure of agrolandscapes of the Carpathian National Nature Park]. *Hidrolohiya, hidrokhiimiya i hidroekolohiya* [Hydrology, hydrochemistry and hydroecology], 2(37), 166-170 (in Ukrainian).
2. Postanovleniye Gosudarstvennogo komiteta standartov Soveta Ministrov SSSR N 2394 (1973, oktyabr' 29). GOST 19179-73 Gidrologiya sushi. Terminy i opredeleniya [Land hydrology. Terms and Definitions]. Moscow (in Russian).
3. Derzhstandart Ukrayiny (1997). DSTU 3517-97 Hidrolohiya sushi. Terminy ta vyznachennya osnovnykh ponyat' [Hydrology of land. Terms and definitions of basic concepts]. Kyiv (in Ukrainian).
4. Pavodok, polovod'ye, navodneniye – yest' li raznitsa? [Flood, deluge, inundation – is there a difference?] Retrieved 15.11.2021 from: <http://fireman.club/statyi-polzovateley/pavodok-polovode-navodnenie-est-li-raznitsa/> (in Russian).
5. Anakhov, P. V. Propozytsiyi shchodo utochnennya klasyfikatsiyi hidrodinamichnykh avariy [Propositions to clarify the classification of hydrodynamic accidents]. Kyiv: Instytut heokhiimiya navkolyshn'oho seredovyshcha NAN ta MNS Ukrayiny. Retrieved 15.11.2021 from: <http://sworld.com.ua/konfer22/595.htm/> (in Ukrainian).
6. Petrovs'ka, M. A. (2010). Hidroekolohichnyy slovnyk [Hydroecological dictionary]. L'viv: Vydavnychyy tsentr LNU imeni Ivana Franka (in Ukrainian).
7. Chebotarev, A. I. (1978). Gidrologicheskyy slovar' [Hydrological Dictionary]. Leningrad: Gidrometeoizdat (in Russian).

8. Petrochenko, O. V., & Petrochenko V. I. (2020). Naukovo-metodychne zabezpechennya rozrobky planiv upravlinnya ryzykamy zatoplennya v richkovykh baseynakh [Scientific and methodological support for the development of flood risk management plans in river basins]. *Ekologichni nauky*, 6, 35-44 (in Ukrainian).
9. Petrochenko, O. V., & Petrochenko, V. I. (2021). Methodology of integrated land and water resources management. *Environmental Safety and Natural Resources*, 39(3), 102–120 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.3.102-120>

*The article was received 16.07.2021 and was accepted after revision 30.09.2021*

**Петроченко Олексій Вячеславович**

кандидат технічних наук, директор Інституту інноваційної освіти Київського національного університету будівництва і архітектури МОН України

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, вул. Освіти, 31

ORCID ID: 0000-0003-2184-4811 **e-mail:** a\_petr89@ukr.net

**Петроченко Вячеслав Ілліч**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту водних проблем і меліорації НААН

**Адреса робоча:** 03022 Україна, м. Київ, вул. Васильківська, 37

ORCID ID: 0000-0001-8306-2554 **e-mail:** v\_petr47@ukr.net

УДК 621.039.586:614.876

**Volodymyr Vashchenko<sup>1</sup>**, Dr. of Sci., Professor  
*e-mail: nucleoroid@gmail.com*

**Irina Korduba<sup>2</sup>**, PhD, Associate Professor of the Department of Labour and Environment Protection  
ORCID ID 0000-000105135-8465 *e-mail: uaror-korduba@ukr.net*

**Olena Zhukova<sup>2</sup>**, PhD, Associate Professor of the of Labour and Environment Protection  
ORCID ID 0000-0003-0662-9996 *e-mail: elenazykova21@gmail.com*

<sup>1</sup> National Aviation University, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

## **TECHNOLOGICAL AND OPERATING FEATURES OF THE AR-1000 REACTORS GENERATION III<sup>+</sup> AND SMALL MODULAR REACTORS MR-160**

**Abstract.** *Technological and environmental analysis of the main characteristics of technological, operational and environmental safety in the context of progress in the main areas of development of reactor units such as VVER, MR-160 and AR-1000 for power units currently under development, design and construction is one of the most pressing issues development of world nuclear energy. This urgency in particular is due to the fact that on the basis of these technologies further development of Ukraine's nuclear energy is planned. The tasks of ensuring operational and radioecological safety for new generation power reactors are reduced to obtaining the lowest possible probability of events related to a possible accident, as well as the lowest possible probability of radiation consequences in compliance with all requirements of national and international regulations and recommendations adopted by a particular state and its civil society.*

**Keywords:** *nuclear safety; environmental safety; nuclear reactor; small modular reactor; nuclear power plant*

**В.М. Ващенко<sup>1</sup>, І.Б. Кордуба<sup>2</sup>, О.Г. Жукова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

<sup>2</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

## **ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ РЕАКТОРІВ АР-1000 ПОКОЛІННЯ ІІІ+ ТА МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ МР-160**

**Анотація.** *Технологічний та екологічний аналіз головних характеристик технологічної, експлуатаційної і екологічної безпеки в контексті прогресивних досягнень на головних напрямках розробки реакторних установок типу ВВЕР, МР-160 та АР-1000 для енергоблоків, що на сьогодні знаходяться на етапах розробки, проектування та будівництва, є одним із найактуальніших питань розвитку світової ядерної енергетики. Така актуальність, зокрема, зумовлена тим, що на базі даних технологій планується подальший розвиток ядерної енергетики України. Задачі забезпечення експлуатаційної та радіоекологічної безпеки для енергетичних*

© В.М. Ващенко, І.Б. Кордуба, О.Г. Жукова, 2021

*реакторів нових поколінь зводяться до отримання максимально низької розрахункової ймовірності подій, пов'язаних з можливою аварією, а також максимально низької ймовірності радіаційних наслідків з дотриманням усіх вимог національних та міжнародних нормативних та рекомендаційних документів, які приймаються конкретною державою та її громадянським суспільством.*

**Ключові слова:** ядерна безпека; екологічна безпека; ядерний реактор; малий модульний реактор; атомна електростанція

DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.149-156>

## Вступ

На сьогодні існує лінійка модернізованих традиційних ядерних енергетичних технологій та відповідних проектів, які отримали назву Покоління типу III+. Ці проекти мають підвищений рівень надійності та безпеки і тому можуть розглядатися для їх застосування в ядерній енергетиці України.

Американська технологія AP-1000 компанії Вестінгауз є єдиною з реакторних технологій Покоління III+, яка ліцензована комісією з ядерного регулювання в США. В офіційних джерелах зазначається, що впровадження в Україні апробованої реакторної установки AP-1000 Покоління III+ на базі провідного світового ядерного реактора потужністю до 1100 МВт із системами пасивної безпеки та унікальними особливостями в частині інноваційності і стандартизації дасть змогу скоротити терміни і вартість будівництва, забезпечити найвищий рівень технологічної та екологічної безпеки АЕС і стати новим важливим елементом майбутньої безвуглецевої енергетики.

Чотири блоки AP-1000, що вже побудовані і працюють у Китаї, показали рекордні експлуатаційні властивості, а саме: скорочені терміни планово-попереджувальних ремонтів та процесів перезавантаження ядерного палива, покращення коефіцієнта встановленої потужності. Ще чотири таких реактори будуються в США. Тому для України є реальна практична можливість вивчити та використати досвід будівництва реакторів AP-1000, досвід їх введення в експлуатацію та досвід їх експлуатації.

## Основна частина

Детальний технологічний аналіз ядерних енергетичних реакторних технологій типу ВВЕР, які знаходяться на сьогодні в експлуатації і складають понад 80% реакторного парку планети, призводить до наступних висновків щодо ядерної і відповідно екологічної безпеки:

1. У всіх діючих реакторів є серйозні недоліки в галузі ядерної та екологічної безпеки, які не можна усунути шляхом модернізації їх захисних та протиаварійних систем.

2. Велика аварія на найпоширенішому в світі легководному ядерному реакторі типу ВВЕР може призвести до радіоактивного викиду, еквівалентного декільком Чорнобилям і Фукусімам.

3. Уроки усіх без виключення ядерних катастроф на ядерних об'єктах свідчать про небезпечність людського фактору й відсутності необхідного рівня ядерної культури.

4. Робота ядерних реакторів в подовженому режимі експлуатації призводить до додаткового старіння їх важливих елементів і, як наслідок, може

збільшити ймовірність проектних і запроектних аварій. При цьому механізми старіння реакторних матеріалів в умовах високих радіаційних, термічних та баричних навантажень вивчені недостатньо і їх важко прогнозувати. Однак багато країн планують продовжити встановлені проектом терміни експлуатації своїх ядерних енергетичних реакторів.

5. Модернізація діючих у світі ядерних енергетичних реакторів здійснюється в напрямку збільшення тиску в реакторі, підвищення робочої температури і збільшення відсотка вигорання палива. Наслідком такої модернізації є прискорене старіння металу і подальше зниження надійності і безпеки. Але стандарти для ядерних підприємств не завжди враховують такі нові умови роботи.

6. Існує небезпека зовнішніх впливів екстремальних природних явищ – землетрусів, повеней, смерчів, змін глобального клімату та геокосмічних явищ.

Процеси виробництва низькозбагаченого ядерного палива та переробки ядерного палива, опроміненого в реакторах за час паливної кампанії, також пов'язані з масштабними екологічними загрозами і ризиками. Розроблюване міжнародними зусиллями четверте покоління енергетичних ядерних реакторів G-4 в певній мірі продовжує цю тенденцію. Виробництво електроенергії на сучасних АЕС, а в перспективі і на АЕС з реакторами четвертого покоління G-4, також не дає абсолютних гарантій щодо можливого неконтрольованого поширення ядерних матеріалів.

На відміну від абсолютно переважної кількості світового парку ядерних енергетичних реакторів типу ВВЕР, американська технологія AP-1000 є реакторною технологією Покоління III+ і має наступні нові особливості в частині її безпеки:

1. Повністю комп'ютеризований процес проектування і планування будівництва з координацією різних видів діяльності при спорудженні енергоблоків AP-1000.

2. Використання модульних конструкцій при спорудженні АЕС. Конструктивно кожний блок AP-1000 складається з 50 великих і 250 малих модулів. Стандартні малі модулі розміром 3,7x3,7x24,4 м і вагою 80 т можна перевозити залізницею або транспортувати їх українським літаком «Мрія», який здатний доставити в Україну практично всі модулі AP-1000.

3. Використання виготовлених у заводських умовах відносно малогабаритних модулів при спорудженні АЕС дозволяє:

- зменшити об'єми трудовитрат на будівельно-промислому майданчику АЕС;

- підвищити якість та контроль якості при виготовленні модулів в заводських умовах;

- реалізувати паралельне проведення багатьох робіт, які традиційно виконуються послідовно, і таким чином скоротити терміни спорудження АЕС.

4. Впровадження реакторів МР-160 т в українській ядерній енергетиці має забезпечити:

- підвищення економічності виробництва електроенергії за рахунок зниження капітальних і експлуатаційних витрат;

- скорочення термінів будівництва;

- можливість більш швидкого повернення інвестицій, в порівнянні зі створенням енергоблоків великої потужності, і гарантію високої надійності і безпеки;



– можливість наближення джерела енергії до споживачів, включаючи енергозабезпечення віддалених і специфічних територій зі складним географічним розташуванням та, що дуже важливо для української енергетики, можливість роботи енергоблоків в маневреному режимі видачі електричної енергії.

Задачі забезпечення експлуатаційної та радіоекологічної безпеки для нових поколінь ММР, в тому числі для МР-160, зводяться до отримання максимально низької розрахункової ймовірності подій, пов'язаних з аварією, а також максимально низької ймовірності радіаційних наслідків з дотриманням усіх вимог національних та міжнародних нормативних та рекомендаційних документів, які приймаються конкретною державою та її громадянським суспільством.

Процеси створення та впровадження нових технологій ММР та відповідних їм проектів, в умовах конкретної країни, пов'язані з нагальною необхідністю вирішення багатьох технічних та технологічних питань, проведення різних аналізів та обґрунтувань, у першу чергу питань безпеки та вирішення питань ліцензування з урахуванням наступних положень:

1. Малі модульні реактори не є принципово новими в реакторобудуванні. Але незважаючи на це, модульна концепція сучасних ММР все ще знаходиться в процесі свого розвитку і має певні серйозні суперечливості, а створення нових сучасних ММР може дати нові знання, отримані в процесах проектування, випробувань та їх експлуатації.

2. Модульний принцип побудови ММР та їх відносна компактність дає можливість застосувати принцип "економії кратних рішень", що дозволяє застосовувати поступове нарощування потужності АЕС і уникнути великих фінансових ризиків.

3. Розробники та виробники стверджують, що модульні конструкції простіші та гнучкіші, ніж традиційні конструкції, але модулювання енергоємних електромеханічних систем є досить важкою задачею. Проте перевантажена, надмірна модулізація конструкції ЯЕРУ та АЕС в цілому може призвести до створення менш ефективних енергетичних ядерних систем з розподіленою функціональністю модулів і навіть до перешкоджання інноваціям. Тому декларування гнучкості ММР дискутується та оскаржується.

4. Вважається, що модульна конструкція невеликих реакторів покращить їх якість та ефективність, а також знизить вартість. Проте, опонентська думка звертає увагу на відсутність фактичної детальної інформації стосовно експлуатації, обслуговування та виведення з експлуатації ММР з відповідним обґрунтуванням адекватного аналізу витрат та вигод.

5. Розвиток модульної ядерної енергетики вимагає подальших досліджень для визначення, розробки, створення та інтеграції ефективних і надійних модульних структур і міжмодульних зв'язків з використанням інженерії та на основі нових знань. Тому, навіть якщо модульність проектування та побудови ММР не досягне декларованих цілей, масштабність модульності для певних малих потужностей все одно може виправдати ефективність, економічність, «економію кратності» і головне – її задекларовану високу експлуатаційну та екологічну безпеку.

6. Нові конструкції ММР мають багато активних і пасивних елементів безпеки, розроблених для реакторів Покоління-IV. Однак можливі непередбачені наслідки застосування таких елементів і засобів безпеки ще необхідно ретельно оцінити.

7. Щоб ММР могли споруджуватися поблизу заселених територій, вони повинні проектуватися так, щоб їхні зони виключення та планування надзвичайних ситуацій були значно меншими за відповідні зони навколо великих підприємств.

8. Відомі конструкції ММР працюють на низькозбагаченому урані (НЗУ) з різними рівнями збагачення та вмісту плутонію. Це може стати перешкодою для юрисдикцій, які прагнуть мати енергосистеми, незалежні від імпортного забезпечення ядерним паливом НЗУ, і для яких є більш привабливим природний уран.

9. ММР мають багатопрофільне призначення – від виробництва електроенергії до утилізації ядерних відходів. Вони можуть зіграти помітну роль у декарбонізації вугільної та нафтової промисловості шляхом виробництва пари, необхідної для інтенсифікації процесів видобутку та переробки нафти, уникаючи спалювання великих кількостей викопного палива.

10. Серед переваг малих реакторів називається можливість їх спорудження у віддалених географічних районах.

11. Реактори ММР, призначені для довготривалих кампаній, можуть мати на початкових стадіях кампанії більші запаси надлишкової реактивності, яка компенсується за рахунок вибраних технічних проектних рішень, наприклад за рахунок використання вигоряючих поглиначів та/або органів регулювання.

12. Небезпеку для режимів нерозповсюдження деякі автори в даному випадку вбачають в тому, що в таких активних зонах можна невидимим чином організувати опромінення зразків для подальшого використання у незадекларованій ядерній діяльності – великий запас надлишкової реактивності дозволить ядерній установці витримати розміщення в зоні додаткових поглиначів у вигляді мішеней. Мова тут може йти про несанкціоноване напрацювання плутонію з уранових мішеней для послідуєчих лабораторних експериментів.

13. В деяких проектах ММР передбачається використання непрозорих теплоносіїв – рідких солей або свинець-вісмута. Для таких систем традиційні методи інспектування, що включають візуальний огляд активної зони та басейну витримки ОЯП, стають “сліпими”. Тому МАГАТЕ повинно мати доступ до систем “бачення”, що розроблюються для ММР з непрозорими неводними охолоджувачами.

14. Реактори ММР мають маловидимий тепловий слід, що значно ускладнює застосування аерокосмічних та інших дистанційних методів та засобів їх контролю.

15. Перспективні ММР, побудовані за відмінними від LWR технологіями, є новинками для операторів і регуляторів, та для інспекторів МАГАТЕ.

16. Важливою проблемою є створення сховищ ОЯП для тих ММР, де такі сховища передбачені проектом.

## **Висновки**

1. Реактори AP-1000 Покоління III+ компанії «Вестінгауз» мають підвищений рівень надійності та безпеки, в порівнянні з реакторами типу ВВЕР другого покоління, і можуть розглядатися для розвитку ядерної енергетики України.

2. В Україні розглядається можливість будівництва ММР типу МР-160 для заміни вуглецевих теплових електростанцій і для збільшення маневрових потужностей в об'єднаній енергосистемі України. Український вибір малих модульних реакторів пояснюється зокрема тим, що даний проект є єдиним в своєму класі реакторів, що отримав ліцензію Комісії з ядерного регулювання США в липні 2021 року.

3. Що стосується екологічної безпеки реакторів АР-1000 та МР-160, то декларовані їх виробниками переваги повинні досліджуватися і підтверджуватися для кожного конкретного проекту, що планується до впровадження в Україні.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Small Modular Reactors: Regulatory Strategy, Approaches and Challenges. Discussion paper DIS-16-04 (May 2016). [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/pdfs/Discussion-Papers/16-04/Discussion-paper-DIS-16-04-eng.pdf>
2. IAEA Safety Glossary Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection (2018 Edition), Tech. Rep. STI/PUB/1830 (Jun. 2018). [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.iaea.org/publications/11098/iaea-safety-glossary-2018-edition>.
3. Дибач А.М., Плачков Г.І. О лицензировании малых модульных реакторов. – Ядерна та радіаційна безпека, 2019, С. 3–9.
4. Locatelli G., Bingham C., Mancini M. Small modular reactors: a comprehensive overview of their economics and strategic aspects. – Prog. Nucl. Energy, 73 (2014), pp. 75–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.01.010>.
5. Francis P.L., Zuckerstein K., Bradley K., Durbin C.R., Egger B., Heuwinkel K., Kelly J., Madar C.J. Best practices: high levels of knowledge at key points differentiate commercial shipbuilding from navy shipbuilding [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.gao.gov/products/GAO-09-322>
6. Miller T., Pedersen P. Defining modules, modularity and modularization: evolution of the concept in a historical perspective [Electronic resource]. – Access mode: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.454.868&rep=rep1&type=pdf>
7. Whitney D.E. Physical limits to modularity [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/102731?show=full>
8. Hölttä-Otto K. Modular Product Platform Design. – Ph.D. thesis, Helsinki University of Technology, Finland [Electronic resource]. – Access mode: <http://lib.tkk.fi/Diss/2005/isbn9512277670/>
9. Lau A.K.W., Yam R.C.M., Tang E. The impact of product modularity on new product performance: mediation by product innovativeness. – J. Prod. Innovat. Manag., 28 (2) (2011), pp. 270–284. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2011.00796.x> arXiv
10. Schank J.F., Savitz S., Munson K., Perkinson B., McGee J., Sollinger J.M. Designing adaptable ships: modularity and flexibility in future ship designs [Electronic resource]. – Access mode: [https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research\\_reports/RR600/RR696/RAND\\_RR696.pdf](https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR600/RR696/RAND_RR696.pdf)
11. Baldea M., Edgar T.F., Stanley B.L., Kiss A.A. Modular manufacturing processes: status, challenges, and opportunities. AIChE J., 63 (10) (2017), pp. 4262–4272, DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.15872>
12. Westinghouse Electric Corporation. Advanced LWR program for small modularized plants, project 1585-10 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.osti.gov/servlets/purl/6806380>
13. Mignacca B., Locatelli G. Economics and finance of small modular reactors: a systematic review and research agenda. Renew. Sustain. Energy Rev., 118 (2020) [Electronic resource]. –

- Access mode: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119307270>, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109519>
14. Andrianov A.A., Kuptsov I.S., Osipova T.A., Andrianova O.N. Comparative analysis of the investment attractiveness of nuclear power plant concepts based on small and medium sized reactor modules and a large nuclear reactor, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernay a Energetika*, 2018 (4) (2018), pp. 89–101, DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.4.08>
  15. Upadhyay A.K., Jain K. Modularity in nuclear power plants: a review. *J. Eng. Des. Technol.*, 14 (3) (2016), pp. 526–542.
  16. Hohmann L., Kössl K., Kockmann N., Schembecker G., Bramsiepe C. Modules in process industry: a life cycle definition, – *Chem. Eng. Process: Processes*, 111 (1) (2017), pp. 115–126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.09.017> CEP 6873
  17. Cooper S., Fan I., Li G. *Achieving Competitive Advantage through Knowledge-Based Engineering – A Best Practice Guide*. Cranfield University, Bedford, UK (1999) prepared for the Dept. of Trade and Industry by Dept. of Enterprise Integration, Cranfield University
  18. Chu S. America’s new nuclear option – small modular reactors will expand the ways we use atomic power. *Wall St. J.* (2010) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.energy.gov/articles/secretary-chu-op-ed-small-modular-reactors-wall-street-journal>
  19. Campbell R. Small Modular Nuclear Reactors Would Be Beneficial for South Africa, Says Industry Body, *Creamer Media’s Engineering News* (May 2020) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.engineeringnews.co.za/article/small-modular-nuclear-reactors-would-be-beneficial-for-south-africa-says-industry-body-2020-05-18>

*Стаття надійшла до редакції 01.07.2021 і прийнята до друку після рецензування 08.09.2021*

## REFERENCES

1. Small Modular Reactors: Regulatory Strategy, Approaches and Challenges. Discussion paper DIS-16-04 (May 2016). Retrieved from: <http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/pdfs/Discussion-Papers/16-04/Discussion-paper-DIS-16-04-eng.pdf>
2. IAEA Safety Glossary Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection (2018 Edition), Tech. Rep. STI/PUB/1830 (Jun. 2018). Retrieved from: <https://www.iaea.org/publications/11098/iaea-safety-glossary-2018-edition>.
3. Dybach, A.M., Plachkov, H.I. (2019). О ліцензуванні малих модул'них реакторів. *Yaderna ta radiatsiyna bezpeka*, 3-9.
4. Locatelli, G., Bingham, C., Mancini, M. (2014). Small modular reactors: a comprehensive overview of their economics and strategic aspects. *Prog. Nucl. Energy*, 73, 75-85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.01.010>.
5. Francis, P.L., Zuckerstein, K., Bradley, K., Durbin, C.R., Egger, B., Heuwinkel, K., Kelly, J., Madar, C.J. Best practices: high levels of knowledge at key points differentiate commercial shipbuilding from navy shipbuilding. Retrieved from: <https://www.gao.gov/products/GAO-09-322>
6. Miller, T., Pedersen, P. Defining modules, modularity and modularization: evolution of the concept in a historical perspective. Retrieved from: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.454.868&rep=rep1&type=pdf>
7. Whitney, D.E. Physical limits to modularity. Retrieved from: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/102731?show=full>
8. Hölttä-Otto, K. (n.d.). *Modular Product Platform Design* (Doctoral dissertation, Helsinki University of Technology) [Abstract]. Retrieved from <http://lib.tkk.fi/Diss/2005/isbn9512277670/>

9. Lau, A.K.W., Yam, R.C.M., Tang, E. (2011). The impact of product modularity on new product performance: mediation by product innovativeness. *J. Prod. Innovat. Manag.*, 28(2), 270-284. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2011.00796.x> arXiv
10. Schank, J.F., Savitz, S., Munson, K., Perkinson, B., McGee, J., Sollinger, J.M. Designing adaptable ships: modularity and flexibility in future ship designs. Retrieved from: [https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research\\_reports/RR600/RR696/RAND\\_RR696.pdf](https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR600/RR696/RAND_RR696.pdf)
11. Baldea, M., Edgar, T.F., Stanley, B.L., Kiss, A.A. (2017). Modular manufacturing processes: status, challenges, and opportunities. *AIChE J.*, 63(10), 4262-4272, DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.15872>
12. Westinghouse Electric Corporation. Advanced LWR program for small modularized plants, project 1585-10. Retrieved from: <https://www.osti.gov/servlets/purl/6806380>
13. Mignacca, B., Locatelli, G. (2020). Economics and finance of small modular reactors: a systematic review and research agenda. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 118. Retrieved from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119307270>  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109519>
14. Andrianov, A.A., Kuptsov, I.S., Osipova, T.A., Andrianova, O.N. (2018). Comparative analysis of the investment attractiveness of nuclear power plant concepts based on small and medium sized reactor modules and a large nuclear reactor. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy, Yadernaya Energetika*, 2018 (4), 89-101. <https://doi.org/10.26583/npe.2018.4.08>
15. Upadhyay, A.K., Jain, K. (2016). Modularity in nuclear power plants: a review. *J. Eng. Des. Technol.*, 14(3), 526-542.
16. Hohmann, L., Kössl, K., Kockmann, N., Schembecker, G., Bramsiepe, C. (2017). Modules in process industry: a life cycle definition. *Chem. Eng. Process: Processes*, 111(1), 115-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.09.017> CEP 6873
17. Cooper, S., Fan, I., Li, G. (1999). Achieving Competitive Advantage through Knowledge-Based Engineering – A Best Practice Guide. Cranfield University, Bedford, UK prepared for the Dept. of Trade and Industry by Dept. of Enterprise Integration, Cranfield University.
18. Chu, S. (2010). America's new nuclear option – small modular reactors will expand the ways we use atomic power. *Wall St. J.* Retrieved from: <https://www.energy.gov/articles/secretary-chu-op-ed-small-modular-reactors-wall-street-journal>
19. Campbell, R. (18.05.2020). Small Modular Nuclear Reactors Would Be Beneficial for South Africa, Says Industry Body. *Creamer Media's Engineering News*. Retrieved from: <https://www.engineeringnews.co.za/article/small-modular-nuclear-reactors-would-be-beneficial-for-south-africa-says-industry-body-2020-05-18>

*The article was received 01.07.2021 and was accepted after revision 08.09.2021*

#### **Ващенко Володимир Миколайович**

доктор фізико-математичних наук, професор Національного авіаційного університету  
**Адреса робоча:** 03058, Україна, м. Київ, пр-т Любомира Гузара, 1  
**e-mail:** nucleoroid@gmail.com

#### **Кордуба Ірина Богданівна**

кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва і архітектури  
**Адреса робоча:** 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітрофлотський, 31  
ORCID ID 0000-000105135-8465 **e-mail:** uaror-korduba@ukr.net

#### **Жукова Олена Григорівна**

кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва і архітектури  
**Адреса робоча:** 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітрофлотський, 31  
ORCID ID 0000-0003-0662-9996 **e-mail:** elenazykova21@gmail.com

© Авторські і суміжні права належать авторам окремих публікацій, Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київському національному університету будівництва і архітектури.

Copying © authors of publications, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv National University of Construction and Architecture. All rights reserved.

## ДО УВАГИ АВТОРІВ ЗБІРНИКА

Зміст матеріалів, що направляються до редакції, повинен відповідати профілю та науково-технічному рівню збірника.

Кожна наукова стаття повинна мати вступ, розділи основної частини та висновки, а також анотацію і ключові слова (не менше п'яти) двома мовами (українською та англійською).

Підготовка статті здійснюється в текстовому редакторі MS WORD for WINDOWS, з використанням шрифту Times New Roman, Суг, кегль 11, одинарний інтервал, полями 2,0 см з кожного боку, заданим розміром сторінок 17x26 см.

Усі формули мають бути набрані в редакторі MathType.

Ілюстрації повинні обов'язково нумеруватися, мати книжкову орієнтацію і не можуть перевищувати за розміром задану сторінку (параметри сторінки 17x26 см з полями 2,0 см). Перелік літературних джерел перекладається англійською мовою (або транслітерується в романському алфавіті) і подається відповідно до міжнародного стандарту оформлення наукових публікацій **APA (American Psychological Association) style** загальним списком у кінці статті за чергою посилань у тексті.

Наприкінці статті наводиться коротка довідка про авторів, де вказуються прізвище, повне ім'я та по батькові авторів, науковий ступінь, вчене звання, посада, назва підрозділу (кафедри) та організації, особисті дані кожного з авторів (адреса, місто, країна, контактний телефон, e-mail), ORCID ID.

Обов'язково слід надати електронну версію статті в редакторі Microsoft Word.

Усі представлені в редакцію рукописи проходять ретельне багатоланкове рецензування відповідними фахівцями за профілем статті. Якщо сумарна оцінка рецензентів менша за встановлений поріг, рукописи відхиляються.

Зміст статті та якість написання або перекладу (українською або англійською мовами) переглядаються коректорами збірника, проте відповідальність за зміст та якість статті несуть автори матеріалу. До статті можуть бути внесені зміни редакційного характеру без згоди автора.

Розділ збірника, до якого буде віднесена стаття, визначається редакцією, узгоджується – головним редактором або його заступником. Остаточний висновок щодо публікації матеріалів схвалює редакційна колегія збірника.

Електронна версія збірника, правила оформлення та вимоги до статей містяться в Інтернеті на сайті <http://www.es-journal.in.ua>, який систематично оновлюється.

Збірник наукових праць також представлений на сайті Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, на сайті Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України <http://itgip.org/> у розділі «Видавнича діяльність» та на сайті бібліотеки Київського національного університету будівництва і архітектури <http://library.knuba.edu.ua/node/883>.

*Редактор – В.П. Берчун*

---

Надруковано в ТОВ «Видавництво «Юстон»  
01034, м. Київ, вул. О. Гончара, 36а.  
Тел.: (044) 360-22-66  
[www.yuston.com.ua](http://www.yuston.com.ua)

**Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру  
видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції  
серія дк № 497 від 09.09.2015 р.**

---

Підписано і здано до друку 24.12.2021. Формат 70x108/16. Папір офсетний.  
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 13.83  
Обл.-вид. арк. 15.9  
Замовлення № \_\_\_\_\_

---

КИЇВ 2021