

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 49

2024

**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 1 (49), січень – березень 2024 р.

Заснований у 2008 р.
Виходить 4 рази на рік

Academic journal

Issue 1 (49), January – March 2024

Founded in 2008
The journal is published 4 times a year

КИЇВ 2024

KYIV 2024

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР:**О.М. ТРОФИМЧУК**, д-р техн. наук,
проф., чл.-кор. НАНУ**ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА:****О.С. ВОЛОШКІНА**, д-р техн. наук, проф.**Н. КАСАГЛІ**, професор, Італія**Н. МАРГВЕЛАШВІЛІ**, PhD, Австралія**Ю.І. КАЛЮХ**, д-р техн. наук, проф.**ВИКОНАВЧИЙ РЕДАКТОР:****РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ****В.О. ВАСЯНИН**, д-р техн. наук**О.А. ВЛАДИМИРСЬКИЙ**, д-р техн. наук**О.М. ГУНЧЕНКО**, канд. техн. наук, проф.**С.О. ДОВГИЙ**, д-р фіз.-мат. наук, проф.,
академік НАНУ**В.Б. ЄГОРОВ**, д-р техн. наук**С.В. ЗАЙЦЕВ**, д-р техн. наук, проф.**О.В. КОПІЙКА**, д-р техн. наук, проф.**Г.М. КОЧЕТОВ**, д-р техн. наук, проф.**Т.І. КРИВОМАЗ**, д-р техн. наук, проф.**О.Є. КРУЖИЛКО**, д-р техн. наук**О.Г. ЛЕБІДЬ**, д-р техн. наук**М.Л. МИРОНЦОВ**, д-р техн. наук**В.О. МІЛЕЙКОВСЬКИЙ**, д-р техн. наук, проф.**Т.О. НЕГРІЙ**, канд. техн. наук**О.В. НЕСТЕРЕНКО**, д-р техн. наук**Д.В. СТЕФАНИШИН**, д-р техн. наук**С.В. СУКАЧ**, д-р техн. наук, проф.**О.М. ТЕРЕНТЬЄВ**, д-р техн. наук**О.М. ТИХЕНКО**, д-р техн. наук, проф.**Т.М. ТКАЧЕНКО**, д-р техн. наук**В.М. ТРИСНЮК**, д-р техн. наук**В.О. УСТИМЕНКО**, д-р фіз.-мат. наук, проф.**В.Ф. ФРОЛОВ**, д-р техн. наук, проф.**Д.І. ЧЕРНІЙ**, д-р техн. наук**С.Й. ШАМАНСЬКИЙ**, д-р техн. наук**Є.О. ЯКОВЛЄВ**, д-р техн. наук**МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА****М.Й. ВАЛЕРІ**, проф., Польща**М. ЖЕЛЕЗНЯК**, д-р техн. наук, професор,
Фукусіма, Японія**Д. МІНТЕР**, проф., Великобританія**А. МІШО**, дослідник, Франція**М.Г. МУСТАФАЄВ**, д-р с.-г. наук, Азербайджан**Я. ПЕКУТІН**, проф., Польща**ПІНГ ЛУ**, проф., Китай

Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (протокол № 3 від 14.03.2024)

Збірник наукових праць включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія "Б"), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук та доктора філософії за напрямом "технічні науки" за спеціальностями 101, 183 (Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 № 886), 263 (Наказ Міністерства освіти і науки України від 15.11.2022 № 1026), 122 (Наказ Міністерства освіти і науки України від 20.12.2023 № 1543)

ОСНОВНІ ТЕМАТИЧНІ РОЗДІЛИ ЗБІРНИКА

- Екологічна безпека та основи природокористування
- Цивільна безпека
- Інформаційні технології та математичне моделювання
- 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
Електронна версія збірника в Інтернеті
<http://www.es-journal.in.ua>

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 14146-3117 Р від 27.05.2008 р.
Ідентифікатор R30-2590 в реєстрі суб'єктів
в сфері друкованих медіа (Рішення № 223,
Протокол № 4 від 01.02.2024 р. Національної
ради України з питань телебачення і
радіомовлення).



Creative Commons «Attribution» 4.0 WorldWide

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Шаповал С.П., Мисак С.Й., Кузнецова М.Я. Імплементація європейських тенденцій щодо зменшення забруднюючих речовин повітря в Україні.....	5
Савченко О.О., Юркевич Ю.С., Возняк О.Т. Оцінка можливості впровадження низькотемпературних систем централізованого теплопостачання в Україні.....	17
Кравченко М.В., Ткаченко Т.М. Розрахунок еколого-економічного ефекту від збирання дощової води «зеленими» покрівлями.....	34
Святогорів І. Посилення теплового стресу для населення урбанізованих територій на фоні глобальних кліматичних змін.....	49
Голякова І.В., Петренко В.О., Петренко А.О. Енергоефективність систем життєзабезпечення будівель в «зеленому будівництві».....	60

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

Цопа В.А., Кружилко О.Є., Чеберячко С.І., Дерюгін О.В., Негрій Т.О. Розробка алгоритму оцінювання комплексного показника ергономічності ручного інструменту.....	68
---	----

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Бушусь С., Івко А., Тихонович Ю. Синкретичне управління проектами в епоху вибуху штучного інтелекту.....	85
Васянін В.О., Трофимчук О.М., Ушакова Л.П. Дослідження задачі оптимізації структури ієрархічної комунікаційної мережі при зміні її параметрів.....	99
Нестеренко О.В., Поліщук В.Б., Жарінов С.С. Застосування інтегративної інформаційної технології в процесах оцінювання наукових установ.....	126
Триснюк В.М., Дзюба В.А., Тимчук В.Ю. Інформаційно-технічне моделювання ліквідації наслідків військових дій та техногенних катастроф на території України.....	143
Нагорний Є.І. Інформаційні технології при побудові поля радіаційного забруднення місцевості і прогнозуванні.....	155
Маршалл Д.І. Підходи до розробки систем очищення річкової течії від механічних засмічень.....	161
ДО ВІДОМА АВТОРІВ.....	169

CONTENTS

ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

Shapoval S., Mysak S., Kuznetsova M. Implementation of european trends regarding the reduction of air pollutants in Ukraine.....	5
Savchenko O., Yurkevych Yu., Voznyak O. Possibility assessment of the low-temperature district heating systems implementation in Ukraine.....	17
Kravchenko M., Tkachenko T. Calculation of the ecological and economic effect of collecting rainwater with «green» roofs.....	34
Sviatohorov I. Increased heat stress for the population of urbanized areas against the background of global climate change.....	49
Holiakova I., Petrenko V., Petrenko A. Energy efficiency of life support systems of buildings in «green construction».....	60

CIVIL SAFETY

Tsopa V., Kruzhilko O., Cheberiachko S., Deryugin O., Nehrii T. Development of an algorithm for evaluating the comprehensive ergonomic indicator of hand tools.....	68
--	----

INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

Bushuev S., Ivko A., Tikhonovych Yu. Syncretic project management in the era of artificial intelligence explosion.....	85
Vasyanin V., Trofymchuk O., Ushakova L. Research of the optimization problem of structure hierarchical communication network with changing its parameters.....	99
Nesterenko O., Polischuk V., Zharinov S. Application of integrative information technology in the evaluation processes of research institutions...	126
Trysnyuk V., Dziuba V., Tymchuk V. Information-technical simulation of the elimination of the consequences of military actions and man-made disasters in the territory of Ukraine.....	143
Nagornyi E. Information technologies in the construction of the field of radiation pollution of the locality and forecasting.....	155
Marshall D. Approaches to the development of river course cleaning systems from mechanical clocks.....	161
INFORMATION FOR AUTHORS	169

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

УДК 502

Stepan Shapoval, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Institute of Civil Engineering and Engineering Systems
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4985-0930> **e-mail:** stepan.p.shapoval@lpnu.ua

Stepan Mysak, PhD in engineering, senior lecturer at a higher education institution
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2064-7015> **e-mail:** stepan.y.mysak@lpnu.ua

Marta Kuznetsova, PhD in engineering, Associate Professor, Deputy Director for Research and Teaching at the Institute of Energy and Control Systems
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0492-2243> **e-mail:** marta.y.kuznetsova@lpnu.ua

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

IMPLEMENTATION OF EUROPEAN TRENDS REGARDING THE REDUCTION OF AIR POLLUTANTS IN UKRAINE

Abstract. *The paper analyses European trends in reducing emissions of harmful substances and carbon dioxide. Today, the problem of increasing CO₂ is an acute one, and thus the task of decarbonising the planet is an important task for the global community. Along with this, the negative impact of other pollutants, such as NO_x and SO₂, on the environmental situation in Ukraine and the world as a whole is also important.*

In order to reduce the amount of polluting gases in the air of Ukraine, it was decided to turn to the experience and practice of the European Union (EU) countries and analyse what has already been done, as well as what is planned to be done in this direction in the coming decades. To this end, we analysed the actual data on the reduction of CO₂, NO_x, and SO₂ emissions by European countries and compared their plans for further emission reductions in the coming years.

The theoretical data of the study on the actual reduction of air pollutant and carbon dioxide emissions by European countries, as well as their plans for further reduction of these emissions, are of practical importance, as they show global trends in this problem of global importance and should be applied in all future energy plans both in Ukraine and other countries where this is not taken into account. Therefore, an effective and scientifically based plan for energy saving, clean energy production, and diversification of energy resources is needed to accelerate the transition to clean energy, increase energy independence from unreliable suppliers and unstable supplies of imported fossil fuels (in particular, accelerated phase-out of russian fossil fuels by 2030, which are used by the aggressor as an economic and political weapon), and help solve the climate crisis.

Keywords: *energy efficiency; renewable energy sources; National energy strategy; climate plans; economical development.*

С.П. Шаповал, С.Й. Мисак, М.Я. Кузнецова

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

ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ ЄВРОПЕЙСЬКИХ ТЕНДЕНЦІЙ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ

***Анотація.** Робота присвячена аналізу європейських тенденцій щодо зменшення викидів шкідливих речовин та вуглекислого газу. Сьогодні гострою є проблема збільшення CO₂, а отже завдання декарбонізації планети є важливим завданням світової спільноти. Поряд з цим важливим є негативний вплив на екологічну ситуацію в Україні і світі загалом інших забруднюючих речовин, зокрема таких як NO_x, SO₂.*

Для зменшення кількості забруднюючих газів у повітрі України було прийнято рішення звернутись до досвіду та практики країн Європейського Союзу (ЄС) та проаналізувати, що вже зроблено, а також, що планується зробити в цьому напрямку в майбутні десятиліття. Для цього здійснено аналіз фактичних даних щодо досягнення зниження викидів CO₂, NO_x, SO₂ країнами Європи, а також зіставлено між собою плани щодо подальшого зниження викидів в найближчі роки цими країнами.

Теоретичні дані проведеного дослідження щодо фактичного зменшення викидів шкідливих речовин в повітря та вуглекислого газу європейськими країнами, а також їх плани щодо подальшого скорочення викидів зазначених речовин мають практичне значення, оскільки показують світові тенденції щодо цієї проблеми світового значення та мають бути застосовані в усіх подальших енергетичних планах як України, так і інших країн, де це не враховується. Тому потрібний ефективний і науково обґрунтований план економії енергії, виробництва чистої енергії, диверсифікації енергоресурсів, мета якого полягає в пришвидшеному переході на чисту енергію, підвищенні енергетичної незалежності від ненадійних постачальників і нестабільного постачання імпортного викопного палива (зокрема, пришвидшена відмова від російських викопних видів палива до 2030 р., які використовуються агресором як економічна і політична зброя), а також в допомозі в розв'язанні проблеми кліматичної кризи.

***Ключові слова:** енергетична ефективність; відновлювані джерела енергії; Національна енергетична стратегія; кліматичні плани; економічний розвиток.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.5-16>

Вступ

У 2019 р. відповідно до цілей Європейського зеленого курсу (European Green Deal) було прийнято пакет “Чиста енергія для всіх європейців” (Clean energy for all Europeans package) – набір енергетичних правил для імплементації в законодавство країн-членів, який ознаменував значний крок до реалізації Стратегії енергетичного союзу (Energy Union Strategic Framework), опублікованої в 2015 р. Зокрема, крім визначеної в Угоді про кліматичні та енергетичні рамки Європейського Союзу (ЄС) до 2030 р. (The 2030 climate and energy framework) цілі щодо скорочення викидів парникових газів (ПГ) щонайменше на 40% порівняно з рівнем 1990 р. (кінцева мета – скоротити на 80–95% до 2050 р.), найбільш важливими є: згідно з Директивою ЄС 2018/2002 про енергетичну ефективність – підвищення енергоефективності понад

поточний рівень щонайменше на 32,5% до 2030 р., згідно з Директивою ЄС 2018/2001 “Про заохочення використання енергії з відновлюваних джерел” – частка енергії з відновлюваних джерел у валовому кінцевому енергоспоживанні на рівні 32% до 2030 р., згідно з Регламентом про управління Енергетичним союзом та кліматичні дії (ЄС) 2018/1999 – здійснення управління через Інтегровані національні енергетичні та кліматичні плани на 2021–2030 рр. і довгострокові Стратегії низьковуглецевого розвитку країн-членів ЄС.

Тому в серпні 2021 р. було представлено пакет законодавчих ініціатив “Fit for 55”, що мають забезпечити досягнення цілей ЄС, зазначених в Європейському законі про клімат (European Climate Law), з переглядом чинного законодавства держав-членів та загалом сприяти реалізації European Green Deal. Зокрема, до 2030 р., крім зменшення парникових газів, в енергетичному секторі було запропоновано збільшити з 32% до 40% частку виробленої енергії з відновлювальних джерел енергії, скоротити частку первинного енергоспоживання до 39–41%, а кінцевого енергоспоживання – до 36–37%, здійснити реформування Схеми торгівлі викидами ЄС (EU ETS) та ін.

У зв’язку з повномасштабним вторгненням 24 лютого 2022 р. Росії в Україну і руйнуванням світового енергетичного ринку Єврокомісія затвердила REPowerEU [1] – план економії енергії, виробництва чистої енергії, диверсифікації енергоресурсів, мета якого полягає в пришвидшеному переході на чисту енергію, підвищенні енергетичної незалежності країн-членів ЄС від ненадійних постачальників і нестабільного постачання імпортного викопного палива (зокрема, пришвидшена відмова від російських викопних видів палива до 2030 р., які використовуються агресором як економічна і політична зброя), а також в допомозі розв’язання проблеми кліматичної кризи.

Цей план до 2030 р. пропонує:

- підвищити частку на рівні 40–45% енергії з відновлюваних джерел у валовому кінцевому енергоспоживанні до 2030 р. за рахунок активнішого розвитку вітрових та сонячних електростанцій;
- рекомендації щодо зменшення енергоспоживання та підвищення загальноєвропейського цільового показника ефективності з 9% до 13%;
- зобов’язати встановлювати сонячні панелі на дахах нових споруджених будинків;
- збільшити виробництво біометану і прискорити розвиток низьковуглецевої водневої енергетики з будівництвом нових електролізерів, які забезпечать промисловість власним виробництвом 10 млн т відновлювального водню, а також вирішення проблем його транспортування і споживання.

Усі ці зміни країни-члени ЄС повинні опрацювати в своїх національних планах для вироблення політики впровадження поставлених цілей союзу і, згідно з European Climate Law, подати оновлені національні плани на розгляд Єврокомісії.

Метою цивілізованих країн є реформування своєї економіки для усунення негативних наслідків зміни клімату шляхом вдосконалення державної політики для досягнення сталого розвитку держави, створення правових та інституційних передумов щодо забезпечення переходу до низьковуглецевого розвитку з дотриманням економічної, енергетичної та екологічної безпеки, підвищення добробуту громадян та ефективного використання теплогенеруючих установок [2] і відновлювальних джерел енергії [3, 4].

Результати дослідження

Тривалий час економічний розвиток України супроводжувався незбалансованим використанням природних ресурсів, небережним, безвідповідальним ставленням до захисту навколишнього середовища, що унеможливило досягнення збалансованого (сталого) розвитку. Але, зважаючи на зміни в українському суспільстві, тверде прагнення розбудови демократичної, вільної, справедливої держави з верховенством права і конкурентоспроможною сучасною економікою, бажання інтегруватися в цивілізовані міжнародні структури, на сьогодні перед українським урядом стоять амбітні цілі щодо якнайшвидшої імплементації вимог, які передбачені Угодою про Асоціацію України з ЄС. Питання захисту довкілля та клімату є одними з ключових у переговорному процесі до повноцінного членства України в ЄС. Але, не зважаючи на збільшення викидів парникових газів та інших забруднюючих речовин через військову агресію північного сусіда, стратегічна ціль повоєнного відновлення української держави – чисте та безпечне довкілля, подальший рух Європейським зеленим курсом (European Green Deal) та відбудова економіки за принципами сталого розвитку.

Згідно з редакцією від 21.09.2022 проекту “Про Національний план дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 р.” в Україні основна увага приділяється таким джерелам відновлюваної енергетики, як енергія біомаси, вітрова енергія, сонячна енергія, гідроенергія, геотермальна енергія та енергія навколишнього природного середовища з використанням теплових насосів.

Наразі в Україні діє Енергетична стратегія України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”. Ця стратегія, всупереч європейським планам, передбачає зростання споживання енергетичних ресурсів. Прогнози щодо збільшення енергоспоживання видаються хибними, бо не спрямовані на заощадження паливно-енергетичних ресурсів та підвищення енергоефективності. Також в діючій стратегії не зазначено конкретних цілей з розвитку джерел відновлюваної енергії у валовому кінцевому енергоспоживанні, а лише вказано цілі у загальному постачанні первинної енергії (ЗППЕ). Проблему декарбонізації та скорочення викидів забруднюючих речовин в документі пропонується вирішувати за рахунок зниження енергоємності ВВП країни, скорочення обсягів ЗППЕ, впровадження обмежень для найбільших джерел забруднення атмосфери і системи торгівлі квотами на викиди ПГ, виведення з експлуатації застарілих ТЕС, законодавчого забезпечення механізмів фінансування інвестиційних проєктів з будівництва газоочисного обладнання.

Критики також заслуговує Стратегія низьковуглецевого розвитку України на період до 2050 року, що була затверджена урядом у 2018 р. Згідно із зверненням ГО “Центр екологічних ініціатив “Екодія” до уряду, цей документ не містить жодного сценарію, який би передбачав скорочення викидів ПГ у секторах “Енергетика” та “Промисловість”, що йде в розріз з метою Паризької кліматичної угоди.

Тому в даній статті для оцінки прогнозованих викидів ПГ розглядається “Звіт щодо визначення другого національного визначеного внеску України до Паризької кліматичної угоди” (НВВ2) [5].

Національна енергетична стратегія кожної країни враховує декілька сценаріїв розвитку, які визначають план заходів досягнення цілей в залежності від економічної ситуації в країні та світі, один з яких вважається основним.

Скорочення викидів ПГ і забруднюючих речовин, %, від рівня 1990 р. визначалися як різниця між рівнем викидів у 1990 р., прийнятим за 100%, і рівнем викидів, %, у наступні роки за формулою:

$$P = \frac{C}{C_{1990}} \cdot 100, \%$$

де P – скорочення викидів ПГ і забруднюючих речовин, %;

C – рівень викидів ПГ і забруднюючих речовин після 1990 р., тис. т н.е.;

C_{1990} – рівень викидів ПГ і забруднюючих речовин у 1990 р., тис. т н.е.

Фактичні значення – це значення викидів, які спостерігалися державними службами моніторингу в минулі роки.

Прогнозовані значення – це теперішні та майбутні значення викидів на основі прийнятої моделі розвитку державної енергетичної політики, які вказані в таблицях жирним шрифтом.

При визначенні скорочень викидів ПГ і забруднюючих речовин не враховувалися викиди від сектору землекористування, зміни у землекористуванні та лісовому господарстві (ЗЗЛГ).

Спочатку було проаналізовано здійснене та планове скорочення викидів ПГ порівняно з 1990 р. (табл. 1).

Таблиця 1. Відносне скорочення викидів парникових газів, %, в Україні та країнах ЄС від рівня 1990 р.

Країна	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Нідерланди	100,0	104,4	98,9	96,5	96,2	87,6	74,5	66,7	55,0	-	-	-	5,0
Німеччина	100,0	89,8	83,5	79,5	75,3	72,3	58,7	59,1	35,2	23,7	12,0	3,9	-
Франція	100,0	98,6	100,9	101,3	93,3	84,2	77,2	67,0	57,0	47,0	37,0	27,0	14,7
Польща	100,0	94,0	83,4	84,8	86,5	82,0	80,7	76,4	70,7	62,0	57,0	-	-
Україна	100,0	59,3	44,4	46,8	43,0	33,7	34,8	34,8	34,8	-	-	-	-

Для Нідерландів, Німеччини, Франції та Польщі фактичні викиди ПГ були отримані з [6], прогнозовані – з [7–10] відповідно. Для України фактичні значення викидів для 1990–2015 рр. були отримані з [11], для 2020 р. – з [12], а прогнозовані значення – з [5].

Згідно з табл. 1, з 1990 р. до 2020 р. найбільше скорочення викидів ПГ було зафіксовано в Україні. Основними причинами цього зменшення були занепад промислового виробництва після краху СРСР, економічні кризи та військова агресія Росії. За даними [5], у 2030 р. національна ціль щодо скорочення викидів ПГ складає 34,8% від рівня 1990 р. На період від 2020 р. до 2030 р. прогнозується постійний рівень викидів забруднюючих газів з незначним підвищенням енергоспоживання в економіці. Міжнародні експерти стверджують, що якщо, крім впровадження змін до чинного законодавства, не відбудеться значних структурних змін в енергетиці та промисловості,

завершення бойових дій, то значного подальшого скорочення не відбуватиметься. Через це національно визначена ціль ними оцінюється як недостатня і тому суперечить Паризькій кліматичній угоді.

Найкращі показники скорочення ПГ в довгостроковій перспективі плануються в Німеччині, яка, за даними [8], завдяки рішучим заходам в енергетиці, прогнозує в 2030 р. скоротити викиди на 65%, в 2040 р. – на 88% та досягнути кліматичної нейтральності до 2045 р., забезпечуючи викиди ПГ на рівні 3,9% від обсягу в 1990 р. Франція до 2030 р. планує скорочення забруднюючих газів на 43%, до 2040 р. – на 63% і стати кліматично нейтральною країною до 2050 р., викидаючи в атмосферу 14,7% від обсягу викидів ПГ у 1990 р.

Зменшення викидів ПГ у Нідерландах відбувається подібно до французького кліматичного плану. Уряд, згідно з прийнятим у 2019 р. Законом про клімат (Climate Action Act), декларує, що економіка стане безвуглецевою у 2050 р., але поки що ні в [13], ні в [7] детально не прогнозується рівень викидів після 2030 р. Очікується, що у 2030 р. буде зменшено викиди ПГ на 39–50% порівняно з 1990 р. Отже, наразі не передбачається виконання завдання уряду країни щодо скорочення викидів на 55%, яке також пропонує “Fit for 55”, тому що це вимагає швидшої реалізації заходів щодо скорочення викидів та жорсткішої політики, яка ще детально не запропонована в [7].

Польща до 2000-х років була одним з лідерів зі скорочення викидів ПГ, досягнувши рівня викидів 16,6% від обсягу 1990 р. Це, як і в Україні, було пов’язано з великим скороченням економіки в пострадянський період. Але у зв’язку зі значним економічним зростанням після вступу в ЄС, що призвело до збільшення промислового виробництва та енергоспоживання, скорочення викидів сповільнилось і навіть почалося їх зростання, досягнувши 13,5% у 2010 р. За прогнозами [10], Польща залишатиметься лідером з викидів ПГ, згідно з принципами сталого розвитку, плануючи їх скорочення на 29,3% у 2030 р. і на 43% у 2040 р., що в основному пов’язано зі значним використанням вугілля та природного газу в енергетиці.

Результати аналізу здійсненого та планового скорочення викидів CO₂ порівняно з 1990 р. наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Відносне скорочення викидів CO₂, %, в Україні та країнах ЄС від рівня 1990 р.

Країна	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Нідерланди	100,0	106,3	105,5	109,0	111,8	101,1	85,0	74,8	60,2	-	-	-
Німеччина	100,0	89,2	85,5	82,3	79,1	75,6	60,8	59,3	48,3	36,8	25,2	4,0
Франція	100,0	98,6	104,1	106,8	97,1	85,7	72,6	69,0	56,3	39,2	-	-
Польща	100,0	96,3	84,3	85,8	88,9	83,2	80,5	75,8	71,1	63,3	55,5	-
Україна	100,0	55,2	39,6	44,4	41,6	31,7	29,3	28,6	28,6	-	-	-

Фактичні дані викидів CO₂ для Нідерландів, Німеччини, Франції та Польщі були виписані з [6]. Прогнозовані дані для Нідерландів, Франції та Польщі були отримані з [7, 9, 10] відповідно, а для Німеччини, у зв’язку з відсутністю таких даних, вони були визначені як відповідні дані викидів ПГ з [8]

множенням на 0,85 (середня частка CO₂ в ПГ за останні роки). Для України фактичні значення для 1990–2015 рр. були отримані з [11], для 2020 р. – з [12], а прогнозовані значення – з [5].

У 2030 р. Німеччина прогнозує скоротити викиди CO₂ на 51,7%, у 2040 р. – на 74,8%, у 2050 р. – на 96% порівняно з 1990 р.

Франція планує скоротити викиди CO₂ на 43,7% у 2030 р. та на 61,8% у 2035 р. від обсягу в 1990 р.

Оскільки економіка Польщі не така сильна, як у розвинутих європейських держав, керуючись принципами сталого розвитку, країна не може собі дозволити радикальні заходи з оновлення промислових, енергетичних об'єктів, будівництво нових об'єктів виробництва чистої енергії. Тому прогнозується зменшення викидів CO₂ на 29,9% у 2030 р. і на 35,5% у 2040 р. від рівня в 1990 р.

Результати аналізу здійсненого та планового скорочення викидів NO_x порівняно з 1990 р. наведено в таблиці 3.

Таблиця 3. Відносне скорочення викидів NO_x, %, в Україні та країнах ЄС від рівня 1990 р.

Країна	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Нідерланди	100,0	85,2	72,2	64,2	53,0	42,4	31,5	34,9	38,2	-	-
Німеччина	100,0	77,0	66,7	57,5	51,0	47,4	34,5	28,1	22,4	-	-
Франція	100,0	91,0	82,9	71,8	55,1	45,8	31,6	24,8	18,0	-	-
Польща	100,0	96,4	77,5	76,4	74,3	59,4	52,6	46,5	40,3	36,9	33,4
Україна	100,0	50,6	34,0	36,3	31,2	22,9	13,9	-	-	-	-

Для Нідерландів, Німеччини, Франції та Польщі фактичні викиди NO_x були отримані з [14], прогнозовані викиди – з [13, 15, 9, 10] відповідно. Для України фактичні викиди у 1990–2015 рр. отримані з [11], у 2020 р. – з [16], а прогнозовані викиди, які би враховували всі галузі економіки, крім ЗЗЗЛГ, є відсутні.

Прогнозовані значення викидів NO_x для Нідерландів є в Інтегрованому національному енергетичному і кліматичному плані 2021–2030 рр., в якому, згідно з даними [13, табл. 5.2], без врахування викидів від ЗЗЗЛГ, у 2016 р. були 297,7 тис. т, а в 2030 р. прогноуються 256 тис. т. Це значно більше від фактичних значень в Eurostat, де, згідно з [14], в 2015 р. викиди були 283,6 тис. т, а в 2020 р. – 210,8 тис. т. Тому помітна стрибкоподібна зміна викидів NO_x, які з 2015 р. до 2020 р. зменшуються на 10,9%, а в наступні 10 років збільшуються на 6,7%.

Найбільші зменшення викидів NO_x у своїх кліматичних планах прогноують Німеччина та Франція, які в 2030 р. планують скоротити викиди на 77,6% і 82% відповідно від обсягів у 1990 р.

Україна продемонструвала хороші показники скорочення викидів NO_x, у 2020 р. встановивши найбільше за 30 років зменшення – 86,1%. З 1990 р. до 1995 р. під час глибокої економічної кризи з падінням промислового виробництва та енергоспоживання відбулося скорочення викидів цього забруднювача майже вдвічі.

Найгірша динаміка скорочення викидів NO_x спостерігається в Польщі, де значна частина енергетики і промисловості отримує енергію від спалювання вугілля та рідких вуглеводнів. З 2000 р. до 2010 р. рівень викидів забруднювача був сталим і становив 74–77% порівняно з 1990 р. Далі після впровадження європейських директив з енергозбереження та енергоефективності відбулося поступове зменшення викидів на 40,6% до 2015 р. і 47,4% до 2020 р. Дотримуючись сталого розвитку держави, Польща, модернізуючи економіку згідно із своїм інтегрованим національним енергетичним і кліматичним планом, до 2025 р. планує скоротити викиди NO_x на 53,5%, до 2030 р. – на 59,7%, до 2035 р. – на 63,1%, до 2040 р. – на 66,6% від рівня викидів у 1990 р.

Результати аналізу здійсненого та планового скорочення викидів SO₂ порівняно з 1990 р. наведено в таблиці 4.

Таблиця 4. Відносне скорочення викидів SO₂, %, в Україні та країнах ЄС від рівня 1990 р.

Країна	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Нідерланди	100,0	69,2	39,7	34,3	18,2	15,7	9,9	10,8	11,7	-	-
Німеччина	100,0	31,9	11,8	8,7	7,4	6,1	4,3	3,8	3,0	-	-
Франція	100,0	72,9	47,9	35,6	20,9	11,8	7,4	6,9	6,4	-	-
Польща	100,0	78,3	50,8	43,3	32,1	25,1	16,1	14,0	11,9	13,0	14,1
Україна	100,0	64,3	30,7	36,8	38,2	34,4	28,2	-	-	-	-

Для Нідерландів, Німеччини, Франції та Польщі фактичні значення викидів SO₂ були виписані з [14], а прогнозовані значення викидів – з [13, 15, 9, 10] відповідно. Для України фактичні значення викидів у 1990–2015 рр. були отримані з [11], у 2020 р. – з [16], а прогнозовані значення викидів, які би враховували всі галузі економіки, крім ЗЗЗЛГ, є відсутні.

Франція і Німеччина у 2020 р. досягли значного скорочення викидів SO₂ – 93,1% і 96,2% в порівнянні з 1990 р. відповідно завдяки майже повному припиненню роботи вугільних електростанцій. Війна в Україні змусила уряди цих країн переглянути це рішення і задля задоволення своїх енергетичних потреб тимчасово відновити їх роботу. Очевидно такі рішення затримають досягнення екологічних цілей, але сприятимуть значному розвитку чистої енергетики. Тому прогнози у інтегрованих енергетичних і кліматичних планах цих країн можуть виявитися необ’єктивними і будуть переглянуті найближчим часом.

Нідерланди, хоча і закрили останню вугільну електростанцію “Хемвер” в Амстердамі наприкінці 2019 р., у 2020 р. загалом скоротили викиди SO₂ на 90,1%. Агресія північного сусіда в Україну на початку 2022 р. змусила країну через дефіцит природного газу в Європі майже вдвічі збільшити видобуток цього викопного палива з родовища Гронінген, яке з причини шквалу сейсмічної активності поетапно планували закрити у квітні 2022 р. Це не вплине на скорочення викидів SO₂, але збільшить викиди NO_x, тому що до цього низькокалорійного газу додають азот. У 2025 р. Нідерланди прогнозують зменшення викидів SO₂ на 89,2%, а у 2030 р. – на 88,3% порівняно з викидами в 1990 р.

Польща у 2020 р. загалом скоротила викиди SO_2 на 83,9% від рівня 1990 р., у 2025 р. планує загальне скорочення на 86%, у 2030 р. – на 88,1%, у 2035 р. – на 87% і у 2040 р. – на 85,9%.

В Україні, незважаючи на скорочення економіки після розпаду СРСР, рівень викидів SO_2 залишається найвищим і у 2020 р. становив 28,2% від обсягу викидів у 1990 р. Згідно з Енергетичною стратегією України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”, поточний рівень викидів забруднюючих речовин (NO_x , SO_2 , пилю) перевищує нормативи ЄС в середньому в 7–80 разів залежно від їх типу. Ці викиди планується зменшити до європейського рівня за SO_2 і пилом до 2028 р., а за NO_x – до 2033 р.

Висновки та перспективи подальших досліджень

На основі аналізу теоретичних даних можна стверджувати, що зменшення викидів NO_x для України – найбільше. У 2020 р. країна скоротила викиди на 86,1% від рівня у 1990 р., тоді як німецька і французька економіки планують досягти подібного зменшення – на 77,6% і 82% відповідно – тільки до 2030 р. порівняно з 1990 р. Польща, у зв'язку зі значним використанням викопного палива, прогнозує скорочення викидів на 59,7% у 2030 р. і на 66,6% в 2040 р., Нідерланди – на 61,8% у 2030 р.

Країни ЄС здійснили рішучі заходи щодо значного зменшення викидів SO_2 до 2020 р., в порівнянні з обсягами викидів у 1990 р. Німеччина скоротила викиди діоксиду сірки на 95,7%, Франція – на 92,6%, Нідерланди – на 90,1%, Польща – на 83,9%. У 2030 р. Німеччина прогнозує скорочення викидів на 97%, Франція – на 93,6%, Нідерланди – на 88,3%, Польща – на 88,1% і у 2040 р. – на 88,3%.

Україна є лідером зі скорочення викидів CO_2 порівняно з рівнем у 1990 р. і прогнозує подальше скорочення на 71,4% у 2030 р.

Успіхи України у зменшенні викидів ПГ, NO_x , SO_2 в основному пов'язані зі скороченням промислового виробництва та енергоспоживання в часи глибоких економічних криз, а не зі значними структурними змінами в економіці, спрямованими на енергозбереження та енергоефективність.

У порівнянні з Україною ЄС запроваджує жорсткі правила щодо скорочення викидів ПГ, встановлюючи високі податки на викиди вуглецю і реформує свою Схему торгівлі викидами (EU ETS), з метою дати промисловості стимул модернізуватися. Гнучка система кредитування (гранти для покриття частини витрачених коштів на закупівлю енергоефективного обладнання або оптимізації технологічних процесів), підтримка європейської ініціативи “зеленого переходу” (European Green Deal) дозволяють країнам-членам залучити фінансування на вигідних умовах.

З метою виправлення ситуації в Україні наразі необхідно доопрацювати Кліматичний закон України, який охоплюватиме всі напрямки у сфері формування та реалізації кліматичної політики; за підтримки міжнародних партнерів розробляти нові документи в цій сфері і здійснювати постійний контроль за їх виконанням; визначити конкретні механізми фінансування кліматичних заходів, які б стимулювали модернізацію української енергетики та промисловості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. European Commission. (2019). REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe. Retrieved from https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowerEU-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en
2. Pistun, Y., Mysak, S., Kovalenko, T., Lys, S. (2017). Development of the analytical method for determining the armor wear of the drum ball mill. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1-89), 45-50. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109629>
3. Venhryn, I., Shapoval, S., Voznyak, O., Datsko, O., Gulai, B. (2021). Modelling of optical characteristics of the Thermal Photovoltaic Hybrid Solar Collector. *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine, 2021, pp. 255-258. <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648738>
4. Mysak, Y., Pona, O., Shapoval, S., Kuznetsova, M., Kovalenko, T. (2017). Evaluation of energy efficiency of solar roofing using mathematical and experimental research. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8-87), 26-32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103853>
5. Центр економічного відновлення. (2021). Звіт щодо визначення другого національного визначеного внеску України до Паризької кліматичної угоди. Retrieved from https://ubta.com.ua/files/20210713/Annex_1.pdf
6. Eurostat. (2023). Greenhouse gas emissions by source sector (source: EEA). Retrieved from https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_AIR_GGE__custom_4885837/default/table?lang=en
7. PBL Planbureau voor de Leefomgeving. (2022). Klimaat-en Energieverkenning 2022. PBL-publicatienummer: 4838.
8. UNFCCC. (2022). Update to the long-term strategy for climate action of the Federal Republic of Germany. Retrieved from <https://unfccc.int/documents/620935>
9. European Commission. (2020). Integrated National Energy and Climate Plan for France. Retrieved from https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-08/fr_final_necp_main_en.pdf
10. Ministry of Climate and Environment. (2021). Energy Policy of Poland until 2040. Appendix 2. Conclusions from forecast analyses for the energy sector. Retrieved from <https://www.gov.pl/web/climate/energy-policy-of-poland-until-2040-epp2040>
11. UNFCCC. (2018). Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. Ukraine's Greenhouse Gas Inventory 1990-2016. Retrieved from <https://unfccc.int/documents/106947>
12. Ritchie, H., Roser, M., Rosado P. (2020). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. *OurWorldInData.org*. Retrieved from. <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
13. European Commission. (2019). Integrated National Energy and Climate Plan 2021-2030 The Netherlands. Retrieved from https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/nl_final_necp_main_en_0.pdf
14. Eurostat. (2023). Air pollutants by source sector (source: EEA). Retrieved from https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_AIR_EMIS__custom_4885966/default/table?lang=en
15. European Commission. (2019). Integrated National Energy and Climate Plan. Germany. Retrieved from https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-08/de_final_necp_main_en.pdf
16. Держстат України. (2022). Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря України. Retrieved from https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fukrstat.gov.ua%2Foperativ%2Foperativ2020%2Fns%2Fns_rik%2Fvzr_apU_90_20_ue.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK

Стаття надійшла до редакції 16.08.2023 і прийнята до друку після рецензування 24.11.2023

REFERENCES

1. European Commission. (2019). REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe. Retrieved from https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowerEU-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en
2. Pistun, Y., Mysak, S., Kovalenko, T., Lys, S. (2017). Development of the analytical method for determining the armor wear of the drum ball mill. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1-89), 45-50. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109629>
3. Venhryn, I., Shapoval, S., Voznyak, O., Datsko, O., Gulai, B. (2021). Modelling of optical characteristics of the Thermal Photovoltaic Hybrid Solar Collector. *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine, 2021, pp. 255-258. <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648738>
4. Mysak, Y., Pona, O., Shapoval, S., Kuznetsova, M., Kovalenko, T. (2017). Evaluation of energy efficiency of solar roofing using mathematical and experimental research. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8-87), 26-32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103853>
5. Center for economic recovery. (2021). Report on the determination of the second national determined contribution of Ukraine to the Paris Climate Agreement. Retrieved from https://ubta.com.ua/files/20210713/Annex_1.pdf
6. Eurostat. (2023). Greenhouse gas emissions by source sector (source: EEA). Retrieved from https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_AIR_GGE__custom_4885837/default/table?lang=en
7. PBL Planbureau voor de Leefomgeving. (2022). Klimaat-en Energieverkenning 2022. PBL-publicatienummer: 4838.
8. UNFCCC. (2022). Update to the long-term strategy for climate action of the Federal Republic of Germany. Retrieved from <https://unfccc.int/documents/620935>
9. European Commission. (2020). Integrated National Energy and Climate Plan for France. Retrieved from https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-08/fr_final_necp_main_en.pdf
10. Ministry of Climate and Environment. (2021). Energy Policy of Poland until 2040. Appendix 2. Conclusions from forecast analyses for the energy sector. Retrieved from <https://www.gov.pl/web/climate/energy-policy-of-poland-until-2040-epp2040>
11. UNFCCC. (2018). Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. Ukraine's Greenhouse Gas Inventory 1990-2016. Retrieved from <https://unfccc.int/documents/106947>
12. Ritchie, H., Roser, M., Rosado P. (2020). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. *OurWorldInData.org*. Retrieved from. <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
13. European Commission. (2019). Integrated National Energy and Climate Plan 2021-2030 The Netherlands. Retrieved from https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/nl_final_necp_main_en_0.pdf
14. Eurostat. (2023). Air pollutants by source sector (source: EEA). Retrieved from https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_AIR_EMIS__custom_4885966/default/table?lang=en
15. European Commission. (2019). Integrated National Energy and Climate Plan. Germany. Retrieved from https://energy.ec.europa.eu/system/files/2022-08/de_final_necp_main_en.pdf
16. State Statistics Service of Ukraine. (2022). Emissions of pollutants into the atmospheric air of Ukraine. Retrieved from https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fukrstat.gov.ua%2Foperativ%2Foperativ2020%2Fns%2Fns_rik%2Fvzr_apU_90_20_ue.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK

The article was received 16.08.2023 and was accepted after revision 24.11.2023

Шаповал Степан Петрович

доктор технічних наук, професор, професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції Інституту будівництва та інженерних систем, Національний університет «Львівська політехніка»

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4985-0930> **e-mail:** stepan.p.shapoval@lpnu.ua

Мисак Степан Йосифович

кандидат технічних наук, старший викладач закладу вищої освіти, Національний університет «Львівська політехніка»

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2064-7015> **e-mail:** stepan.y.mysak@lpnu.ua

Кузнецова Марта Ярославівна

кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з науково-педагогічної роботи Інституту енергетики та систем керування, Національний університет «Львівська політехніка»

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0492-2243> **e-mail:** marta.y.kuznetsova@lpnu.ua

УДК 697.27

Olena Savchenko, PhD, Associate Professor of Department of Heat, Gas Supply and Ventilation

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3767-380X> *e-mail*: o.savchenko@i.ua

Yuriy Yurkevych, PhD, Associate Professor of Department of Heat, Gas Supply and Ventilation

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8869-7759> *e-mail*: jurjurkev@gmail.com

Orest Voznyak, Dr, Professor of Department of Heat, Gas Supply and Ventilation

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6431-088X> *e-mail*: orest.voznyak@i.ua

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

POSSIBILITY ASSESSMENT OF THE LOW-TEMPERATURE DISTRICT HEATING SYSTEMS IMPLEMENTATION IN UKRAINE

Abstract. *These researches concern the application of renewable energy sources in district heating systems. In Ukraine, district heating systems cover approximately 50% of the demand for thermal energy in the residential and communal sector. District heating systems 2G are most often used, which are characterized by high temperatures of the heat coolant, the lack of accounting for heat energy consumption during transportation of the heat coolant, and the use of fossil fuels. In the countries of the European Union, the introduction of district heating systems is considered one of the key directions for the transition to a decarbonized, environmentally safe and efficient energy system. The development of district heating systems technologies makes it possible to lower the temperature of the heat coolant in heat networks and increase the use of renewable energy sources. Ukraine will eventually become a full-fledged member of the European Union, and this determines the need to find ways to bring Ukraine's heat supply systems to the 4G level, in particular to low-temperature district heating systems with the most efficient use of renewable energy sources and waste heat. This article examines climatic, physical-geographical and social features, regulatory, technical and financial-economic opportunities and barriers to the implementation of low-temperature district heating systems in Ukraine. As a result of analytical studies, it was established that there are prerequisites for the introduction of low-temperature heat supply systems in Ukraine, however, a number of technical, regulatory, social and financial and economic measures need to be implemented to bring district heating systems up to 4G indicators. These studies allow establishing measures that require further research for the possibility of introducing low-temperature district heating systems in particular and environmental safety of heat supply systems in general.*

Keywords: *district heating system; renewable energy sources; low-temperature system; heat network; features; barriers.*

О.О. Савченко, Ю.С. Юркевич, О.Т. Возняк

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

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В УКРАЇНІ

***Анотація.** Дані дослідження стосуються питань застосування відновлювальних джерел енергії у централізованих системах теплопостачання. В Україні системи централізованого теплопостачання покривають приблизно 50% попиту на теплову енергію в житлово-комунальному секторі. Найчастіше застосовуються системи централізованого теплопостачання 2G, які характеризуються високими температурами теплоносія, відсутністю обліку споживання теплової енергії при транспортуванні теплоносія та використанням викопних видів палива. У країнах Євросоюзу впровадження систем централізованого теплопостачання розглядається як один з ключових напрямків для переходу до декарбонізованої, екологічно безпечної та ефективної енергетичної системи. Розвиток технологій централізованого теплопостачання дозволяє знижувати температури теплоносія у теплових мережах та збільшувати використання відновлювальних джерел енергії. Україна за часом стане повноцінним членом Євросоюзу, а це обумовлює потребу шукати шляхи приведення систем теплопостачання України до рівня 4G, зокрема до низькотемпературних систем теплопостачання з максимально ефективним використанням відновлювальних джерел енергії та відпрацьованого тепла. У даній статті розглянуто кліматологічні, фізико-географічні та соціальні особливості, законодавчі, технічні та фінансово-економічні можливості та бар'єри впровадження низькотемпературних систем теплопостачання в Україні. В результаті аналітичних досліджень встановлено, що в Україні існують передумови для запровадження низькотемпературних систем теплопостачання, проте для приведення систем централізованого теплопостачання до показників 4G потрібно запровадити цілий ряд технічних, правових, соціальних та фінансово-економічних заходів. Наведені дослідження дозволяють встановити заходи, які потребують подальших досліджень для можливості впровадження низькотемпературних систем централізованого теплопостачання зокрема та екологічної безпеки систем теплопостачання в цілому.*

***Ключові слова:** система централізованого теплопостачання; відновлювальні джерела енергії; низькотемпературна система; тепла мережа; особливості; бар'єри.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.17-33>

Вступ

Міжнародне співтовариство протягом багатьох років здійснює численні заходи, пов'язані з покращенням навколишнього середовища. Крім того, російсько-українська війна 2022–2023 років показала негативний вплив російських викопних енергетичних ресурсів на енергетичну безпеку країн Євросоюзу. Щоб подолати забруднення навколишнього середовища та енергетичну незахищеність, світ перебуває на шляху переходу від викопного палива до відновлювальних джерел енергії. Вже тепер існують дослідження,

де оцінюється можливість використання 100% відновлювальної енергії для тих чи інших галузей промисловості [1, 2].

Централізоване теплопостачання є однією з галузей, енергетична модернізація якої дозволить не лише зменшити використання викопних видів палива та викиди парникових газів, але і спростити експлуатацію та технічне обслуговування будівель, зменшити витрати та забезпечити робочими місцями висококваліфікованих фахівців. У країнах Євросоюзу вже існують централізовані системи теплопостачання на альтернативних джерелах енергії або ж розглядаються можливі варіанти їх впровадження [3–6]. Для виконання Зеленої угоди та досягнення кліматичної нейтральності одним із потужних інструментів є впровадження систем централізованого теплопостачання 4 покоління (4GDH) та 5 покоління (5GDH), основними рисами яких є максимізація енергоефективності, мінімізація впливу на навколишнє середовище та оптимізація використання відновлювальних джерел енергії [7–9].

В Україні послугами централізованого теплопостачання користуються орієнтовно 50% населення. Загальна протяжність теплових мереж України у двотрубному обчисленні на 2018 рік становить 20,6 тис. км [10]. Переважна більшість українських теплових мереж та установок генерації теплоти споруджена у 70–80 роках ХХ сторіччя. Тому, більша частина систем централізованого теплопостачання України належить до систем 2 покоління (2GDH). Вони є високотемпературними, тобто температура теплоносія у подавальному трубопроводі знаходиться у діапазоні 95–150°C, у зворотному трубопроводі – 70°C, для генерації теплової енергії у 74% систем використовується природний газ, переважно відсутній облік теплової енергії, як на ланці виробництва тепла, так і у кінцевого споживача [10–12].

У 2022 році Україна отримала статус країни-кандидата на входження у Євросоюз. Це обумовлює потребу шукати шляхи приведення систем теплопостачання України до рівня 4 покоління (4GDH), які характеризуються низькими температурами теплоносіїв, використанням відновлювальних джерел енергії та відпрацьованого тепла, застосуванням акумуляторів теплоти. В Україні є багато досліджень щодо застосування відновлювальних джерел енергії для отримання теплової енергії, проте майже всі вони стосуються децентралізованих систем теплопостачання [13–15]. Публікації щодо централізованого теплопостачання переважно мають оглядовий характер, описують відмінності між різними системами теплопостачання України, описують шляхи їх розвитку або ж поодинокі випадки використання відновлювальних джерел енергії у централізованих системах теплопостачання [16–20]. Найвними також є публікації щодо сільськогосподарських відходів, які можуть бути використані для енергетичних потреб, як безпосередньо спалюванням, так і для виробництва біопалива [21–24]. Авторами статті було виконано спробу оцінити деякі технічні можливості переведення систем централізованого теплопостачання на низькотемпературний теплоносій [25], проте у літературі відсутня узагальнена інформація щодо можливостей та бар'єрів впровадження низькотемпературних систем теплопостачання 4GDH в Україні. Ось чому для впровадження низькотемпературних систем теплопостачання потрібно попередньо встановити кліматологічні та соціальні умови, законодавчі та технічні можливості та бар'єри таких систем в Україні.

Метою даної роботи є аналіз та обґрунтування можливості впровадження низькотемпературних систем централізованого теплопостачання для декарбонізації теплоенергетичної галузі України.

Матеріали і методи

На даний час багато уваги приділяється бар'ерам впровадження як в цілому низькотемпературних систем централізованого теплопостачання, так і окремо, наприклад, бар'єри по досягненню високого ступеня використання енергетичного потенціалу відновлювальними джерелами або ж бар'єри по використанню надлишкового тепла у системах централізованого теплопостачання [26–28]. Також існують дослідження можливостей та перешкод для декарбонізації цілісної енергетичної системи [29]. Для отримання інформації, що перешкоджає впровадженню тих чи інших технічних рішень, автори аналізують інформацію, яку надають зацікавлені сторони, та порівнюють її з існуючими даними з літературних джерел. Основними групами зацікавлених сторін є теплогенеруючі компанії, виробники (постачальники) енергоощадних технологій, дослідники, споживачі теплової енергії, інвестори, органи місцевої та державної влади. Кожна група має своє бачення розвитку систем теплопостачання, яке ґрунтується як на власних знаннях та наявному життєвому досвіді, так і на доступі до достовірної інформації щодо впровадження новітніх технологій. Для можливості впровадження низькотемпературних систем централізованого теплопостачання вони повинні відповідати вимогам кожної з груп зацікавлених осіб.

Так, теплогенеруючі компанії хотіли би при мінімальному вкладанні капітальних ресурсів отримувати максимально можливий прибуток. Виробники енергоощадного обладнання прагнуть збільшити свій прибуток шляхом збільшення продажів та розширити своє виробництво. Споживачі хочуть отримувати теплову енергію за мінімально можливою ціною. Інвестори не проти інвестувати кошти у системи централізованого теплопостачання, але їх рішення ґрунтуються лише на впевненості у прибутку. Органи місцевої та державної влади повинні дотримуватися існуючих законів щодо зменшення використання викопного палива та зменшення викидів парникових газів у довкілля. Інтереси кожної з перерахованих груп зацікавлених сторін часто не співпадають.

Так, у [26] наведені емпіричні дослідження щодо бар'єрів впровадження низькотемпературних систем централізованого теплопостачання, які базуються на широкому аналізі опитування представників 44 організацій, що представляють постачальників технологій, енергетичні компанії, промислові організації, політиків, місцеву владу та дослідників. Результати показують, що основними бар'єрами впровадження низькотемпературних систем теплопостачання є технічна незрілість технологій вироблення та накопичення теплової енергії, зокрема теплових насосів, ґрунтових теплообмінників, акумуляторів теплоти, небезпека прив'язки вироблення теплової енергії до біомаси, неготовність теплових мереж до переходу на низькотемпературні джерела енергії, зокрема не встановлені системи автоматизації та контролю як параметрів теплоносія (тиску і температури), так і окремого обладнання (насоси, теплообмінники), велика вартість електроенергії для рентабельного впровадження теплових насосів.

У [27] бар'єри впровадження низькотемпературних систем теплопостачання розглядаються для чотирьох груп зацікавлених осіб: інвесторів, споживачів теплової енергії, теплогенеруючих компаній та органів влади. Так, інвестори незадоволені рентабельністю інвестицій у низькотемпературні системи централізованого теплопостачання. Для споживачів визначальним є вартість теплової енергії, більшість з них не готові витратити власні кошти для впровадження енергоощадних технологій. Теплогенеруючі компанії хочуть зменшити капітальні затрати на монтаж та експлуатацію теплових мереж та теплогенеруючого обладнання. Органи місцевого самоврядування не мають достатніх знань щодо технологій низькотемпературних систем теплопостачання, їх переваг, вартості, наслідків використання для місцевої громади.

У [28] оцінюються можливості та бар'єри декарбонізації цілісної енергетичної системи, яка поєднує мережі централізованого опалення та охолодження з децентралізованими енергетичними підстанціями. В цій статті наведені результати систематичного огляду літератури та інтерв'ю, проведеного з 18 зацікавленими сторонами з провідних академічних і промислових установ. Можливості та бар'єри поділені за трьома темами: техніко-економічні показники, показники щодо синхронізації секторів енергетичної системи та показники можливості впровадження у ринок. Результати свідчать, що основними бар'єрами для впровадження таких систем є складність керування системою через використання декількох джерел енергії та, як наслідок, гідравлічна нестабільність системи, технічні складності обміну енергією між кількома зацікавленими сторонами, потреба у зберіганні тепла та холоду, більша встановлена потужність насосів, установок перетворення енергії, більші діаметри трубопроводів.

Аналізуючи літературні джерела, можна виокремити основні показники можливостей та бар'єрів впровадження низькотемпературних систем централізованого теплопостачання: кліматичні, фізико-географічні, правові, соціальні, технічні та фінансово-економічні. Проте у різних країнах вагомість наведених показників суттєво відрізняється. Тому, на даний час актуальним є також встановлення можливостей та бар'єрів впровадження низькотемпературних систем теплопостачання в Україні.

Результати дослідження

На момент написання статті бойові дії в Україні та бомбардування українських міст ще не припинилося, а значна територія залишається окупованою та вилученою з господарсько-економічної діяльності України. Складно спрогнозувати стан економіки України у повоєнний період, зокрема кількість населення, структуру промисловості, обсяг придатних сільськогосподарських угідь, обсяг споживання енергії тощо. Тому, в даній статті не враховується згубний вплив російсько-української війни на можливості та бар'єри впровадження низькотемпературних систем централізованого теплопостачання.

Кліматичні та фізико-географічні особливості та бар'єри

Україна розташована у Східній Європі та є найбільшою за площею країною Європи. Площа України становить 603 700 км². 95% від усієї площі займають

рівнини. На території України протікає 63 119 річок та струмків та близько 20 000 озер. Це дає можливість використовувати теплоту ґрунту та водою для забезпечення України низькопотенційною енергією.

Україна належить до провідних мінерально-сировинних держав світу. На початок ХХІ ст. Україна мала у своїх надрах 5% мінерально-сировинного потенціалу світу. Горючі корисні копалини, які можна видобувати в Україні, це вугілля, нафта, природний газ, метан вугільних родовищ, горючі сланці, торф. При впровадженні низькотемпературних систем теплопостачання та їх декарбонізації ці викопні палива доцільно використовувати для покриття пікового навантаження на енергетичну систему.

Територія України лежить переважно у помірному кліматичному поясі, лише південний берег Криму знаходиться у субтропічному кліматичному поясі. Оскільки з півночі на південь Україна має протяжність майже 900 км, середні температури повітря суттєво відрізняються у різних точках країни. Так, середня температура повітря у січні коливається від +2...+4°C на південному узбережжі Криму до -7...-8°C на північному сході. Надходження сонячної радіації на територію України також значно відрізняється залежно від географічного розташування місцевості та коливається в межах 1000–1500 кВт·год/м². Середні швидкості вітру на території України улітку варіюють в діапазоні від 3 до 6 м/с, у середньому на території країни – до 5 м/с. Узимку загалом вітри сильніші та сягають 5–8 м/с. Середня температура ґрунту на глибині 1,6 м взимку для м. Київ становить 2,7°C, а улітку 8,5°C, а для Одеси відповідно 5,5°C та 12,5°C [30]. Такі значення температур повітря, ґрунту, швидкості вітру та сонячного випромінювання дозволяють говорити про можливість застосування всіх альтернативних джерел енергії, зокрема теплових насосів, вітрогенераторів, сонячних панелей, сонячних колекторів на території України для забезпечення енергетичних потреб.

Однією з провідних галузей економіки України є сільське господарство. Сільськогосподарські угіддя займають 42 млн гектарів, або 70% загального фонду країни. Це дозволяє вирощувати рослини не лише для харчових потреб, а також і для забезпечення енергетичних потреб України. Енергетичні рослини, такі як ріпак, соняшник, соя, кукурудза та інші, можуть бути сировиною для створення біопалива, а енергетичні дерева, наприклад швидкоростучі верби і тополі, можуть безпосередньо використовуватися як паливо.

Одним із поширених відновлювальних джерел енергії є деревна біомаса. В Україні ліси займають близько 15,9% території держави. Загальна площа лісових ділянок становить 10,4 млн гектарів. Санітарні рубки, рубки догляду, лісовідновні рубки дозволяють заготувати деревну біомасу для енергетичних потреб.

Кліматологічні та фізико-географічні особливості сприяють впровадженню відновлювальних джерел енергії в енергетику України. На рис. 1 показано встановлену потужність об'єктів відновлювальної енергетики у період з 2014 року до I кварталу 2020 року. Як видно з рис. 1, найбільше в Україні використовується сонячна енергія, за представлений період встановлена потужність сонячних електростанцій зросла в 15 разів (з 411 МВт до 6194 МВт). На другому місці – використання енергії вітру, причому встановлена потужність вітрогенераторів збільшилася майже у 3 рази до 1207 МВт. Використання біогазу, біомаси та енергії річок України хоча і збільшується з кожним роком, проте їх частка у об'єктах генерації енергії ще досить мала.

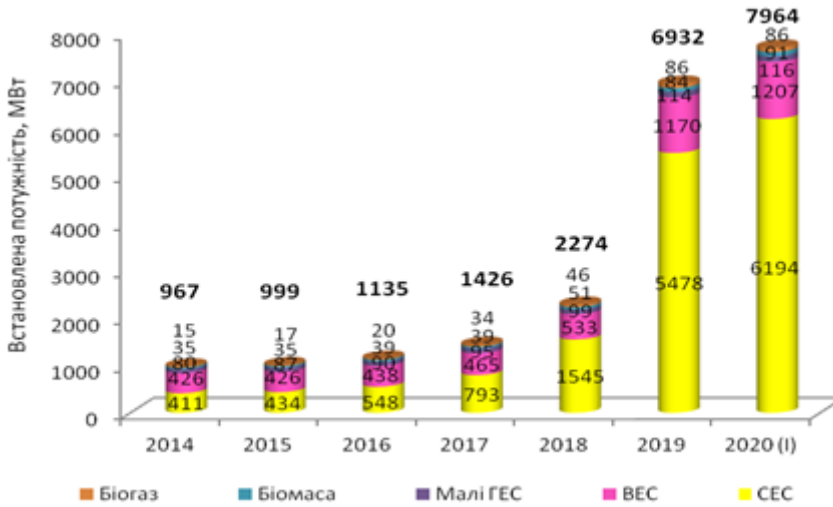


Рис. 1. Встановлена потужність об'єктів відновлювальної енергетики України

Частка відновлювальних джерел енергії у первинному споживанні енергії України ще досить мала. Так, за даними Енергетичного балансу, розробленого Держстатом України, загальна частка ВДЕ у 2019 році становила – 8,08%, а у 2020 році – 9,19%. Частка відновлювальних джерел енергії в системах теплопостачання та охолодження у 2019 році становила – 9,03%, а у 2020 році – 9,28%. На це впливають зокрема і кліматологічні та фізико-географічні бар'єри.

Так, одним з основних бар'єрів по впровадженню низькотемпературних систем теплопостачання є відсутність як кліматологічних статистичних даних, так і потенційної кількості біомаси різного походження. Ця інформація потрібна для перспективного планування систем централізованого теплопостачання на 5–10 років вперед. Автори статті спробували оцінити наявність відновлювальних джерел енергії у Львівській області, проте через відсутність багатьох статистичних даних загальна картина їх наявності склалася досить наближено [31]. Так, наявність даних про температуру ґрунту та води у водоймах на різній глибині спростила би впровадження теплових насосів в якості джерела теплоти. Відсутня щорічна інформація щодо кількості відходів, які утворюються при вирощуванні та переробці сільськогосподарських культур, а також кількості енергетичних рослин, які можна використовувати при виробництві біопалива. Немає прогнозних даних щодо річної кількості деревної біомаси, яку можна отримати під час вирубування дерев у лісах. Також до фізико-географічних бар'єрів належить незаконна вирубка лісів. Станом на 2022 рік обсяг незаконної вирубки становив 54,3 тис. м³. Крім несанкціонованого вивезення промислової деревини, незаконна вирубка характеризується неефективним поводженням з деревними відходами. Деревна біомаса залишається безпосередньо в місцях вирубки та не використовується. У 2017 році затверджена Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року, проте в ній не передбачено обов'язкове встановлення кількості відходів та сортування їх за можливими сферами застосування. Не ведеться також статистика як по

відходах тваринництва, так і по кількості та якості стічних вод, які також можуть бути сировиною для виробництва біопалива. Доцільно вести таку статистику профільним підприємствам не лише за областями, а також за районами області. Оскільки у різних районах однієї області можуть бути різні доступні відновлювальні джерела енергії, деś деревна біомаса, а деś відходи тваринництва.

Правові можливості і бар'єри

В Україні існує 3 державних документи, які стосуються теплопостачання: Закон України «Про теплопостачання» 2005 р., Концепція реалізації державної політики у сфері теплопостачання, 2017 р., Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року, 2021 р.

Закон України «Про теплопостачання» був прийнятий у 2005 році і з того часу періодично зазнавав змін та доповнень. Він визначає основні правові, економічні та організаційні засади діяльності на об'єктах сфери теплопостачання та регулює відносини, пов'язані з виробництвом, транспортуванням, постачанням та використанням теплової енергії з метою забезпечення енергетичної безпеки України, підвищення енергоефективності функціонування систем теплопостачання, створення і удосконалення ринку теплової енергії та захисту прав споживачів та працівників сфери теплопостачання. Державна політика у сфері теплопостачання відповідно до статті 6 Закону базується зокрема на принципах:

- забезпечення енергетичної безпеки держави;
- пріоритетного розвитку застосування технології комбінованого виробництва теплової та електричної енергії (когенерації) та використання альтернативних джерел енергії, нетрадиційних і поновлювальних джерел енергії;
- створення умов для впровадження енергозберігаючих технологій.

Відповідно до статті 7 Закону одними з основних напрямків розвитку систем теплопостачання є:

- планування теплопостачання, розроблення та реалізація схем теплопостачання міст та інших населених пунктів України, строк дії яких становить 10 років на основі оптимального поєднання централізованих та автономних систем теплопостачання;
- впровадження когенераційних установок, у тому числі на базі діючих опалювальних котельнь;
- використання нетрадиційних і поновлюваних джерел енергії, у тому числі енергії сонця, вітру, біогазу, геотермальних вод, відходів виробництва;
- впровадження високоефективного теплоенергетичного обладнання і матеріалів.

Єдиним стратегічним документом державного рівня щодо системи теплопостачання в Україні є Концепція реалізації державної політики у сфері теплопостачання (2017 р.), яка розроблена для систем централізованого і автономного теплопостачання.

Крім того, кожне обласне місто має свою програму або стратегію впровадження відновлювальних джерел енергії, декарбонізації галузей народного господарства та їх кліматичної нейтральності. Наприклад, у Львові було затверджено «Програму щодо створення умов для трансформації

Львівської міської територіальної громади у сталу енергопозитивну та кліматично нейтральну громаду на 2019–2024 роки».

Незважаючи на наявні нормативні документи, в Україні існують лише поодинокі випадки впровадження відновлювальних джерел енергії у системах теплопостачання, наприклад ТЕЦ Смілянського електромеханічного заводу на деревній трісці у Черкаській області.

Основним правовим бар'єром є те, що вищенаведені документи мають лише декларативний характер, тобто відсутній детальний план щодо модернізації систем централізованого теплопостачання відповідно до вимог 4GDH, не передбачено детальних технічних заходів і фінансово-економічних інструментів для досягнення цієї мети. Крім того, до правових бар'єрів належать:

- Відсутність об'єктивних показників у нормативно-правових документах для прийняття рішень про доцільність відмови від ЦТ. У Концепції пропонується «оптимальне поєднання» автономного та централізованого теплопостачання, але при цьому не встановлено кількісних показників «оптимального поєднання».

- Установки генерації теплоти, її транспортування та розподілу перебувають у власності різних суб'єктів. Це призводить до того, що інтереси власників кожної з ділянок систем теплопостачання ризикують.

- Частина об'єктів теплоенергетичної інфраструктури перебуває у приватній власності, що перешкоджає впровадженню деяких державних правових документів.

- Монопольність теплогенеруючих компаній та теплових мереж. Існуюча практика планування схем теплопостачання не враховує можливість появи нових незалежних виробників тепла. Відбір на конкурсних засадах нових теплогенеруючих об'єктів передбачений в законі України «Про теплопостачання» лише у випадку збільшення обсягів теплоспоживання і лише з-поміж тих проєктів, що вже були призначені до будівництва згідно з існуючою схемою «на перспективу».

- Юридичні проблеми із бурінням свердловин та використання геотермальних вод для потреб ЦТ, оскільки відповідно до Конституції України її надра є власністю народу.

- Відсутність відкритої інформації щодо попиту (погодинного, денного) на тепло у теплогенеруючих підприємств.

- Міська влада має лише обмежений вплив на теплоенергетичні компанії (ТЕЦ або котельні потужних промислових підприємств). Лише у випадку, якщо теплопостачання забезпечують міські комунальні підприємства, вони можуть реалізувати плани місцевих органів влади щодо енергозбереження.

- Лобіювання інтересів енергетичних компаній представниками органів місцевої та державної влади.

Соціальні особливості та бар'єри

Кінцевим споживачем теплової енергії є люди, саме вони є замовниками та платниками послуг систем теплопостачання. Неврахування побажань кінцевого споживача, нехтування його інтересами в найгіршому випадку може призвести до відключення від послуг централізованого теплопостачання. Тому, дуже важливим є врахування інтересів споживачів теплової енергії,

а також надання детальної інформації щодо впровадження низькотемпературних систем тепlopостачання та їх декарбонізації для заохочення споживачів до змін та енергоощадності.

До соціальних бар'єрів впровадження низькотемпературних систем тепlopостачання належать:

– Розповсюдження інформації у засобах масової інформації понад 30 років незалежності України щодо неефективності систем централізованого тепlopостачання.

– Глибоке переконання звичайних містян, що децентралізовані системи є дешевшими та легше регульованими.

– Опір власників енергетичних компаній впровадженню низькотемпературних СЦТ через корисливі інтереси або «старе мислення», крім того, вони бояться ризиків, пов'язаних з новими технологіями.

– Державні службовці і міські планувальники не завжди є фахівцями енергетики, тому не знають про те, що для зменшення викидів парникових газів потрібне об'єднання секторів електроенергетики, тепlopостачання, промисловості та транспорту.

– Громадянам та політикам бракує відповідної інформації щодо реальних кроків для заощадження енергії та впровадження енергоощадних технологій, а, відповідно, стримуються внесення інвестицій в такі проекти.

– Існування думки у споживачів, що біоенергетика є нестабільним варіантом, використання якого слід обмежити.

Технічні можливості та бар'єри

Україна має розвинуті системи централізованого тепlopостачання, частка якого, правда, поступово зменшується через зношення генерувальних потужностей, виведення з експлуатації опалювальних котелень (рис. 2), відключення споживачів від СЦТ.



Рис. 2. Виведена з експлуатації українська котельня

У 2018 році рівень забезпеченості населення централізованим тепlopостачанням становив 51,3%. Станом на 2018 рік до СЦТ підключено 83 590 житлових будинків з 163 041 існуючих будинків. Послугами централізованого гарячого водопостачання користуються 34 464 будинків, що становить 41,2%.

Головним виробником теплової енергії є опалювальні котельні. Їх частка у тепловому балансі СЦТ становить 55–63%. ТЕЦ загального користування – 18–25%, ТЕЦ підприємств – 8–10%. Встановлена теплова потужність джерел теплогенерації у 2015 році – 143,57 ГВт. На 2018 рік як паливо здебільшого використовують природний газ – 75%, кам'яне вугілля – 13%, альтернативні джерела енергії (переважно біомаса) – 12%.

Комбіноване виробництво електричної та теплової енергії в Україні здійснюють 12 ТЕС, 4 АЕС, 95 ТЕЦ загального користування, близько 400 локальних ТЕЦ і когенераційних установок. Зношеність основних фондів найбільших ТЕЦ України становить 70–80%, зношеність магістральних і розподільних мереж досягає 70% їх загальної протяжності, станом на 2019 рік 44,5% котлів знаходяться в експлуатації понад 30 років [32, 33].

Загальна протяжність теплових мереж СЦТ у двотрубному обчисленні у 2018 році – 20,6 тис. км. Чи не єдиним заходом в Україні з модернізації теплових мереж є заміна старих сталевих погано ізольованих трубопроводів на попередньо ізольовані трубопроводи. В країні діє цілий ряд сучасних потужних підприємств з виготовлення попередньо ізольованих трубопроводів. На жаль, заміні підлягають, як правило, аварійні ділянки теплових мереж. Станом на 2017 рік 69% теплових мереж потребують реконструкції [33, 34].

До технічних бар'єрів належать такі пункти:

- Відсутність статистичних даних щодо кількості наявних місцевих відновлювальних джерел енергії (в першу чергу, біомаси) та потенційної щорічної її кількості для можливості розраховувати найближчу та подальшу перспективу її впровадження.

- Відсутність інформації щодо джерел надлишкового тепла, а відповідно теплоти, яку можна використати для покриття потреб систем теплопостачання.

- Зношеність обладнання систем теплопостачання, зокрема котлів та теплових мереж.

- Неготовність існуючих теплових мереж до впровадження низькотемпературних теплоносіїв (малий діаметр, низькі потужності насосів, малі продуктивності теплообмінників тощо).

- Неготовність споживачів теплової енергії до впровадження низькотемпературних СЦТ (неутеплені будинки, значні інфільтраційні тепловтрати, відсутність поквартирного регулювання відпуску теплоти тощо).

- Існуючі теплові насоси не придатні для виробництва теплоносія з високою температурою.

- Відсутність промислового обладнання для накопичення тепла для роботи з переривчастими відновлювальними джерелами енергії в регіонах з помірним кліматом (денного та сезонного накопичення).

- Розвиток регіонів у низькотемпературних системах теплопостачання.

Фінансово-економічні можливості та бар'єри

В Україні з 2014 року була запроваджена Урядова програма «теплих кредитів» та кредитні програми від деяких банків. Програмами було передбачено придбання енергоефективного обладнання або матеріалів для фізичних осіб – власників приватних будинків або співвласників житлових будинків. Також за допомогою інвестицій Європейського банку реконструкції та розвитку було проведено модернізацію індивідуальних теплових пунктів.

3 липня 2021 року усі повноваження щодо регулювання інвестиційної діяльності у системах централізованого теплопостачання передані місцевим органам влади. Відповідно, саме місцеві органи влади повинні розробляти та реалізовувати інвестиційні програми для підвищення рівня надійності та забезпечення ефективної роботи систем централізованого теплопостачання.

Високий рівень зносу обладнання підприємств теплоенергетики, який наведений у технічних бар'єрах, потребує високої інвестиційної діяльності. Аналіз фінансової звітності за 2020 р. найбільших підприємств теплопостачання показав, що понад 75% найбільших виробників теплової енергії є збитковими [35]. Відсутність прибутку унеможливорює належне фінансування інвестиційної діяльності. Наслідком збитковості підприємств теплопостачання є також відсутність можливостей щодо залучення кредитних коштів. Ще однією проблемою підприємств теплоенергетики, які гальмують залучення інвестицій, є значні суми кредиторської та дебіторської заборгованості.

До фінансово-економічних бар'єрів належать:

- Відсутність показника, який визначає економічну доцільність використання централізованих систем теплопостачання у населених пунктах.
- Наявні кредитні програми в Україні не дозволили суттєво зменшити потужність теплогенерувальних підприємств.
- Збитковість підприємств теплоенергетики і значний рівень зносу обладнання не дозволяють сформувавши достатній інвестиційний ресурс.
- Недосконалість порядку планування інвестиційної діяльності підприємствами теплоенергетики.
- Ускладнені вимоги фінансування окремих заходів інвестиційних програм.
- Велика вартість електроенергії для теплогенерувальних підприємств для рентабельного впровадження теплових насосів.
- Відсутність на ринку готового обладнання промислових теплових насосних систем. При тендері відсутня конкуренція по виробниках, тому тендери не можна провести.
- Зростаючий попит на біомасу може зробити її дорожчою.
- Сезонне зберігання теплової енергії поки що не рентабельне.
- Недостатня розробленість питань оподаткування енергії, які сприяють впровадженню теплових насосів.

Оскільки існує досить багато бар'єрів для впровадження низькотемпературних систем централізованого теплопостачання, то доцільно провести поетапну модернізацію теплових мереж. На першому етапі доцільно запровадити такі системи у західних і центральних регіонах України для великих новозбудованих житлових комплексів, зовнішні огороження яких мають високі теплотехнічні характеристики. На другому етапі необхідно буде негайно орієнтуватися на сучасні рішення в галузі теплопостачання населених пунктів із застосуванням низькотемпературних систем при відновленні зруйнованих населених пунктів східних та південних регіонів України.

Висновки

Низькотемпературні системи централізованого теплопостачання мають ряд переваг: дозволяють зменшувати використання викопних видів палива та викиди парникових газів, впроваджувати відновлювальні та вторинні джерела енергії, спростити експлуатацію та технічне обслуговування будівель.

В даній статті встановлено, що в Україні існують передумови для запровадження низькотемпературних систем теплопостачання, зокрема кліматичні та фізико-географічні умови. Проте проведений аналіз показав, що в технічному та правовому відношенні Україна знаходиться на початковому етапі модернізації систем централізованого теплопостачання та існує ряд перешкод, які не дозволяють впроваджувати низькотемпературні системи в Україні.

Крім того, проведені аналітичні дослідження дозволили узагальнити можливості та бар'єри для впровадження низькотемпературних систем централізованого теплопостачання та встановити цілий ряд технічних, правових, соціальних та фінансово-економічних заходів, які перешкоджають їх впровадженню в Україні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Torabi R., Gomes Á., Morgado-Dias F. Electricity, Transportation, and Water provision on 100% Renewable Energy for Remote Areas. *Energies* 2023, vol. 16, P. 1–20.
2. Johannsen R. M., Mathiesen B. V., Kermeli K., Crijns-Graus W., Østergaard P. A. Exploring pathways to 100% renewable energy in European industry. *Energy* 2023, vol. 268. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126687>
3. Jepsen B. K. H., Haut T. W., Jradi M. Design, Modelling and Performance Evaluation of a Positive Energy District in a Danish Island. *Future Cities and Environment* 2022, vol. 8, № 1, P. 1–15.
4. Kaķis R., Polikarpova I., Pakere I., Blumberga D. Is It Possible to Obtain More Energy from Solar DHField? Interpretation of Solar DH System Data. *Environmental and Climate Technologies* 2021, vol. 25, № 1, P. 1284–1292.
5. Ruseļjuk P., Dedov A., Hlebnikov A., Lepiksaar K., Volkova A. Comparison of District Heating Supply Options for Different CHP Configurations. *Energies* 2023, vol. 16. <https://doi.org/10.3390/en16020603>
6. Sovacool B. K., Martiskainen M. Hot transformations: Governing rapid and deep household heating transitions in China, Denmark, Finland and the United Kingdom. *Energy Policy* 2020, vol. 139. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111330>
7. Gudmundsson O., Schmidt R.-R., Dyrelund A., Thorsen J. E. Economic comparison of 4GDH and 5GDH systems – Using a case study. *Energy* 2022, vol. 238. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.1216133>
8. Schweiger G., Kuttin F., Posch A. District Heating Systems: An Analysis of Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats of the 4GDH. *Energies* 2019, vol. 12. <https://doi.org/10.3390/en12244748>
9. Sorknæs P., Østergaard P. A., Thellufsen J. Z., Lund H., Nielsen S., Djørup S., Sperling K. The benefits of 4th generation district heating in a 100% renewable energy system. *Energy* 2020, vol. 213. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119030>
10. Карп, І. М., Нікітін, Є. Є., П'яних, К. Є., Сігал, О. І, Дубовський, С. В., Гелетуха, Г. Г., та ін. Стан та шляхи розвитку системи централізованого теплопостачання в Україні. Книга 1. Київ: Наукова думка, 2021, 264 с.

11. Фіалко Н., Тимченко М. Особливості систем централізованого теплопостачання України. Scientific Journal “Internauka” 2023, №3. <https://www.inter-nauka.com/uploads/public/16770687325286.pdf>
12. Redko I., Ujma A., Redko A., Pavlovskiy S., Redko O., Burda Y. Energy efficiency of buildings in the cities of Ukraine under the conditions of sustainable development of district heating systems. Energy and Buildings 2021, vol. 247. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110947>
13. Savchenko O., Savchenko Z. Estimation of solar water heating system operation for a residential building. Energy Engineering and Control Systems 2021, Vol. 7, № 1, P. 1–6.
14. Кузик М. П., Заяць М. Ф. Пасивна система сонячного теплопостачання. Науковий вісник НЛТУ України. 2019, т. 29, № 5. С. 111–114.
15. Savchenko O., Lis A. Estimation of efficiency of use of flat solar collectors in temperate climate regions. Proceedings of EcoComfort 2022, Lecture Notes in Civil Engineering 2023, vol. 290, P. 355–364.
16. Geletukha G., Zheliezna T., Bashtovyi A. Prospects for decarbonization of district heating in Ukraine. Thermophysics and Thermal Power Engineering 2021, vol. 43, № 3, P. 44–51.
17. Kyzym M., Kotliarov Y., Khaustova V. Analyzing the Centralized Heat Provision of Large Localities in Ukraine and Countries of the World. Business Inform 2021, vol. 9, № 524, P. 96–107.
18. Savchenko O., Zhelykh V., Yurkevych Y., Kozak K., Bahmet S. Alternative energy source for heating system of woodworking enterprise. Energy Engineering and Control Systems 2018, Vol. 4, № 1, P. 27–30.
19. Polivyanchuk A., Semenenko R., Kapustenko P., Klemeš J., Arsenyeva O. The efficiency of innovative technologies for transition to 4th generation of district heating systems in Ukraine. Energy 2022, vol. 263, №5. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125876>
20. Savchenko O., Yurkevych Y., Zhelykh V., Voznyak O. Review of schemes of geothermal district heating and recommendations for their use in Lviv region. Proceedings of EcoComfort 2022, Lecture Notes in Civil Engineering 2023, vol. 290, P. 344–354.
21. Awogbemi O., Kallon D.V. Valorization of agricultural wastes for biofuel applications. Heliyon 2022, vol. 8(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11117>
22. Janiszewska D., Ossowska L. The Role of Agricultural Biomass as a Renewable Energy Source in European Union Countries. Energies 2022, vol. 15. <https://doi.org/10.3390/en15186756>
23. Токарчук Д. М., Пришляк Н. В., Паламаренко Я. В. Стратегія поводження з відходами аграрних підприємств: раціональне поводження з відходами рослинництва, відходами тварин тваринним гноєм, агрохімічними відходами. Ефективна економіка 2021, №12, 15 с. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2021.12.104>
24. Wang L., Xie X. Review on the Application of Agricultural Waste Resources. Frontiers in Sustainable Development 2023, vol. 5, № 3, P. 51–54.
25. Savchenko O., Yurkevych Y., Voznyak O., Savchenko Z. Assessment of the possibility of transferring Ukrainian district heating systems to low-temperature coolants. Theory and Building Practice 2023, Vol. 5, № 1, P. 28–36.
26. Fritz M., Savin M., Aydemir A. Usage of excess heat for district heating – Analysis of enabling factors and barriers. Journal of Cleaner Production 2022, vol. 363. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132370>
27. Reda F., Ruggiero S., Auvinen K., Temmes A. Towards low-carbon district heating: investigating the socio-technical challenges of the urban energy transition. Smart Energy 2021, vol. 4. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100054>
28. District heat networks in the UK potential, barriers and opportunities. Loughborough: Energy Technologies Institute, 2018, 17 p.
29. Angelidis O., Ioannou A., Friedrich D., Thomson A., Falcone G. District heating and cooling networks with decentralised energy substations: Opportunities and barriers for holistic energy system decarbonisation. Energy 2023, vol. 269. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126740>

30. Zhelykh V., Savchenko O., Pashkevych V., Matushevych V. The geothermal ventilation of passive house. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym* 2015, Vol. 2, № 16, pp. 145–150.
31. Savchenko O., Yurkevych Y., Liubuska I. Spatial analysis of renewable energy sources in Lviv region. *Energy Engineering and Control Systems* 2023, Vol. 9, № 1, P. 22–30.
32. Демченко В. Г. Ефективні конструкції магістральних тепломереж, 2018, 4 с. https://www.researchgate.net/publication/325260129_EFEKTIVNI_KONSTRUKCII_MA_GISTRALNIH_TEPLOMEREZ.
33. Теплозабезпечення великих міст України: поточний стан і напрями модернізації : кол. моногр. / за ред. М. О. Кизима, С. І. Котлярова, Харків: ФОП Лібуркіна Л. М., 2021, 340 с.
34. Сістані Е. М., Ковальчук І., Ушилайтите-Шульте Л., фон Краузе-Кон М., Кабакова М., Жук О., Шмельхер С., Бондарук В. Посібник для України. Трансформація системи теплопостачання. Частина А: Цілі та загальні умови. Переклад: Д-р Юрій Сильвестров, Вид-во: Німецьке енергетичне агентство ГмБХ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2020, 48 с.
35. Пропозиція щодо вдосконалення державного регулювання інвестиційної діяльності в сфері теплоенергетики. Аналітична записка. Харків: Національна академія наук України, 2021. 21 с.

Стаття надійшла до редакції 01.09.2023 і прийнята до друку після рецензування 17.11.2023

REFERENCES

1. Torabi, R., Gomes, Á., & Morgado-Dias, F. (2023). Electricity, Transportation, and Water provision on 100% Renewable Energy for Remote Areas. *Energies*, 16, 1–20.
2. Johannsen, R. M., Mathiesen, B. V., Kermeli, K., Crijns-Graus, W., & Østergaard P. A. (2023). Exploring pathways to 100% renewable energy in European industry. *Energy*, 268, 126687. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126687>
3. Jepsen, B. K. H., Haut, T. W., & Jradi, M. (2022). Design, Modelling and Performance Evaluation of a Positive Energy District in a Danish Island. *Future Cities and Environment*, 8(1), 1–15.
4. Kaşis, R., Polikarpova, I., Pakere, I., & Blumberga, D. (2021). Is It Possible to Obtain More Energy from Solar DHField? Interpretation of Solar DH System Data. *Environmental and Climate Technologies*, 25(1), 1284–1292.
5. Ruseljuk, P., Dedov, A., Hlebnikov, A., Lepiksaar, K., & Volkova, A. (2023). Comparison of District Heating Supply Options for Different CHP Configurations. *Energies*, 16, 603. <https://doi.org/10.3390/en16020603>
6. Sovacool, B. K., & Martiskainen, M. (2020). Hot transformations: Governing rapid and deep household heating transitions in China, Denmark, Finland and the United Kingdom. *Energy Policy*, 139, 111330. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111330>
7. Gudmundsson, O., Schmidt, R.-R., Dyrelund, A., & Thorsen J. E. (2022). Economic comparison of 4GDH and 5GDH systems – Using a case study. *Energy*, 238, 1216133. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.1216133>
8. Schweiger, G., Kuttin, F., & Posch A. (2019). District Heating Systems: An Analysis of Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats of the 4GDH. *Energies*, 12, 4748. <https://doi.org/10.3390/en12244748>
9. Sorknæs, P., Østergaard, P. A., Thellufsen, J. Z., Lund, H., Nielsen, S., Djørup, S., & Sperling, K. (2020). The benefits of 4th generation district heating in a 100% renewable energy system. *Energy*, 213, 119030. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119030>
10. Karp, I. M., Nikitin, E. E., Pyanykh, K. E., Sigal, O. I., Dubovsky, S. V., Geletukha, G. G., & other (2021). Status and ways of development of the centralized heat supply system in Ukraine. Book 1. Kyiv: Naukova dumka, 264 p. [in Ukrainian].

11. Fialko, N., & Tymchenko, M. (2023). Features of district heating systems in Ukraine. *International Scientific Journal "Internauka"*, 3, 1–9 [in Ukrainian].
12. Redko, I., Ujma, A., Redko, A., Pavlovskiy, S., Redko, O., & Burda, Y. (2021). Energy efficiency of buildings in the cities of Ukraine under the conditions of sustainable development of district heating systems. *Energy and Buildings*, 247, 110947. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110947>
13. Savchenko, O., & Savchenko, Z. (2021). Estimation of solar water heating system operation for a residential building. *Energy Engineering and Control Systems*, 7(1), 1–6.
14. Kuzyk, M. P., Zayats, M. F. (2019). The passive system of the solar heat supply. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(5), 111–114.
15. Savchenko, O., & Lis, A. (2023). Estimation of efficiency of use of flat solar collectors in temperate climate regions. *Proceedings of EcoComfort 2022, Lecture Notes in Civil Engineering*, 290, 355–364.
16. Geletukha, G., Zheliezna, T., & Bashtovyi, A. (2021). Prospects for decarbonization of district heating in Ukraine. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 43(3), 44–51.
17. Kyzym, M., Kotliarov, Y., & Khaustova, V. (2021). Analyzing the Centralized Heat Provision of Large Localities in Ukraine and Countries of the World. *Business Inform*, 9(524), 96–107.
18. Savchenko, O., Zhelykh, V., Yurkevych, Y., Kozak, K., & Bahmet, S. (2018). Alternative energy source for heating system of woodworking enterprise. *Energy Engineering and Control Systems*, 4(1), 27–30.
19. Polivyanchuk, A., Semenenko, R., Kapustenko, P., Klemeš, J., & Arsenyeva, O. (2022). The efficiency of innovative technologies for transition to 4th generation of district heating systems in Ukraine. *Energy*, 263(5), 125876. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125876>
20. Savchenko, O., Yurkevych, Y., Zhelykh, V., & Voznyak, O. (2023). Review of schemes of geothermal district heating and recommendations for their use in Lviv region. *Proceedings of EcoComfort 2022, Lecture Notes in Civil Engineering*, 290, 344–354.
21. Awogbemi, O., & Kallon, D.V. (2022). Valorization of agricultural wastes for biofuel applications. *Heliyon*, 8(2), e11117. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11117>
22. Janiszewska, D., & Ossowska, L. (2022). The role of agricultural biomass as a renewable energy source in European Union countries. *Energies*, 15, 6756. <https://doi.org/10.3390/en15186756>
23. Tokarchuk, D., Pryshliak, N., & Palamarenko, Y. (2021). Strategy of waste management of agrarian enterprises: rational management of plant waste, waste of animal tissue, animal manure, agrochemical waste. *Efficient economy*, 12, 15. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2021.12.104> [in Ukrainian].
24. Wang, L., & Xie, X. (2023). Review on the application of agricultural waste resources. *Frontiers in Sustainable Development*, 5(3), 51–54.
25. Savchenko, O., Yurkevych, Y., Voznyak, O., & Savchenko, Z. (2023). Assessment of the possibility of transferring Ukrainian district heating systems to low-temperature coolants. *Theory and Building Practice*, 5(1), 28–36.
26. Fritz, M., Savin, M., & Aydemir, A. (2022). Usage of excess heat for district heating – Analysis of enabling factors and barriers. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132370. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132370>
27. Reda, F., Ruggiero, S., Auvinen, K., & Temmes, A. (2021). Towards low-carbon district heating: investigating the socio-technical challenges of the urban energy transition. *Smart Energy*, 4, 100054. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100054>
28. District heat networks in the UK potential, barriers and opportunities. Loughborough: Energy Technologies Institute, 2018, 17 p.
29. Angelidis, O., Ioannou, A., Friedrich, D., Thomson, A., & Falcone, G. (2023). District heating and cooling networks with decentralised energy substations: Opportunities and barriers for holistic energy system decarbonisation. *Energy*, 269, 126740. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126740>

30. Zhelykh, V., Savchenko, O., Pashkevych, V., & Matuskevych, V. (2015). The geothermal ventilation of passive house. *Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*, 2(16), 145–150.
31. Savchenko, O., Yurkevych, Y., & Liubuska, I. (2023). Spatial analysis of renewable energy sources in Lviv region. *Energy Engineering and Control Systems*, 9(1), 22–30.
32. Demchenko, V. (2018). Efficient designs of main heating networks. 4. https://www.researchgate.net/publication/325260129_EFEKTIVNI_KONSTRUKCII_MA_GISTRALNIH_TEPLOMEREZ. [in Ukrainian].
33. Kyzim, M. O., Kotlyarov, E. I. (Eds.). (2021). Heat supply of large cities of Ukraine: current state and directions of modernization. Kharkiv: FOP Liburkina L. M., 340 p. [in Ukrainian].
34. Sistani, E. M., Kovalchuk, I., Ushilaytite-Schulte, L., Krause-Kohn, M., Kabakova, M., Zhuk, O., Shmelher, S., & Bondaruk, V. (2020). Guide for Ukraine. Transformation of the heat supply system. Part A: Objectives and general conditions. Translation: Dr. Yuriy Sylvestrov, Publisher: Deutsche Energie-Agentur GmbH, 48 p. [in Ukrainian].
35. Proposal for improvement of state regulation of investment activities in the field of thermal energy. Analytical note. Kharkiv: National Academy of Sciences of Ukraine, 2021, 21 p. [in Ukrainian].

The article was received 01.09.2023 and was accepted after revision 17.11.2023

Савченко Олена Олексіївна

кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції Національного університету "Львівська політехніка"

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3767-380X> **e-mail:** o.savchenko@i.ua

Юркевич Юрій Степанович

кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції Національного університету "Львівська політехніка"

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8869-7759> **e-mail:** jurjurkev@gmail.com

Возняк Орест Тарасович

доктор технічних наук, професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції Національного університету "Львівська політехніка"

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6431-088X> **e-mail:** orest.voznyak@i.ua

UDK 628.3:712.3

Marina Kravchenko, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor of the Department of Environmental Protection and Labor Protection Technologies
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440> **e-mail:** marina-diek@ukr.net

Tetiana Tkachenko, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Environmental Protection and Labor Protection Technologies
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951> **e-mail:** tkachenkoknuba@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

CALCULATION OF THE ECOLOGICAL AND ECONOMIC EFFECT OF COLLECTING RAINWATER WITH «GREEN» ROOFS

Abstract. *The problem of the availability of fresh water on the planet is substantiated and the main concepts of sustainable rainwater management, such as: "SuDS", "BMP", "LID", "GI", as well as the concept of "green" structures, are analyzed. The classification and characteristics of the main types of «green» roofs, as well as their main ecological advantages, are presented. The global market for green roofs is shown growing from USD 1.4 billion in 2020 to a CAGR of 17% from 2020 to 2027, to reach USD 4.2 billion by 2027, and is projected to the extensive type will account for more than half of the total market share. The problem of high costs for installation and maintenance of environmentally friendly solutions for the roof is highlighted, therefore the aim of the work is to calculate the ecological and economic effect of collecting rainwater obtained from «green» roofs, in contrast to traditional roofs, and to conduct an economic analysis of social and cost benefits. what green roofs generate over their life cycle using the Net Present Value (NPV) method. The ecological and economic effect of collecting rainwater with «green» roofs was calculated for four cities of Ukraine: Kyiv, Kharkiv, Dnipro and Lviv. According to the results of calculations, the ecological effect of EE ranges from 394,000 m³ in the city of Dnipro and 450,000 m³ in Kharkiv to 567,000 m³ in Kyiv and 647,000 m³ in Lviv. The difference in the obtained calculations depends primarily on the selected area of «green» roofs, which was the lowest in the city of Dnipro (1.47 million m²) and the highest in the city of Kyiv (2.50 million m²), the values of which were chosen conditionally, as well as from the indicator of the average annual amount of precipitation, which is the highest in the city of Lviv (740 mm). The average value of the ecological effect of EE in relation to water retention in the analyzed cities was calculated, which was 515,000 m³. By multiplying EE and water price, the average E_CE for these 4 cities was determined to be \$380,500. It was concluded that the price of water is a decisive dependent variable in the calculation of E_CE. The calculation of the economic analysis of the profitability of investments in «green» roofs corresponding to 1 m² of intensive and extensive «green» roofs, which was carried out on the basis of the net present value method (NPV). It is shown that investment costs for «green» roofs include the following stages: design of «green» roofs; installation of the «green» roof system; installation of waterproofing; production of substrate for roofs and its installation; selection and planting of plants on the roof; installation of the irrigation system. It is substantiated that both intensive and extensive «green» roofs have a positive indicator of the net present value of NPV. The average NPV per 1 m² of an intensive «green» roof is more than 10 times higher than the average NPV per 1 m² of an extensive «green» roof.*

Key words: «green» roof; rainwater; maintenance; storage; management; net present value; ecological effect; economic effect.

М.В. Кравченко, Т.М. Ткаченко

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

РОЗРАХУНОК ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВІД ЗБИРАННЯ ДОЩОВОЇ ВОДИ «ЗЕЛЕНИМИ» ПОКРІВЛЯМИ

Анотація. Обґрунтовано проблему доступності прісної води на планеті та проаналізовано основні концепції сталого управління дощовими водами, такі як: «SuDS», «BMP», «LID», «GI», а також концепцію «зелених» конструкцій. Наведено класифікацію та характеристики основних типів «зелених» покрівель, а також їх основні екологічні переваги. Показано прогнозовану динаміку розвитку «зелених» дахів на світовому ринку, яка змінюватиметься з 1,4 мільярда доларів США у 2020 році до зростання на рівні 17% з 2020 по 2027 рік, досягнувши 4,2 мільярда доларів США до 2027 року, причому прогнозується, що екстенсивний тип становитиме більше половини загальної частки ринку. Висвітлено проблему високих витрат на встановлення та обслуговування екологічно чистих рішень для даху, тому поставлено мету роботи розрахувати екологічний та економічний ефект від збору дощової води, отриманої з «зелених» покрівель, на відміну від традиційної покрівлі, та провести економічний аналіз соціально-вартісних вигод, які «зелені» покрівлі генерують протягом свого життєвого циклу, використовуючи метод чистої приведеної вартості (NPV). Зроблено розрахунок еколого-економічного ефекту від збирання дощової води «зеленими» покрівлями для чотирьох міст України: Києва, Харкова, Дніпра та Львова. За результатами розрахунків екологічний ефект ЕЕ коливається в межах 394 000 м³ у Дніпрі та 450 000 м³ у Харкові до 567 000 м³ у Києві та 647 000 м³ у Львові. Відмінність в отриманих розрахунках залежить в першу чергу від обраної площі «зелених» покрівель, яка була найнижчою в місті Дніпро (1,47 млн м²) і найвищою в місті Київ (2,50 млн м²), значення яких були обрані умовно, а також від показника середньорічної кількості опадів, який є найвищим у місті Львів (740 мм). Розраховано середнє значення екологічного ефекту ЕЕ по відношенню до затримки води в проаналізованих містах, яке становило 515 000 м³. Шляхом множення ЕЕ і ціни води, визначено середній показник Е_{сЕ} для цих 4 міст, який склав 380 500 доларів США. Зроблено висновок, що ціна на воду є вирішальною залежною змінною при розрахунку Е_{сЕ}. Наведено розрахунок економічного аналізу прибутковості інвестицій у «зелені» покрівлі, що відповідають 1 м² інтенсивних і екстенсивних «зелених» дахів, який здійснювався на основі методики чистої приведеної вартості (NPV). Показано, що інвестиційні витрати на «зелені» покрівлі включають наступні стадії: проектування «зелених» дахів; монтаж системи «зеленої» покрівлі; встановлення гідроізоляції; виробництво субстрату для дахів та його укладання; підбір та посадка рослин на даху; монтаж системи поливу. Обґрунтовано, що як інтенсивні, так і екстенсивні «зелені» покрівлі мають позитивний показник чистої приведеної вартості NPV. Середній показник NPV на 1 м² інтенсивної «зеленої» покрівлі більший ніж в 10 разів перевищує середній NPV на 1 м² екстенсивного «зеленого» даху.

Ключові слова: «зелений» дах; дощові води; утримання; зберігання; управління; чиста приведена вартість; екологічний ефект; економічний ефект.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.34-48>

Вступ

Доступність прісної води по всій планеті знаходиться під загрозою через глобальні зміни клімату, обмежену наявність водних ресурсів і зростаючий попит на воду в багатьох сферах, таких як промисловість, сільське господарство, міське будівництво, технологічні процеси та забезпечення водою населення. Основні джерела поверхневого водопостачання все більше стикаються з проблемами через невизначеність, пов'язану з нерівномірним розподілом опадів як у просторовому, так і у часовому вимірах, а також через періодичні посухи, які стають довготривалими.

Прогнозується, що посухи та їх соціально-економічні наслідки будуть зростати у майбутньому, що суттєво ускладнить ситуацію з доступністю прісної води та розподілом її між різними регіонами. Попит на воду постійно розширюється через зростання кількості населення, індустріалізацію, розвиток сільського господарства, побутове використання та збільшення виробництва енергії.

Згідно з прогнозами, до 2025 року близько 1,8 мільярда людей можуть стати свідками абсолютного дефіциту води [1]. Також до 2035 року очікується різке зростання використання води для виробництва енергії і потреби сільського господарства. Урбанізація здійснює негативний вплив на гідрологічний цикл, призводячи до зменшення інфільтрації земель, з одного боку, та збільшення стоку – з іншого. Це прогнозує значні виклики з точки зору підтримки та відновлення зелених насаджень у межах міських територій. «Зелені» дахи сьогодні стають інноваційним рішенням для міст, оскільки вони не лише забезпечують естетичний вигляд та покращують якість довкілля, а й виконують ряд важливих екологічно-економічних функцій.

«Зелені» дахи стали популярним методом для відновлення біологічно активних поверхонь у міських областях та є зв'язуючим елементом між забудованими територіями, природними ресурсами і екосистемами в урбанізованому середовищі.

Концепція впровадження «зелених» дахів у міських районах є важливою частиною сталого управління зливовими водами, таким як [2]:

– «*SuDS*», стійкі міські дренажні системи (Sustainable Drainage Systems, Великобританія) – це підхід до управління дощовими водами, який включає використання методів, що знижують обсяг дощових стоків на місці, де вони утворюються, а також забезпечують очищення води;

– «*BMP*», найкращі практики управління (Best Management Practices) – це набір стратегій, методів, технік та процедур, які використовуються для зниження негативного впливу людської діяльності на водні ресурси та забезпечення сталого управління водними системами;

– «*LID*», розвиток з низьким рівнем впливу (Low Impact Development, США) – підхід до управління поверхневими стоками, який враховує гідрологічні процеси в природі та використовує принципи управління дощовими водами, які найбільш близькі до природних процесів;

– «*GI*», «зелена» інфраструктура (Green Infrastructure) – використовує природні або природоподібні елементи для управління стіканням води, очищення, збереження та використання водних ресурсів, забезпечуючи природний підхід до збалансованого водного господарства. Це може включати

створення «зелених» дахів, зелених насаджень, парків, ретенційних ставків, водних елементів, дренажних систем з використанням рослинності та інших природних матеріалів.

Згідно з даними Grand View Research [3], обсяг світового ринку «зелених» дахів оцінювався в 1,4 мільярда доларів США у 2020 році, а прогнозується, що він буде зростати зі складеними річними темпами зростання на рівні 17% з 2020 по 2027 рік, досягнувши 4,2 мільярда доларів США до 2027 року, причому екстенсивний тип становитиме більше половини загальної частки ринку.

Зазвичай «зелені» дахи класифікуються як інтенсивні або екстенсивні, залежно від їх призначення. Інтенсивні «зелені» дахи характеризуються глибоким середовищем для росту рослин, що змінюється від 20–100 см [4] і навіть до 200 см [5]. Рослинність на інтенсивних «зелених» дахах може бути різноманітною – від газонів і низькорослих чагарників до високих чагарників, перелісків і великих кущів, включаючи малі і великі дерева.

Завдяки інтенсивному росту рослин на таких дахах часто необхідно передбачати додаткове зрошення, що збільшує витрати на обслуговування. Однак інтенсивні «зелені» дахи є багатофункціональними та естетично привабливими, з широким спектром використання, включаючи створення додаткових житлових просторів [6].

Екстенсивні «зелені» покрівлі є альтернативою інтенсивним дахам та вважаються майже автономними [7]. Вони мають тонкий шар легкої підкладки (зазвичай ≤ 20 см) з високою пористістю і низьким вмістом органічних речовин [8], а також не потребують додаткового зрошення, тому вони частіше засаджуються низькорослими спільнотами рослин і мохами, що відрізняються стресостійкістю (наприклад, *Sedum spp.*, *Sempervivum spp.*).

Також автори [4] виділяють третій тип «зелених» дахів – напівінтенсивні, які є проміжним типом між інтенсивними і великими дахами за їхніми характеристиками товщини підкладки, видів рослинності і візуальними аспектами.

Провідні компанії постійно вдосконалюють дизайн і експлуатаційні характеристики «зелених» дахів, щоб зберегти міцну позицію на ринку, та інвестують у дослідження і розробки, щоб впроваджувати системи даху з низьким рівнем обслуговування, тим самим мінімізуючи загальні витрати. Крім того, компанії займаються зміцненням своїх ринкових позицій шляхом додавання нових і передових товарних пропозицій кінцевим споживачам. Деякі з провідних гравців на ринку «зелених» дахів сьогодні включають: *Optigreen International AG*, *Green Roof Blocks*, *Axter Ltd*, *Sempergreen*, *Bauder Ltd*, *ZinCo GmbH*.

Попри зростання інвестиційних витрат, «зелені» дахи стають все більш популярними, оскільки вони пропонують різноманітні соціальні та екологічні переваги, сприяючи сталому розвитку та підходу до життя, ближчого природному фону [9]. Проблема взаємозв'язку між економікою, суспільством та навколишнім середовищем залишається предметом міждисциплінарних досліджень, особливо у контексті стрімкого прогресу в напрямку кліматичної нейтральності.

Застосування «зелених» дахів сприяє стійкості будівель та поширенню їх використання в середовищі шляхом адаптації місцевої культури до стійких інноваційних технологій «зелених» конструкцій. Вони виконують важливу

роль у боротьбі зі зміною клімату та забезпечують збір води, що є необхідними аспектами для досягнення принципів сталого розвитку та подолання водної кризи.

Основними екологічними перевагами «зелених» дахів є: зменшення ефекту міського теплового острова [10], зниження забруднення внутрішнього [11] та міського повітря [12], регулювання споживання енергії будівлями [13, 14], управління якістю та кількістю зливових вод [2, 15], секвестрація CO₂ [16] та зниження рівня шумового забруднення [17], а також збільшення біологічно активних поверхонь [18].

Соціальні переваги включають покращення естетики та благоустрою, надання рекреаційних просторів, продовження терміну служби покрівельних матеріалів та зниження ризику повеней [19].

Ми проаналізували всі переваги «зелених» конструкцій, які досліджені та наведені в різних джерелах літератури, і систематизували їх на 3 основні категорії:

а) *соціальна: індивідуальний рівень* – покращення мікрокліматичних параметрів повітря всередині приміщень, шляхом компенсації екстремальних температур; зменшення інтенсивності відбитого випромінювання на прилеглі території; підвищення вологості, порівняно з поверхнею традиційного даху; покращення немікрокліматичних параметрів повітря всередині приміщень – зменшення рівня CO₂, ЛОС, твердих частинок, санування повітря; екранування приміщень від електромагнітних хвиль; шумозахист внутрішніми та зовнішніми «зеленими» конструкціями; покращення психологічного благополуччя, а також психічного та фізичного здоров'я людини. *Суспільний рівень* – покращення міського середовища та ландшафтного оформлення шляхом активного впровадження рослин, «зелених» елементів і зелених зон як акцентних, артикулюючих та створюючих простір елементів дизайну; підвищення відеоекологічного сприйняття; благоустрій міського простору для покращення життєвого та робочого середовища, шляхом виділення помітних і придатних для використання приватних і громадських відкритих просторів для безпосередньої житлової та робочої зони людей; зменшення фізичного, хімічного та біологічного навантаження на конструкцію покрівлі, зокрема на гідроізоляцію покрівлі, шляхом компенсації екстремальних температур, запобігання ультрафіолетовим випромінюванням і викидам.

б) *захист довкілля*: збереження та рекультивація зелених насаджень і відкритих просторів як компенсаційні заходи за меліоровані або забудовані землі; підтримання біорізноманіття рослинного світу; підтримання біорізноманіття птахів та тварин, організація шляхів міграції біоти; пом'якшення ефекту міського «острова тепла»; зменшення викидів парникових газів; затримка стоку, утримання дощової води та повторне її введення в природний цикл через випаровування та евапотранспірацію.

в) *економічна*: створення додаткових зелених насаджень та відкритого простору на одній земельній ділянці без додаткових витрат на викуп землі; зменшення коефіцієнта стоку дощової води, що знижує навантаження на міську каналізаційну систему; надання додаткових робочих місць; підвищення ефективності енергозбереження та зменшення витрат на опалення і кондиціонування приміщень завдяки термоізоляції та регулюванню мікроклімату; зниження витрат на обслуговування та ремонт конструкцій завдяки захисту від факторів зовнішнього впливу, таких як атмосферні умови;

збільшення цінності нерухомості та покращення її комерційної привабливості через додаткові функціональні можливості та естетичну привабливість; можливість отримання сертифікату системи рейтингу сталого розвитку, що сприяє лідерству в енергетичному та екологічному дизайні.

Однак, надання цих переваг часто стає під загрозу високим витратам на встановлення та обслуговування екологічно чистих рішень для даху, тому постає проблема в проведенні аналізу витрат і вигод від «зелених» покрівель для більш обґрунтованого прийняття рішень.

Основна частина

Різні економічні оцінки «зелених» покрівельних систем (у порівнянні з традиційними покрівельними системами) показують значні варіації результатів. З фінансової точки зору, деякі дослідники стверджують, що інвестиції в «зелені» дахи зазвичай призводять до фінансових втрат у розмірі 19–50%, з урахуванням їх переваг [8]. Однак, інші дослідження показують можливий приріст у 25% [20].

З економічного та соціально-екологічного поглядів, «зелені» дахи вважаються цікавими інвестиціями, що можуть призводити до прибутку в розмірі 24–40% [21].

Відмінність у результатах можна пояснити різними умовами навколишнього середовища, які сильно впливають на характеристики «зеленої» покрівлі (наприклад, географічні та метеорологічні умови тощо) [22], що ускладнює проведення точної кількісної оцінки переваг «зелених» дахів. Більше того, незважаючи на те, що неекономічні переваги (такі як соціальне благополуччя та збереження біорізноманіття), описані в літературі, не часто відносять до аналізу «зелених» дахів, оскільки їх конвертація у грошовий еквівалент є складною. Ці обставини роблять оцінку «зелених» дахів складним процесом, обумовленим обмеженою кількістю доступних даних та неточними методами.

Метою роботи було розрахувати екологічний та економічний ефект від збору дощової води, отриманої з «зелених» покрівель, на відміну від традиційної покрівлі, та провести економічний аналіз соціально-вартісних вигод, які «зелені» покрівлі генерують протягом свого життєвого циклу, використовуючи метод чистої приведеної вартості (NPV). Всі розрахунки та аналіз були проведені як щодо інтенсивних, так і до великих «зелених» покрівель в 4 найбільших містах України з населенням більше 500 000 жителів.

Відповідно до концепції водного сліду [23], дощова вода, зібрана та збережена в ґрунті у вигляді ґрунтової вологи або на «зелених» дахах, називається зеленим водним слідом.

В цілому, водоутримуюча здатність «зелених» покрівель є непостійною і коливається від низького відсотка до 100%, що залежить від таких факторів, як нахил «зеленої» покрівлі, товщина і тип підкладкового шару, вид рослинності, а також кількість води, накопиченої в її структурі, до наступних дощових опадів [2].

Порівнюючи традиційні дахи і «зелені» покрівлі, останні мають значний екологічний ефект, який сприяє збереженню та утриманню води в міських районах.

На сьогоднішній день в Україні збір дощової води ще не є широко поширеною та розвинутою практикою, порівняно з деякими іншими країнами, тому Україна має один з найнижчих показників зеленого водного сліду.

Водні ресурси в Україні у середній за водністю рік становлять 94 км³, але придатні для використання тільки 56 км³ [24].

Агломерації, що сильно впливають на навколишнє середовище, призводять до формування міського теплового острова, забруднення повітря, зменшення біорізноманіття, а також забруднення і деградації поверхневих і підземних водних ресурсів [25]. Впровадження «зелених» дахів в міських зонах сприяє пом'якшенню міського клімату та зниженню екстремальних погодних явищ, спричинених його зміною.

Дослідивши умови в деяких містах України, авторами було проведено економічний аналіз «зелених» дахів з метою оцінки їх ефективності та потенціалу для сталого впровадження в міському середовищі.

Україна має помірний, континентальний клімат, загальну чисельність населення 44,7 млн жителів і займає площу 603 628 км². Середньорічна кількість опадів на території України зменшується від 650–550 мм на півночі до 450–350 мм на Чорноморсько-Азовському узбережжі і від 750–700 мм на заході до 500–450 мм на сході.

Характеристика міст України наведена в таблиці 1. Ціна води для населення України у 2023 році для кожного міста опублікована на вебсторінці Міністерства фінансів України [26]. Використовувався обмінний курс 1 USD = 37,35 UAH.

Розрахунок еколого-економічного ефекту від збирання дощової води «зеленими» покрівлями проводився за методикою, запропонованою в роботі [27]. Виходячи з різниці між водою, зібраною на «зелених» покрівлях, і водою, що стікає з традиційного даху, екологічний ефект (*EE*) розраховувався як об'єм утриманої води (м³). *EE*, виражений в грошовій одиниці, розраховувався як економічний ефект (*E_CE*). Дані, необхідні для розрахунків, представлені в таблиці 1. За показник загального рівня утримання води «зеленими» покрівлями було обрано середнє значення, а саме 60% [2].

Табл. 1. Характеристика оцінюваних міст України

Місто України	Населення, млн	Загальна площа, км ²	Середньорічна кількість опадів, мм	Ціна на воду, USD/м ³
Київ	2,966	835,58	649	0,81
Харків	1,446	370,0	515	0,65
Дніпро	0,968	409,72	450	0,84
Львів	0,729	148,95	740	0,70

Коефіцієнт стоку для забудованих територій становить 0,95 [28], і прийнято припущення, що «зелені» покрівлі складають 1% площі міської забудови.

Розрахунки еколого-економічного ефекту проводилися за рівняннями (1) і (2):

$$EE = (A \cdot P \cdot R) - (A \cdot P \cdot \Psi), \quad (1)$$

$$E_{CE} = EE \cdot C, \quad (2)$$

де: EE – екологічний ефект, що залежить від об'єму води, який утримується «зеленою» покрівлею, м³/рік;

$E_C E$ – економічний (екологічний) ефект, що дорівнює грошовій вигоді від утриманої води на «зеленій» покрівлі, USD/рік;

A – площа поверхні «зеленої» покрівлі, м²;

P – середньорічна кількість опадів, м (табл. 1);

R – середній ступінь утримання води «зеленою» покрівлею, що прийнято для розрахунків 60%;

Ψ – коефіцієнт стоку для забудованих територій, прийнятий для розрахунків 0,95;

C – середня ціна води, USD/м³ (табл. 1).

В Україні сьогодні вже облаштовано близько 100 тис. м² «зелених» дахів. За оцінками фахівців, площа дахів, придатних для озеленення, тільки в Києві складає близько 2,5 млн м², а по всій країні площа «зелених» покрівель може становити більше 30 млн м² [29].

У розрахунках ми припустили, що площа «зелених» покрівель становить до 1% від площі обраних міст України, оскільки немає даних про території, які займають «зелені» покрівлі в Україні чи обраних для розрахунку містах.

Отже, в розрахунках були прийняті уявні значення площі «зелених» дахів у містах, а саме: Київ – 2,5 млн м²; Харків – 1,76 млн м²; Дніпро – 1,64 млн м²; Львів – 1,47 млн м².

Еколого-економічний вплив з урахуванням збереження води розраховується як різниця між кількістю дощової води, яка стікає з традиційної покрівлі (виміряна у метрах кубічних), і кількістю дощової води, яка затримується на «зеленій» покрівлі (вимірюється також у метрах кубічних). Обсяг дощової води, який утримується на «зеленій» покрівлі, обчислюється шляхом перемноження її площі в місті, середньорічної кількості опадів та коефіцієнта затримки води на «зеленій» покрівлі (60%). Обсяг стікання дощової води розраховується шляхом множення площі «зеленої» покрівлі в місті, кількості опадів та коефіцієнта стоку (0,95).

За результатами розрахунків, представленими в таблиці 2, екологічний ефект EE коливається в межах 394 000 м³ у Дніпрі та 450 000 м³ у Харкові до 567 000 м³ у Києві та 647 000 м³ у Львові. Відмінність в отриманих розрахунках залежить в основному від обраної площі «зелених» покрівель, яка була найнижчою в місті Дніпро (1,47 млн м²) і найвищою в місті Київ (2,50 млн м²), а також від показника середньорічної кількості опадів, який є найвищим у місті Львів (740 мм).

Отже, середнє значення екологічного ефекту EE по відношенню до затримки води в проаналізованих містах становило 515 000 м³.

Табл. 2. Результати розрахунків екологічного EE та економічного ефекту $E_C E$

Місто України	Екологічний ефект EE , тис. м ³	Економічний ефект $E_C E$, тис. USD
Київ	567	459,27
Харків	450	279,00
Дніпро	394	330,96
Львів	647	452,90

Зміна площі «зелених» покрівель може служити ключовим інструментом для проведення аналізу та оцінки економічних і екологічних наслідків, оскільки різноманітність площ «зелених» покрівель може впливати на рівень збереження води, покращення міського клімату, зниження стоку дощової води та вартості обслуговування, що в свою чергу може мати значущий вплив на здатність міст до сталого розвитку та забезпечення екологічної стійкості.

Подібно до екологічного ефекту EE , значення економічного ефекту $E_C E$ утримання води, розраховане на 1000 доларів США, було найвищим у Києві та Львові (таблиця 2). Так само найнижчий показник був у містах Дніпро та Харків. Середній показник $E_C E$ для цих 4 міст склав 380 500 доларів США. $E_C E$ водоутримання розраховується шляхом множення EE і ціни води. Тому ціна на воду є вирішальною залежною змінною при розрахунку $E_C E$. Середня ціна води у 2023 році серед проаналізованої кількості міст становить 0,75 USD/м³. Мешканці Харкова та Львова мають найнижчі ціни на воду (0,65 та 0,7 USD/м³), найвища ціна була в містах Київ та Дніпро (0,81 та 0,84 USD/м³).

Розрахунок економічного аналізу прибутковості інвестицій у «зелені» покрівлі, що відповідають 1 м² інтенсивних і екстенсивних «зелених» дахів, здійснювався на основі методики чистої приведеної вартості (NPV) [30] і обчислювався за допомогою стандартної формули (3):

$$NPV = -I + \frac{CF_1}{1+r} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (3)$$

де: I – початкові інвестиції, USD;

CF – грошовий потік, USD, який визначається як різниця між прибутками та витратами від «зелених» дахів;

r – ставка дисконтування, %;

t – час, роки.

Дані для розрахунку економічного аналізу на основі методики чистої приведеної вартості представлені в таблиці 3.

Табл. 3. Дані для розрахунку економічного аналізу на основі методики чистої приведеної вартості

Позиція	Значення	Посилання
1	2	3
Ставка дисконтування, r , %	5	[27]
Термін служби «зеленої» покрівлі, роки	40	[27]
Середня кількісна оцінка витрат на «зелені» покрівлі в Україні, USD/м²		
Інвестиційні витрати на інтенсивний «зелений» дах	71,65	[31, 32]
Інтенсивна висадка рослинного шару	16,5	[31, 32]
Середня вартість обслуговування інтенсивної «зеленої» покрівлі	4,95	[31, 32]
Інвестиційні витрати на екстенсивний «зелений» дах	42,2	[31, 32]
Екстенсивна висадка рослинного шару	5,36	[31, 32]
Середня вартість обслуговування екстенсивної «зеленої» покрівлі	1,65	[31, 32]

1	2	3
Переваги від «зелених» покрівель, USD/м²		
Поглинання оксиду азоту	0,11	[8]
Зменшення викидів вуглецю	0,00017	[16]
Пом'якшення ефекту теплового острова	0,81	[10]
Надання рекреаційних площ (середнє значення)	11,00	[19]
Зниження ризику повеней	0,0024	[19]
Перевага від створення середовища проживання	0,675	[18]
Теплова ізоляція (нагрівання та охолодження)	0,68	[13]
Утримання води	0,31–0,64	Обчислені за рівняннями (1) та (2)

Інвестиційні витрати на «зелені» покрівлі включають наступні стадії:

- проектування «зелених» дахів (візуалізація, фор ескізів, робоча документація);
- монтаж системи «зеленої» покрівлі (основа, шар утеплення, парозоляція, гідроізоляція, укладання системи озеленення дахів);
- гідроізоляція – влаштування шару гідроізоляції під «зелену» покрівлю з урахуванням усіх необхідних параметрів;
- виробництво субстрату для дахів та його укладання;
- підбір та посадка рослин на даху;
- система поливу – проектування та монтаж систем поливу для рослин на даху.

Вартість інвестицій в інтенсивний та екстенсивний «зелений» дах може відрізнятися в залежності від розміру даху, обраної технології, виду рослинності та рівня автоматизації.

Вартість утримання дощової води розраховувалася як добуток ціни на воду і середньорічної кількості опадів у містах, що оцінюються, та середнього ступеня затримки води на «зелених» дахах, обраного як 60%. Було обрано припущення, що інтенсивні «зелені» дахи вимагають щорічного догляду, а посадки рослинного покриву (0,5 «зеленого» даху у кожній області) кожні два роки. У випадку великих «зелених» покрівель враховувались витрати на обслуговування кожні два роки, тоді як витрати на посадку рослинності були понесені лише в перший рік [27].

Внутрішня норма прибутковості (IRR) – це відсоткова ставка, при якій чиста приведена вартість всіх грошових потоків (як позитивних, так і негативних) від проєкту або інвестиції стає рівною нулю. IRR використовується для оцінки привабливості проєкту або інвестиції. IRR може бути математично розрахована за рівнянням (4):

$$CF_0 + \frac{CF_1}{1+r} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (4)$$

де, CF – грошовий потік в останньому періоді часу (t), USD;

r – IRR, що підлягає розрахунку, %.

Дисконтований термін окупності (DPP) входить в динамічні методи оцінки прибутковості інвестиційних проєктів. Цей показник визначає період часу, за

який грошовий потік з інвестицій повністю компенсує всі витрати, зроблені під час проекту, і після чого він починає приносити чистий прибуток. Значення DPP визначається рівнянням (5):

$$DPP_k = \frac{Y_k + |NPV_{kY}|}{CF_{k(Y+1)}}, \quad (5)$$

де DPP_k – DPP, призначений для варіанта k , років;

Y_k – становить кількість повних років до визначення загальної прибутковості для варіанта k , років;

$CF_{k(Y+1)}$ – дисконтований грошовий потік у році $(Y + 1)$, призначений для варіанту k , USD;

NPV_{kY} – це невідшкодовані витрати, визначені на початок року $(Y + 1)$, призначені для варіанта k , USD.

Як видно з результатів економічного аналізу, представленого в таблиці 4, як інтенсивні, так і екстенсивні «зелені» покрівлі мають позитивний показник чистої приведеної вартості NPV . Однак інтенсивні «зелені» покрівлі є більш рентабельними, ніж екстенсивні, перш за все завдяки перевагам надання рекреаційного простору. Середній показник NPV на 1 м² інтенсивної «зеленої» покрівлі більш ніж в 10 разів перевищує середній NPV на 1 м² екстенсивного «зеленого» даху.

Табл. 4. Результати економічного аналізу для інтенсивної і екстенсивної «зеленої» покрівлі в різних містах України

Місто	Інтенсивна «зелена» покрівля			Екстенсивна «зелена» покрівля		
	Чиста приведена вартість, USD	Внутрішня норма прибутковості, %	Дисконтований термін окупності, рік	Чиста приведена вартість, USD	Внутрішня норма прибутковості, %	Дисконтований термін окупності, рік
Київ	46,59	5,89	5,12	2,84	0,89	11,15
Харків	39,37	4,08	6,87	2,04	0,94	11,48
Дніпро	42,32	4,72	6,24	2,25	0,85	11,56
Львів	58,37	5,94	5,03	3,21	1,07	11,02

Висновки

Отримані в рамках роботи результати вказують на те, що утримування дощової води «зеленими» дахами є екологічно та економічно вигідним протягом всього терміну їх експлуатації, тим самим підтверджуючи, що є сенс широко впроваджувати «зелені» покрівлі і, у багатьох випадках, підтримувати їх за допомогою державних ініціатив. Держава може відігравати важливу роль у сприянні широкому розвитку «зелених» покрівель, зокрема, шляхом надання фінансових пільг, субсидій або податкових пільг для тих, хто обирає цей екологічно стійкий підхід до будівництва. Також можна розглядати можливість включення «зелених» покрівель до планів і програм сталого розвитку міст, сприяючи зниженню негативного впливу антропогенних факторів на навколишнє середовище та водні ресурси. Такі кроки державної підтримки можуть сприяти впровадженню екологічно ефективних інновацій у будівництво та розвиток стійких міських інфраструктурних рішень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. The United Nations world water development report 2021: valuing water, 2021. 187 p.
2. Ткаченко, Т., Мілейковський, В., & Кравченко, М. (2023). Вплив «зелених» покрівель на управління дощовими водами: огляд наукових досліджень та перспективи використання. *Екологічна безпека та природокористування*, 46(2), 35–53. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.35-53>
3. Green Roof Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Extensive, Intensive), By Application (Residential, Commercial, Industrial), By Region (North America, APAC, MEA), And Segment Forecasts, 2020–2027. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/green-roof-market>
4. Li W.C., Yeung K.K.A. A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. *Int. J. Sustain. Built Environ.* 2014. Vol. 3. P. 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.05.001>
5. Vijayaraghavan K. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016. Vol. 57. P. 740–752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>
6. Oberndorfer E., Lundholm J., Bass B., Coffman R.R., Doshi H., Dunnett N., Rowe B. Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *BioScience* 2007. Vol. 57. P. 823–833. <https://doi.org/10.1641/B571005>
7. Bianchini F., Hewage K. Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: A lifecycle approach. *Build Environ.* 2012. Vol. 58. P. 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.005>
8. Carter T., Keeler A. Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *J. Environ. Manag.* 2008. Vol. 87. P. 350–363. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.024>
9. Yuliani S., Hardiman G., Setyowati E. Green-roof: The role of community in the substitution of green-space toward sustainable development. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. P. 1429. <https://doi.org/10.3390/su12041429>
10. Jiawei Fu, Karine Dupre, Silvia Tavares, David King, Zsuzsa Banhalmi-Zakar. Optimized greenery configuration to mitigate urban heat: A decade systematic review. *Frontiers of Architectural Research*. 2022. Volume 11, Issue 3. P. 466–491. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.12.005>
11. Fleck R., Pettit T.J., Douglas A.N., Irga P.J., Torpy F.R. Botanical biofiltration for reducing indoor air pollution. *Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction*. 2020. P. 305–327. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819481-2.00015-5>
12. Weerakkody U., Dover J.W., Mitchell P., Reiling K. Particulate Matter Pollution Capture by Leaves of Seventeen Living Wall Species with Special Reference to Rail-Traffic at a Metropolitan Station. *Urban Forestry and Urban Greening*. 2017. Vol. 27. P. 173–186. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.07.005>
13. Ткаченко Т.М., Мілейковський В.О. Дослідження теплопередачі в енергоефективних зелених покрівлях, Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання: Науково-технічний збірник. 2017. Вип. 21. С. 37–48. URL: <http://vothp.knuba.edu.ua/issue/view/10141>
14. Tkachenko T., Mileikovskiy V. Research of Cooling Effect of Vegetation Layer of Green Structures in Construction. *International scientific and practical conference. World science. Dubai*. 2017. Т.1. №7(23). С. 22–24. URL: <http://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/5694>
15. Кравченко М.В., Ткаченко Т.М., Мілейковський В.О. Модифікація «зеленої» покрівлі з використанням технічних рішень для зменшення негативного впливу зливових вод в міських умовах. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*, К.: КНУБА. 2023. № 43. С. 16–28. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.43.16-28>

16. Yujiro Hirano, Tomohiko Ihara, Kei Gomi, Tsuyoshi Fujita. Simulation-Based Evaluation of the Effect of Green Roofs in Office Building Districts on Mitigating the Urban Heat Island Effect and Reducing CO₂ Emissions. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, Iss. 7. 2055. <https://doi.org/10.3390/su11072055>
17. Azkorra Z., Pérez G., Coma J., Cabeza L.F., Bures S., Alvaro J.E., Erkoreka A., Urrestarazu M. Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system. *Applied Acoustics*. 2015. Vol. 89. P. 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.010>
18. Wooster E.I.F., Fleck R., Torpy F., Ramp D., Irga P.J. Urban green roofs promote metropolitan biodiversity: A comparative case study. *Building and Environment*. 2022. Volume 207, Part A. 108458. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108458>
19. Qiang Ji, Hye-Jeong Lee, Sung-Yoon Huh. Measuring the economic value of green roofing in South Korea: A contingent valuation approach. *Energy and Buildings*. 2022. Volume 261. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111975>
20. Fabricio Bianchini, Kasun Hewage. Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: A lifecycle approach. *Building and Environment*. 2012. Vol. 58. P. 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.005>
21. Inês Teotónio, Cristina Matos Silva, Carlos Oliveira Cruz. Eco-solutions for urban environments regeneration: The economic value of green roofs. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 199. P. 121–135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.084>
22. Aflaki et al. Urban heat island mitigation strategies: A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong. *Cities*. 2017. Vol. 62. P. 131–145. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.09.003>
23. Hoekstra A.Y. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, The Netherlands, 12–13 December 2002; Value of Water Research Report Series No. 12; UNESCO-IHE: Delft, The Netherlands, 2003.
24. Внутрішні води та водні ресурси України. [Електронний ресурс]. URL: <http://zno.academia.in.ua/mod/book/view.php?id=2439#:~:text=Поверхневі%20й%20підземні%20води%2C%20які,використання%20тільки%2056%20км3> [дата звернення 20.11.2023].
25. Borowski P.F. Nexus between water, energy, food and climate change as challenges facing the modern global, European and Polish economy. *AIMS Geosci*. 2020. Vol. 6. P. 397–421.
26. Тарифи на водопостачання та водовідведення. [Електронний ресурс]. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/water/> [дата звернення 20.11.2023].
27. Agnieszka Bus, Anna Szelałowska. Green Water from Green Roofs – The Ecological and Economic Effects. *Sustainability*. 2021. Vol. 13(4). 2403; <https://doi.org/10.3390/su13042403>
28. Методичні рекомендації із забезпечення ефективного відведення поверхневих вод. Наказ Міністерства з питань житлово-комунального господарства України 23.12.2010, N 470.
29. Землянка нашої мрії. Випуск №163. URL: <https://umoloda.kyiv.ua/number/2555/208/90236/> [дата звернення 20.11.2023].
30. Дикан М.І., Рубенок Т.М., Міщенко В.Я. Прогнозування ефективності інвестиційних проєктів з урахуванням факторів, що послаблюють негативний вплив. *Інвестиції. Інновації в економіці*, 2019. № 5. С. 137–141.
31. Зелена покрівля: проєктування та монтаж. [Електронний ресурс]. URL: https://euroroofing.ua/green_roofs/ [дата звернення 20.11.2023].
32. Системи «зелених» дахів. [Електронний ресурс]. URL: <https://zinc.com.ua/systems> [дата звернення 20.11.2023].

Стаття надійшла до редакції 08.10.2023 і прийнята до друку після рецензування 15.01.2024

REFERENCES

1. The United Nations world water development report 2021: valuing water (2021). 187 p.
2. Tkachenko, T. M., Mileikovskiy, V. O., & Kravchenko, M. V. (2023). Impact of «green» roofs on rainwater management: review of scientific research and perspectives of use. *Environmental Safety and Natural Resources*, 46(2), 35–53. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.35-53> [in Ukrainian].
3. Green Roof Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Extensive, Intensive), By Application (Residential, Commercial, Industrial), By Region (North America, APAC, MEA), And Segment Forecasts, 2020–2027. Retrieved from <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/green-roof-market>
4. Li, W.C., & Yeung, K.K.A. (2014). A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. *Int. J. Sustain. Built Environ*, 3, 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.05.001>
5. Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 57, 740–752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>
6. Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R.R., Doshi, H., Dunnett, N., & Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 57, 823–833. <https://doi.org/10.1641/B571005>
7. Bianchini, F., & Hewage, K. (2012). Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: A lifecycle approach. *Build Environ.*, 58, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.005>
8. Carter, T., & Keeler, A. (2008). Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *J. Environ. Manag.*, 87, 350–363. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.024>
9. Yuliani, S., Hardiman, G., & Setyowati, E. (2020). Green-roof: The role of community in the substitution of green-space toward sustainable development. *Sustainability*, 12, 1429. <https://doi.org/10.3390/su12041429>
10. Jiawei Fu, Karine Dupre, Silvia Tavares, David King, & Zsuzsa Banhalmi-Zakar (2022). Optimized greenery configuration to mitigate urban heat: A decade systematic review. *Frontiers of Architectural Research.*, 2022, 11, 3, 466-491. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.12.005>
11. Fleck, R., Pettit, T.J., Douglas, A.N., Irga, P.J., & Torpy, F.R. (2020). Botanical biofiltration for reducing indoor air pollution. *Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction*, 305–327. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819481-2.00015-5>
12. Weerakkody, U., Dover, J.W., Mitchell, P., & Reiling, K. (2017). Particulate Matter Pollution Capture by Leaves of Seventeen Living Wall Species with Special Reference to Rail-Traffic at a Metropolitan Station. *Urban Forestry and Urban Greening*, 27, 173–186. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.07.005>
13. Tkachenko, T.M., & Mileikovskiy, V.O. (2017). Doslidzhennia teploperedachi v enerhoefektyvnykh zelenykh pokrivliakh. *Ventylatsiia, osvittennia i teplohazopostachannia*, 21, 37-48 [in Ukraine]. <http://vothp.knuba.edu.ua/issue/view/10141>
14. Tkachenko, T., & Mileikovskiy, V. (2017). Research of Cooling Effect of Vegetation Layer of Green Structures in Construction. International scientific and practical conference. World science. Dubai, 1, №7(23), 22-24. <http://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/5694>
15. Kravchenko, M.V., Tkachenko, T.M., & Mileikovskiy, V.O. (2023). Modifikatsiia "zelenoi" pokrivli z vykorystanniam tekhnichnykh rishen dlia zmenshennia nehatyvnoho vplyvu zlyvovykh vod v miskykh umovakh. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliki*, 43, 16-28 [in Ukraine]. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.43.16-28>
16. Yujiro Hirano, Tomohiko Ihara, Kei Gomi, & Tsuyoshi Fujita. (2019). Simulation-Based Evaluation of the Effect of Green Roofs in Office Building Districts on Mitigating the Urban Heat Island Effect and Reducing CO₂ Emissions. *Sustainability*, 11, Iss. 7, 2055. <https://doi.org/10.3390/su11072055>

17. Azkorra, Z., Pérez, G., Coma, J., Cabeza, L.F., Bures, S., Alvaro, J.E., Erkoreka, A., & Urrestarazu, M. (2015). Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system. *Applied Acoustics*, 89, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.010>
18. Wooster, E.I.F., Fleck, R., Torpy, F., Ramp, D., & Irga, P.J. (2022). Urban green roofs promote metropolitan biodiversity: A comparative case study. *Building and Environment*, 207, 108458. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108458>
19. Qiang Ji, Hye-Jeong Lee, & Sung-Yoon Huh (2022). Measuring the economic value of green roofing in South Korea: A contingent valuation approach. *Energy and Buildings*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111975>
20. Fabricio Bianchini, & Kasun Hewage (2012). Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: A lifecycle approach. *Building and Environment*, 58, 152-162. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.005>
21. Inês Teotónio, Cristina Matos Silva, & Carlos Oliveira Cruz (2018). Eco-solutions for urban environments regeneration: The economic value of green roofs. *Journal of Cleaner Production*, 199, 121-135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.084>
22. Aflaki et al. (2017). Urban heat island mitigation strategies: A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong. *Cities*, 62, 131-145. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.09.003>
23. Hoekstra, A.Y. (2003). Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, The Netherlands, 12–13 December 2002; Value of Water Research Report Series No. 12; UNESCO-IHE: Delft, The Netherlands.
24. Vnutrishni vody ta vodni resursy Ukrainy. Retrieved November, 20, 2023 from <http://zno.academia.in.ua/mod/book/view.php?id=2439#:~:text=Поверхневі%20й%20підземні%20води%2C%20які,використання%20тільки%2056%20км3>
25. Borowski, P.F. (2020). Nexus between water, energy, food and climate change as challenges facing the modern global, European and Polish economy. *AIMS Geosci*, 6, 397–421.
26. Taryfy na vodopostachannia ta vodovidvedennia. Retrieved November, 20, 2023 from <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/water/>
27. Bus, A., & Szelągowska, A. (2021). Green Water from Green Roofs – The Ecological and Economic Effects. *Sustainability*, 13(4), 2403. <https://doi.org/10.3390/su13042403>
28. Metodichni rekomendatsii iz zabezpechennia efektyvnoho vidvedennia poverkhnivykh vod. Nakaz Ministerstva z pytan zhylovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. 23.12.2010, N 470.
29. Zemlianka nashoyi mriyi. Retrieved November, 20, 2023 from <https://umoloda.kyiv.ua/number/2555/208/90236/>
30. Dykan, M.I., Rubenok, T.M., Mishchenko, V.Ya. (2019). Prognozuvannia efektyvnosti investytsiynykh proektiv z urakhuvanniam faktoriv, shcho poslabliuiut' nehatyvnyi vplyv. *Innovatsii v ekonomitsi*, 5, 137–141 [in Ukraine].
31. Zelena pokrivlia: proektuvannia ta montazh. Retrieved November, 20, 2023 from https://euroroofing.ua/green_roofs/
32. Systemy "zelenykh" dakhiv. Retrieved from <https://zinco.com.ua/systems>

The article was received 08.10.2023 and was accepted after revision 15.01.2024

Кравченко Марина Василівна

к.т.н., доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440> **e-mail:** marina-diek@ukr.net

Ткаченко Тетяна Миколаївна

д.т.н., професор кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951> **e-mail:** tkachenkoknuba@gmail.com

УДК 551.583

Illia Sviatohorov, Post-Graduate of Department of Labour and Environment Protection
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-2793-1520> **e-mail:** tall.arh@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

INCREASED HEAT STRESS FOR THE POPULATION OF URBANIZED AREAS AGAINST THE BACKGROUND OF GLOBAL CLIMATE CHANGE

Abstract. *The combination of high temperature and relative humidity of the atmospheric air creates heat stress, which has a serious impact on the environment, society and the health of the population in urban areas. Using the example of the city of Kyiv, the paper investigated long-term changes in heat stress depending on global climate changes. Averaged monthly long-term climate data of the urban environment were studied, starting from 1981, based on monitoring data using the Copernicus Climate Change Service toolkit and data from the Borys Sreznevsky Central Geophysical Observatory. Predictive dynamics of temperature by conventional and wet bulb was investigated using OriginPro8 software. Data on the dependence of the frequency and unevenness of precipitation during the last decades are presented. The dependences of the value of the heat index (NI) on the temperature and air humidity for different observation periods were obtained. Over the past decade, Kyiv has seen a significant increase in average heat stress and the frequency of days and events with extreme heat stress. According to the obtained forecast estimates, in 2050 the heat index should increase by almost 30%, and the risk to the health of the population in the surrounding area and for workers in the open air will be interpreted as "high" levels at a relative humidity of 80%; "moderate" at a relative humidity of 50% and "low" at a relative humidity of 20%. The forecast temperature dynamics according to the conventional and according to the wet thermometer in the month of July at the end of different years is: 2021–2030 – 24.136 °C and 26.24 °C; 2030–2050 – 26.371 °C and 28.918 °C, respectively, with other equal conditions of the urban environment. An additional possibility of influence on the thermal dome appears already at the design stage, thanks to the variability of the placement of the projected buildings on the general plan, and the formation of individual buildings, in the correct area ratio green plantings to stone surfaces of facades and paving. The research data will be useful for the possible reduction of the size of the thermal dome over the city during the planning and reconstruction of the housing stock and the development of climate neutrality measures for the cities of Ukraine.*

Keywords: *urbanized areas; climate changes; heat dome; relative humidity; heat stress.*

I. Святогоров

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

ПОСИЛЕННЯ ТЕПЛОВОГО СТРЕСУ ДЛЯ НАСЕЛЕННЯ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ НА ФОНІ ГЛОБАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

Анотація. *Поєднання високої температури і відносної вологості атмосферного повітря створює тепловий стрес, що має серйозний вплив на навколишнє середовище, суспільство та здоров'я населення на урбанізованих*

територіях. На прикладі м. Києва в роботі було досліджено багаторічні зміни теплового стресу в залежності від глобальних кліматичних змін. Вивчалися осереднені місячні багаторічні кліматичні дані міського середовища, починаючи з 1981 року, на підставі моніторингових даних з використанням інструментарію Copernicus Climate Change Service та даних Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського. Прогнозна динаміка температури за звичайним та за вологим термометром була досліджена за допомогою програмного забезпечення OriginPro8. Наведено дані щодо залежності частоти та нерівномірності випадіння опадів протягом останніх десятиліть. Отримано залежності величини теплового індексу (HI) від температури та вологості повітря для різних періодів спостережень. Протягом останнього десятиліття в м. Києві спостерігалось значне збільшення середнього теплового стресу та частоти днів і подій із екстремальним тепловим стресом. За отриманими прогнозними оцінками, у 2050 році тепловий індекс має підвищитися майже на 30%, а ризик для здоров'я населення на прибудинковій території та для робітників відкритого повітря буде трактуватися рівнями «високий» при відносній вологості повітря 80%; «помірний» при відносній вологості повітря 50% і «низький» при відносній вологості повітря 20%. Прогнозна динаміка температури за звичайним та за вологим термометром у липні наприкінці різних періодів складає: 2021–2030 рр. – 24,136 °C і 26,24 °C; 2030–2050 рр. – 26,371 °C і 28,918 °C відповідно при інших рівних умовах міського середовища. Додаткова можливість впливу на тепловий купол з'являється вже на стадії проєктування, завдяки варіативності розміщення проєктованих будинків на генеральному плані і формоутворення окремих будівель, у правильному співвідношенні площі зелених насаджень до кам'яних поверхонь фасадів і заощення. Дані дослідження стануть в нагоді для можливого зменшення величини теплового куполу над містом при плануванні і реконструкції житлового фонду та розробці заходів кліматичної нейтральності міст України.

Ключові слова: урбанізовані території; кліматичні зміни; тепловий купол; відносна вологість; тепловий стрес.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.49-59>

Вступ

Глобальні зміни клімату і місцеві умови утворення теплового куполу над забудованими територіями все частіше створюють зростаючу загрозу хвиль спеки та теплового стресу для населення [1]. Людина реагує на підвищення теплового стресу навіть сильніше, ніж на відповідне підвищення температури повітря [2]. Прогнозується, що тепловий стрес продовжить посилюватися в найближчі десятиліття в умовах глобального потепління [3–5] та посилювати ефект міського теплового острова (УHI). Міські поверхні мають нижче альbedo і можуть нарощувати ефект нагрівання, поглинаючи більше сонячного випромінювання, понижуючи величину випаровування та охолодження поверхні [6]. Не треба також нехтувати фактом, що міські будівлі збільшують шорсткість поверхні, підсилюють опір тертя повітря та зменшують швидкість вітру на поверхні, таким чином перешкоджаючи конвективному охолодженню. В дослідженні [7] пропонується враховувати антропогенне виділення тепла транспортом, що пересувається містом.

Тепловий стрес, який відчуває населення міста, можна виміряти за індексом тепла (HI), що описує відчутну температуру, яку сприймає людське тіло, та

розрахункову в поєднанні з відносною вологістю і температурою повітря. Посилення теплового стресу створює проблеми як для житлових приміщень [8–10], так і відкритого повітря. Одним з наслідків цього є зниження продуктивності праці [11, 12].

Ефект кліматичних змін для здоров'я міського населення можна прослідкувати на прикладі змін теплового стресу з усередненням окремих факторів по території міста (щільності забудови, інфраструктури, транспортних мереж, теплових викидів в атмосферу тощо). Для українських міст дане дослідження набуває актуальності при їх післявоєнній відбудові та при розробці заходів кліматичної нейтральності.

Мета цієї роботи – на прикладі м. Києва дослідити зміни впливу глобальних кліматичних змін на урбанізованих територіях на здоров'я населення через значення величини теплового стресу з метою подальшого зменшення величини теплового куполу над містом при плануванні і реконструкції житлового фонду.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми

Кількісній оцінці ефектів міського теплового острова та комфорту людини для міст різного розміру в залежності від міської морфології присвячено ряд робіт закордонних авторів [13–17 та ін.]. На основі регресійного аналізу вимірних метеорологічних даних в цих роботах, автори оцінювали просторову зміну температури протягом тропічного дня. В даних роботах встановлено взаємозв'язок між нічним вимірним міським островом тепла та землекористуванням, рослинністю, масштабністю забудови, наявністю водних об'єктів. Так, наприклад, було встановлено, що міста з великими водоймами поблизу густонаселених міст є вразливими до високих нічних температур під час хвиль спеки. В дослідженні [16] робиться висновок, що урбанізація прискорює зростання теплового стресу в містах приблизно на 30% порівняно із заміськими територіями. В роботі [17] ефект міського теплового острова для міст Європи було розглянуто з використанням даних про земний покрив в поєднанні з даними дистанційного зондування температури поверхні землі.

Впровадження концепції кліматичної нейтральності м. Києва вимагає мінімізації ефекту теплового острова з одночасним підвищенням рівня комфортності міста в загальному рейтингу упорядкованості (EIU Global Livability Ranking) ще на стадії проєктування мікрорайонів та реконструкції [18]. У зв'язку з погіршенням загальної соціально-економічної ситуації в місті Києві, його становище у рейтингу EIU, яке характеризує комфортність життя протягом 2011–2015 років, значно погіршилось (з 91-го місця у 2011 р. до 132-го у 2015 р. із 140 міст світу).

Підвищення якості містобудівної діяльності з урахуванням потреб суспільства та сучасних європейських практик створення кліматично нейтральних технологій «зеленого» будівництва передбачено Стратегією розвитку Києва до 2035 року. При цьому є необхідність враховувати виклики, що пов'язані з війною. В процесі післявоєнної реконструкції міст значну увагу треба приділити заходам щодо пом'якшення наслідків клімату, зниження споживання енергії в будівлях та спорудах, збільшення частки комплексного використання відновлюваної енергії у будинках, нарощування потенціалу для «зелених» будівель. Невід'ємною складовою вирішення даної проблеми є встановлення залежностей між поступовими глобальними кліматичними

змінами і тепловим індексом зовнішнього повітря забудованих територій. В роботі [19] наведено ілюстрацію визначення температури за вологим термометром (W) як функції температури для різних рівнів відносної вологості. Показано, що нагрівання на 2°C навколишнього середовища призводить до збільшення W, якщо вологість висока та/або температура висока. Порогові значення W, що стосуються ризику для здоров'я людей, які працюють або тренуються в умовах тепла, описано в роботі [20].

Індекс тепла HI, зазвичай, розраховується за допомогою регресії Ротфуса [16]:

$$\begin{aligned} HI = & -8.784695 + 1.61139411 \times T - 2.338549 \times RH \\ & -0.14611605 \times T \times RH - 1.2308094 \times 10^{-2} \times T^2 \\ & -1.6424828 \times 10^{-2} \times RH^2 + 2.211732 \times 10^{-3} \times T^2 \times RH \\ & +7.2546 \times 10^{-4} \times T \times RH^2 + 3.582 \times 10^{-6} \times T^2 \times RH^2, \end{aligned} \quad (1)$$

де T – температура атмосферного повітря, а RH – відносна вологість, яку насправді сприймає людське тіло.

При проектуванні нових районів задля пом'якшення нічного спекотного стресу в містах та визначення районів, які піддаються ризику під час спеки, необхідно враховувати ефект поглинання сонячних променів поверхнею будівлі (як прозорою, так і непрозорою) та орієнтацію окремо взятої забудови на мапі місцевості. В енергетичний баланс будівлі, що складається на стадії проектування, включається складова сонячних надходжень [21]. Такий фактор впливу на цю складову, як кут розташування будівлі на місцевості, на сьогоднішній день враховано, на нашу думку, недостатньо.

Основні результати досліджень

З використанням інструментарію Copernicus Climate Change Service [22] нами було досліджено на прикладі м. Києва взаємозв'язок між середньомісячною температурою повітря та частотою і нерівномірністю опадів, вологістю повітря, значенням теплового стресу за періоди 1981–2010 та 2020–2021 роки.

Аналіз кліматичних даних за ці два зазначені періоди дозволив встановити кореляційні залежності між тепловим індексом HI та відносною вологістю за періоди 1981–2010 рр. та 2020–2021 рр. по м. Києву, що представлено графіками на рис. 1, які свідчать про збільшення індексу HI при зменшенні величини вологості повітря.

Аналіз багаторічної динаміки величини вологості атмосферного повітря в м. Києві свідчить про поступове її зниження на фоні прогнозного підвищення температурних показників.

Залежності індексу тепла (HI) від середньомісячної температури повітря за періоди 1981–2010 рр. та 2020–2021 рр. по м. Києву мають коефіцієнти кореляції відповідно 0,9167 і 0,995 (рис. 2). Збільшення величини HI спостерігається в літні місяці при підвищенні температурних показників в найбільш спекотні місяці року.

Графіки на рис. 1 і рис. 2 свідчать про те, що характер взаємозв'язку між величинами, що розглядаються, є постійним.

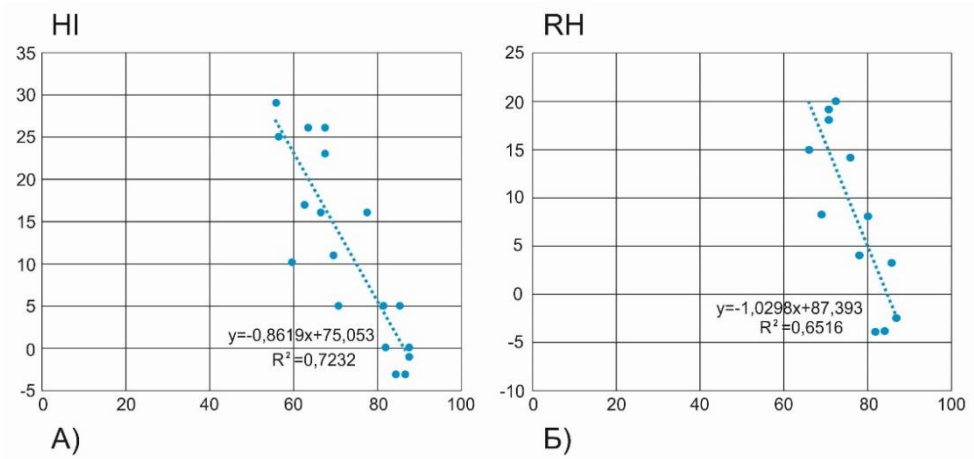


Рис. 1. Залежності величини теплового індексу HI від відносної вологості повітря. А) – період 1981–2010 рр.; Б) – період 2020–2021 рр.

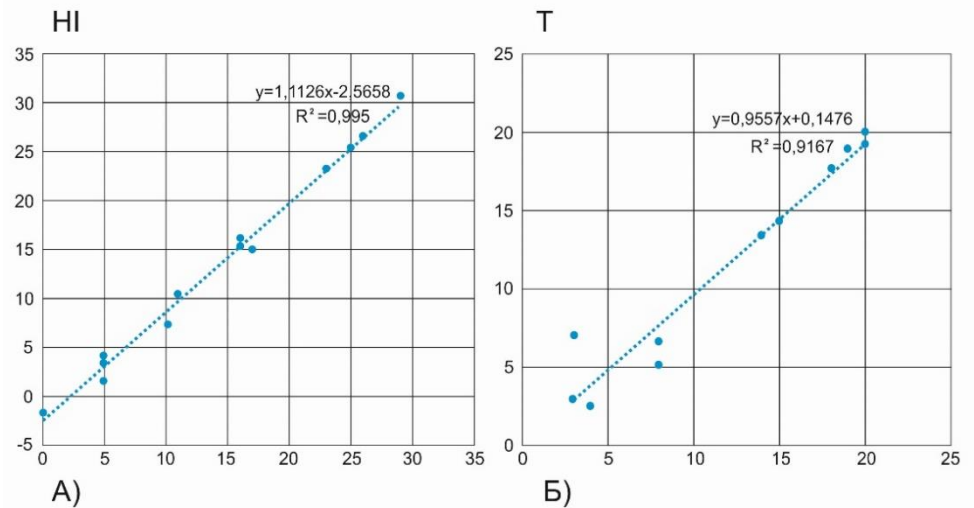


Рис. 2. Залежності величини теплового індексу HI від температури атмосферного повітря. А) – період 1981–2010 рр.; Б) – період 2020–2021 рр.

В таблиці 1 представлені середньомісячні величини опадів по м. Києву для періодів 1981–2020 рр. за даними [22], 1991–2020 рр. за даними [23], 2022 р. і 2023 р. за даними [23]. Узагальнена кліматична інформація за період 1991–2020 рр. є стандартним періодом та прийнята Всесвітньою метеорологічною організацією (ВМО) як період, який найбільш повно характеризує сучасні глобальні зміни клімату. Дані таблиці 1 свідчать про змінення частоти і нерівномірності випадіння опадів по території міста.

На рис. 3 представлено залежності температури за вологим термометром (W) відповідно до [19]. Значення W визначалося за спрощеною формулою:

$$W = 0,567T + 0,393e + 3,94, \tag{2}$$

де T – температура в °C, а e – тиск насиченої пари. На графіку також представлено межі екологічного ризику для здоров'я населення в залежності від величини W.

Таблиця 1. Динаміка середньомісячних значень кількості опадів по м. Києву, мм

місяць року	1981–2020 рр. за даними [22]	1991–2020 рр. за даними [23]	2022 р. за даними [23]	2023 р. за даними [23]
I	41	37	50	19
II	40	39	17	30
III	42	40	12	42
IV	54	42	42	102
V	66	65	33	1
VI	88	74	42	87
VII	95	68	40	136
VIII	64	56	60	19
IX	68	58	63	8
X	47	46	44	66
XI	52	46	99	98
XII	49	47	58	65
Разом	696	618	560	673

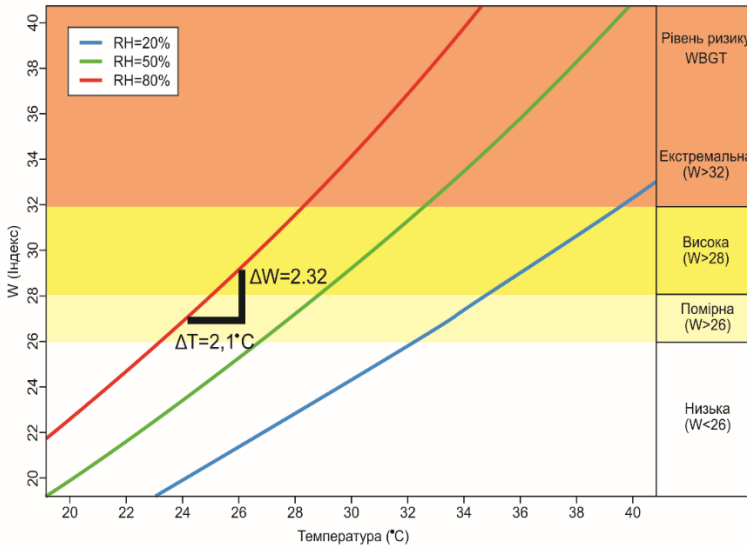


Рис. 3. Визначення температури (W) за вологим термометром як функції від різних рівнів відносної вологості відповідно до [19]. Рівні праворуч ілюструють рівень ризику, описаний у [20]

Відповідно до прогностичних оцінок підвищення температурних показників, що виконані за програмним забезпеченням OriginPro8, було побудовано графіки прогностичних оцінок температури за звичайним та вологим термометром в м. Києві в липні до 2050 року. Зокрема, на рис. 4 представлено прогностичну динаміку температури за звичайним термометром.

Прогнозна динаміка температури за звичайним та за вологим термометром у липні складає для різних періодів: 1991–2020 рр. – 21,9°C і 23,853°C; 2021–2030 рр. – 24,136°C і 26,24°C; 2030–2050 рр. – 26,371°C і 28,918°C відповідно при інших рівних умовах міського середовища. Слід відмітити, що ці значення показників розраховані на кінець окремих періодів, які розглядаються. При

нанесенні цих даних на графік, представлений на рис. 3, можна бачити, як ці кліматичні зміни будуть впливати на здоров'я населення міста.

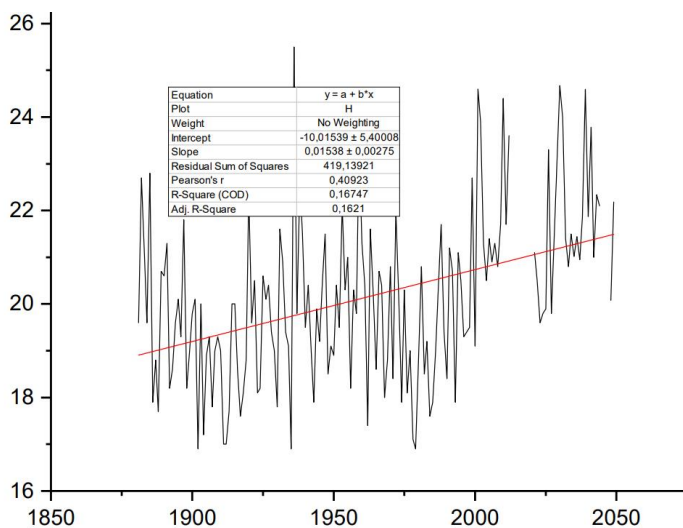


Рис. 4. Прогнозна динаміка температури в м. Київ до 2050 року

Так, при підвищенні прогнозних температурних показників на кінець 2030-х на 2,24^oC при інших рівних умовах і при вологості 80%, ризик для здоров'я населення м. Києва перейде від помірного до високого. При відносній вологості повітря 50% – від низького до помірного. А в умовах подальшого підвищення температурних показників – до високого. Наприкінці 2050 року навіть при вологості 50% ризик для здоров'я населення буде визначатися за наведеною шкалою як високий. Що стосується екстремальних температурних значень за липень місяць, то за період 1981–2010 рр. згідно з [22] вона дорівнювала 25^oC, за період 1991–2020 рр. згідно з [23] – 25,5^oC відповідно. При високій вологості категорія ризику для здоров'я населення при цьому визначається як висока.

Питання для обговорення

Даний аналіз щодо прогнозного впливу кліматичних умов на здоров'я населення м. Києва свідчить, що при плануванні забудови мають бути передбачені заходи для зменшення температурних показників атмосферного повітря в найбільш спекотні місяці року – тим самим сприяти послабленню теплового куполу над містом. Такими заходами можуть стати облаштування внутрішніх зелених двориків, недопущення утворення явища «міського каньйону», збільшення площі зелених насаджень у місті за рахунок порожніх ділянок, створення зелених дахів на існуючих будівлях, застосування в будівництві сучасних матеріалів покриття дахів зі значним коефіцієнтом відбиття сонячного тепла, застосування технологічних матеріалів замощення для відбиття сонячного тепла. Додаткова можливість впливу на тепловий купол з'являється завдяки варіативності розміщення проєктованих будинків на генеральному плані і формоутворення окремих будівель, з урахуванням їхньої

поверховості. За певною схемою забудови ділянок, у правильному співвідношенні площі зелених насаджень до кам'яних поверхонь фасадів і замощення можна впливати на температуру і рух повітря в міському середовищі. Дані позиції повинні бути враховані вже на стадії проектування.

Висновки

Поступове підвищення температури атмосферного повітря на урбанізованих територіях, яке сприяє утворенню теплового куполу над містом, значно впливає на величину теплового стресу населення. Зроблений в роботі аналіз температурних змін, починаючи з 1981 року, та прогнознi дані до 2050 року і, відповідно, ризик для здоров'я населення через величину НІ довів необхідність досліджень щодо зменшення температурного режиму прибудинкових територій.

Для комфортності проживання в містах необхідно впровадження як інноваційних енергоефективних технологій охолодження будівель в спекотні місяці року, так і заходи на прибудинковій території.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rosenzweig, C., Solecki, W., Romero-Lankao, P., Mehrotra, S., Dhakal, S., Bowman, T., & Ibrahim, S. A. (2015). *Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network (ARC3.2)*. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press.
2. Gasparrini, A., Guo, Y., Hashizume, M., Lavigne, E., Zanobetti, A., Schwartz, J., Tobias, A., Tong, S., Rocklöv, J., Forsberg, B., Leone, M., De Sario, M., Bell, M. L., Guo, Y.-L. L., Wu, C.-f., Kan, H., Yi, S.-M., de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, M., Saldiva, P. H. N., Honda, Y., Kim, H., & Armstrong, B. (2015). Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multicountry observational study. *Lancet*, 386 (9991), 369–375. URL: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)
3. Li, J., Chen, Y. D., Gan, T. Y., & Lau, N.-C. (2018). Elevated increases in human-perceived temperature under climate warming. *Nature Climate Change*, 8 (1), 43–47. URL: <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0036-2>
4. Matthews, T. K., Wilby, R. L., & Murphy, C. (2017). Communicating the deadly consequences of global warming for human heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(15), 3861–3866. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1617526114>
5. Zhao, L., Oppenheimer, M., Zhu, Q., Baldwin, J. W., Ebi, K. L., Bou-Zeid, E., Guan, K., & Liu, X. (2018). Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, 13 (3), 034003. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9f73>
6. Fujibe, F. (2003). Long-term surface wind changes in the Tokyo metropolitan area in the afternoon of sunny days in the warm season. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 81 (1), 141–149. URL: <https://doi.org/10.2151/jmsj.81.141>
7. Wang, Y., Li, Y., Sabatino, S. D., Martilli, A., & Chan, P. W. (2018). Effects of anthropogenic heat due to air-conditioning systems on an extreme high temperature event in Hong Kong. *Environmental Research Letters*, 13 (3), 034015. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa848>
8. Hatvani-Kovacs, G., Belusko, M., Skinner, N., Pockett, J., & Boland, J. (2016). Heat stress risk and resilience in the urban environment. *Sustainable Cities and Society*, 26, 278–288. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.019>
9. Karl, T. R., & Trenberth, K. E. (2003). Modern global climate change. *Science*, 302 (5651), 1719–1723. URL: <https://doi.org/10.1126/science.1090228>

10. Zhang, B., Gao, J.-x., & Yang, Y. (2014). The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: A case study in Beijing, China. *Building and Environment*, 76, 37–43. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.003>
11. Dunne, J. P., Stouffer, R. J., & John, J. G. (2013). Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Climate Change*, 3 (6), 563–566. URL: <https://doi.org/10.1038/nclimate1827>
12. Zander, K. K., Botzen, W. J. W., Oppermann, E., Kjellstrom, T., & Garnett, S. T. (2015). Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia. *Nature Climate Change*, 5 (7), 647–651. URL: <https://doi.org/10.1038/nclimate2623>
13. Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands. G. J. Steeneveld, S. Koopmans, B. G. Heusinkveld, L. W. A. van Hove, A. A. M. Holtslag. *JGR: Atmospheres*, Volume 116, Issue D20, <https://doi.org/10.1029/2011JD015988>
14. Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by urban land use. Bert G. Heusinkveld, G. J. Steeneveld, L. W. A. van Hove, C. M. J. Jacobs, A. A. M. Holtslag *JGR: Atmospheres*, Volume 119, Issue 2, p. 667-692 <https://doi.org/10.1002/2012JD019399>
15. Analysis of the Daytime Urban Heat Island Mechanism in East China. Congyuan Li, Ning Zhang. *JGR: Atmospheres*, Volume 126, Issue 12, e2020JD034066 <https://doi.org/10.1029/2020JD034066>
16. Increasing Heat Stress in Urban Areas of Eastern China: Acceleration by Urbanization. Ming Luo, Ngar-Cheung Lau. *Research Letter*, Volume 45, Issue 23, 2018, p. 13,060-13,069, <https://doi.org/10.1029/2018GL080306>
17. Statistical analysis describes urban heat island effect in Europe. Ernie Balcerak. *Eos*, Volume 95, Issue 6, Pages 60-60. <https://doi.org/10.1002/2014EO060010>
18. The Global Liveability Index 2023. URL: <https://www.eiu.com/n/campaigns/global-liveability-index-2023/>
19. Contrasting urban and rural heat stress responses to climate change. E. M. Fischer, K. W. Oleson, D. M. Lawrence, *Geophysical Research Letters*, *Climet*, Volume 39, Issue 3, 2012, <https://doi.org/10.1029/2011GL050576>
20. Willett, K. M., and S. C. Sherwood (2012), Exceedance of heat index thresholds for 15 regions under a warming climate using the wet-bulb globe temperature, *Int. J. Climatol.*, 32, 161–177, doi:10.1002/joc.2257
21. ДСТУ 9190:2022 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання.
22. Climate Data Store. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-era5-explorer>
23. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. URL: <http://www.cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/uk/diialnist/meteorolohichna/meteorolohichni-dani-meteostantsii-kyiv-na-9-hodynu-ranku>

Стаття надійшла до редакції 05.09.2023 і прийнята до друку після рецензування 29.11.2023

REFERENCES

1. Rosenzweig, C., Solecki, W., Romero-Lankao, P., Mehrotra, S., Dhakal, S., Bowman, T., & Ibrahim, S. A. (2015). *Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network (ARC3.2)*. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press.
2. Gasparrini, A., Guo, Y., Hashizume, M., Lavigne, E., Zanobetti, A., Schwartz, J., Tobias, A., Tong, S., Rocklöv, J., Forsberg, B., Leone, M., De Sario, M., Bell, M. L., Guo, Y.-L. L., Wu, C.-f., Kan, H., Yi, S.-M., de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, M.,

- Saldiva, P. H. N., Honda, Y., Kim, H., & Armstrong, B. (2015). Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multicountry observational study. *Lancet*, 386(9991), 369–375. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)
3. Li, J., Chen, Y. D., Gan, T. Y., & Lau, N.-C. (2018). Elevated increases in human-perceived temperature under climate warming. *Nature Climate Change*, 8(1), 43–47. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0036-2>
4. Matthews, T. K., Wilby, R. L., & Murphy, C. (2017). Communicating the deadly consequences of global warming for human heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(15), 3861–3866. <https://doi.org/10.1073/pnas.1617526114>
5. Zhao, L., Oppenheimer, M., Zhu, Q., Baldwin, J. W., Ebi, K. L., Bou-Zeid, E., Guan, K., & Liu, X. (2018). Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environmental Research Letters*, 13(3), 034003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9f73>
6. Fujibe, F. (2003). Long-term surface wind changes in the Tokyo metropolitan area in the afternoon of sunny days in the warm season. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 81(1), 141–149. <https://doi.org/10.2151/jmsj.81.141>
7. Wang, Y., Li, Y., Sabatino, S. D., Martilli, A., & Chan, P. W. (2018). Effects of anthropogenic heat due to air-conditioning systems on an extreme high temperature event in Hong Kong. *Environmental Research Letters*, 13(3), 034015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa848>
8. Hatvani-Kovacs, G., Belusko, M., Skinner, N., Pockett, J., & Boland, J. (2016). Heat stress risk and resilience in the urban environment. *Sustainable Cities and Society*, 26, 278–288. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.019>
9. Karl, T. R., & Trenberth, K. E. (2003). Modern global climate change. *Science*, 302(5651), 1719–1723. <https://doi.org/10.1126/science.1090228>
10. Zhang, B., Gao, J.-x., & Yang, Y. (2014). The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: A case study in Beijing, China. *Building and Environment*, 76, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.003>
11. Dunne, J. P., Stouffer, R. J., & John, J. G. (2013). Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Climate Change*, 3(6), 563–566. <https://doi.org/10.1038/nclimate1827>
12. Zander, K. K., Botzen, W. J. W., Oppermann, E., Kjellstrom, T., & Garnett, S. T. (2015). Heat stress causes substantial labour productivity loss in Australia. *Nature Climate Change*, 5(7), 647–651. <https://doi.org/10.1038/nclimate2623>
13. G. J. Steeneveld, S. Koopmans, B. G. Heusinkveld, L. W. A. van Hove, A. A. M. Holtslag (2011). Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands. *JGR: Atmospheres*, 116(D20), <https://doi.org/10.1029/2011JD015988>
14. G. J. Steeneveld, L. W. A. van Hove, C. M. J. Jacobs, A. A. M., Bert G. Heusinkveld (2012). Holtslag Spatial variability of the Rotterdam urban heat island as influenced by urban land use. *JGR: Atmospheres*, 119(2), 667-692. <https://doi.org/10.1002/2012JD019399>
15. Congyuan Li, Ning Zhang (2020). Analysis of the Daytime Urban Heat Island Mechanism in East China. *JGR: Atmospheres*, 126(12), e2020JD034066. <https://doi.org/10.1029/2020JD034066>
16. Ming Luo, Ngar-Cheung Lau (2018). Increasing Heat Stress in Urban Areas of Eastern China: Acceleration by Urbanization. *Research Letter*, 45(23), 13,060-13,069. <https://doi.org/10.1029/2018GL080306>
17. Balcerak, E. (2014). Statistical analysis describes urban heat island effect in Europe. *Eos*, 95(6), 60-60. <https://doi.org/10.1002/2014EO060010>
18. The Global Liveability Index 2023. Retrieved from <https://www.eiu.com/n/campaigns/global-liveability-index-2023/>
19. Fischer, E. M., Oleson, K. W., Lawrence, D. M. (2012). Contrasting urban and rural heat stress responses to climate change. *Geophysical Research Letters*, 39, 3. <https://doi.org/10.1029/2011GL050576>

20. Willett, K. M., and S. C. Sherwood (2012). Exceedance of heat index thresholds for 15 regions under a warming climate using the wet-bulb globe temperature. *Int. J. Climatol.*, 32, 161–177. <https://doi.org/10.1002/joc.2257>
21. DSTU 9190:2022 Energy efficiency of buildings. Method for calculating energy consumption during heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply.
22. Climate Data Store. Retrieved from <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/software/app-era5-explorer>
23. Borys Sreznevsky Central Geophysical Observatory. Retrieved from <http://www.cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/uk/diialnist/meteorolohichna/meteorolohichni-dani-meteostantsii-kyiv-na-9-hodynu-ranku>

The article was received 05.09.2023 and was accepted after revision 29.11.2023

Святогорів Ілля Олегович

аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці
Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-2793-1520> **e-mail:** tall.arh@gmail.com

UDK 628.84

Iryna Holiakova¹, Candidate of technical sciences, Associate Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7185-7202> **e-mail:** holiakova.ira@pdaba.edu.ua

Viktor Petrenko², Candidate of technical sciences, Associate Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4331-6844> **e-mail:** petrenko@meta.ua

Anatolii Petrenko¹, Candidate of technical sciences, Associate Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0406-9852> **e-mail:** petrenko_ao@pdaba.edu.ua

¹Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine

²HERZ Ukraine

ENERGY EFFICIENCY OF LIFE SUPPORT SYSTEMS OF BUILDINGS IN «GREEN CONSTRUCTION»

Abstract. *Purpose: develop an integrated air conditioning system with the environment, which will allow to reduce energy consumption due to lowering the temperature of air taken from outside from natural or artificial green areas. Methods: the basis of the solution to the task of developing an integrated system was the use of three well-known methods of greening of home territories: traditional, non-traditional and container. Because green spaces, in the warm period of the year, allow you to naturally reduce the parameters of the outside air, which are used for the needs of the building's ventilation and air conditioning systems. Findings: due to the complex use of all types of landscaping, it is possible to reduce the energy consumption for work of ventilation and air conditioning systems by reducing the temperature of air taken from the outside from natural or artificial green areas. Due to this, when developing integrated air conditioning systems, we can achieve: a decrease in the temperature of the supply air from the landscaping area, which will reduce not only the energy costs for cooling and humidification, but also the reduction of pollution of the supply air; when using trees and shrubs of certain breeds, which emit phytoncides and other beneficial secretions, in the outdoor air intake area, it will improve the quality of incoming air. Practical implication: the developed integrated air conditioning system with the environment will allow to reduce the influence of the outside air temperature on the indoor air temperature due to the integrated use of all types of greening. Originality: a review of literary sources showed that today the possibility of taking outside air from existing or artificially created green areas is not used in the design of ventilation and air conditioning systems.*

Keywords: *greening of the city; atmospheric air; microclimate; integrated system; energy efficiency; ventilation; air conditioning.*

© I.B. Голякова, В.О. Петренко, А.О. Петренко, 2024

І.В. Голякова¹, В.О. Петренко², А.О. Петренко¹

¹Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, м. Дніпро, Україна

²HERZ Україна

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДІВЕЛЬ В «ЗЕЛЕНОМУ БУДІВНИЦТВІ»

Анотація. Мета дослідження: розробити інтегровану систему кондиціонування з навколишнім середовищем, яка дозволить знизити енергетичну потребу будівлі за рахунок зниження температури повітря, що забирається ззовні з природних або штучних зелених зон. Метод: в основу рішення задачі з розробки інтегрованої системи лягло використання трьох відомих методів озеленення прибудинкових територій: традиційне, нетрадиційне та контейнерне. Оскільки зелені насадження, в теплий період року, дозволяють природним шляхом знизити параметри зовнішнього повітря, яке використовується для потреб систем вентиляції та кондиціонування повітря будівлі. Результат дослідження: за рахунок комплексного використання всіх видів озеленення можна знизити енергетичну потребу для роботи систем вентиляції та кондиціонування будівлі за рахунок зниження температури повітря, що забирається ззовні з природних або штучних зелених зон. Завдяки цьому при розробці інтегрованої системи кондиціонування ми можемо досягнути: зниження температури припливного повітря в зоні озеленення, що дозволить зменшити не тільки енергетичні затрати на охолодження і зволоження, а і забруднення припливного повітря; використання дерев і чагарників певних порід, які виділяють фітонциди та інші сприятливі виділення, в зоні забору зовнішнього повітря дозволить покращити якість припливного повітря. Практичне значення дослідження: розроблена інтегрована система кондиціонування з навколишнім середовищем дозволить знизити вплив температури зовнішнього повітря на температуру внутрішнього повітря приміщення за рахунок комплексного використання всіх видів озеленення. Оригінальність: огляд літературних джерел показав, що на сьогоднішній день при проектуванні систем вентиляції та кондиціонування не використовується можливість забору зовнішнього повітря з існуючих зелених зон або штучно створених зон.

Ключові слова: озеленення міста; атмосферне повітря; мікроклімат; інтегрована система; енергоефективність; вентиляція; кондиціонування повітря.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.60-67>

Вступ

Питання, яке розглядається в цій статті, полягає в оцінці впливу «зеленого будівництва» на енергоефективність систем життєзабезпечення будівель.

Аналіз літературних джерел [1–8] за темою статті показав, що параметри мікроклімату в приміщеннях залежать від багатьох факторів, серед яких приділяється не дуже багато уваги впливу зелених насаджень на температуру внутрішнього повітря приміщень.

Озеленення конструкцій будівлі та прибудинкових територій дозволяє покращувати як внутрішній, так і зовнішній клімат.

Основна частина

«Зелене будівництво» відіграє важливу роль у формуванні теплового режиму міста. Зелені насадження безпосередньо впливають на температуру і вологість зовнішнього повітря прилеглих територій. Людина може це відчувати, коли буде відсутній рух атмосферного повітря.

Відомо [1], що різниця температур зовнішнього повітря залежить від озеленення міста. Існують декілька видів озеленення [2]: традиційне, нетрадиційне та контейнерне.

Традиційний вид використовується для озеленення прибудинкових територій, парку, скверів тощо. Листя дерев і чагарників пропускає значну частину енергії, так як листя має певною мірою прозорість, також листя поглинає відому частку енергії і лише в дуже невеликій кількості випромінює її. У таблиці 1 зазначено кількість енергії, яку пропускають та відображають крони ряду порід дерев та чагарників.

Таблиця 1. Кількість енергії, яку пропускають та відображають крони ряду порід дерев та чагарників [1]

Дерева та чагарники	Пропущена енергія, % від отриманої	Відбита енергія, % від отриманої	Відношення відбитої енергії до отриманої (альbedo), %
Глід сибірський	1	62	37
Каштан кінський	10	38,5	51,5
Клен гостролистий	6	44	50
Липа кримська	5	72	23
Тополь бальзамічний	5,5	55	39,5
Черемха звичайна	2	78,5	19,5

Спеціальними дослідженнями встановлено [3, 4], що чим більший зелений масив, тим значніший його вплив на тепловий режим прилеглих територій. Дані таблиці 2 свідчать, що необхідно створювати у містах та селищах великі зелені масиви.

Використання в озелененні будівель другого виду, нетрадиційного, дозволить знизити температуру на поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій [4], що впливає на теплові витрати будівель в холодний і перехідний періоди року та на теплонадходження в теплий період року. Це досягається завдяки відбиттю сонячного випромінювання листям насадження та більшій товщині огорожувальної конструкції.

Озеленення огорожувальних конструкцій забудови та присадибних територій дозволяє покращити як внутрішній, так і зовнішній мікроклімат. Дослідження [3] показують, що в теплий період у зелених зонах спостерігається зниження температури та збільшення відносної вологості повітря. Як правило, в зелених зонах температура повітря нижче на 2–3⁰C, а в свою чергу вологість повітря на 5–8% вище порівняно з відкритими територіями. Завдяки цьому можна припускати, що озеленувальні насадження визначають не лише зовнішній вигляд міста та його естетичні переваги,

а й покращують санітарно-гігієнічні умови зовнішнього середовища, що впливає на комфорт людей.

Таблиця 2. Різниця температури зовнішнього повітря на відстані від зеленого масиву [1]

Розмір масиву, <i>га</i>	Перепад температур в $^{\circ}\text{C}$ на відстані від масиву, <i>м</i>									
	25		50		100		150		200	
	Повітря	Радіаційної	Повітря	Радіаційної	Повітря	Радіаційної	Повітря	Радіаційної	Повітря	Радіаційної
0,1	1	10	0,6	4	0,3	3	0	2	–	–
0,5	1,4	11	0,8	5	0,3	3	0,1	2,5	0,1	2
3	2	16	1,2	15	0,8	9	0,5	6	0,5	5
5	2,1	19	1,5	16	1	12	0,9	10	0,5	7,9

Оскільки зелені насадження дозволяють природним шляхом знизити параметри зовнішнього повітря, його можливо використовувати для потреб систем вентиляції та кондиціонування повітря будівлі. Взявши трохи незапиленого повітря, ми знижуємо навантаження на системи вентиляції та кондиціонування і тим самим підвищуємо їх енергоефективність, що є актуальним у світлі питань енергозбереження (рис. 1).



Рис. 1. Забір повітря із зеленої зони

За розрахунковою формулою 1, можна визначити теплові витрати через огорожувальну конструкцію. Порахувавши теплові витрати через 1 м^2 огорожувальної конструкції при зниженні температури зовнішнього повітря на 2°C , отримуємо різницю теплових витрат будівлі в 7%. Тобто завдяки

озелененню та збільшенню товщини огорожувальних конструкцій за рахунок рослин ми знижуємо потужність системи опалення, що робить систему енергоефективною.

$$Q = k \cdot F \cdot (t_e - t_i) \cdot (1 + \Sigma\beta) \cdot n, \text{Bm} . \quad (1)$$

За розрахунковою формулою 2, можна визначити продуктивність системи кондиціонування повітря. Як бачимо з формули, на продуктивність впливають не тільки теплонадходження від людей, обладнання, освітлення, а й сонячна радіація, величину якої ми можемо знизити за рахунок озеленення прибудинкової території або поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій.

$$\Phi_{int} = \Phi_{int,oc} + \Phi_{int,A} + \Phi_{int,L} + \Phi_{sol,k}, \text{Bm} . \quad (2)$$

Основне завдання третього виду озеленення – контейнерного озеленення – наситити зеленими насадженнями ті місця, де традиційна посадка рослин у ґрунт неможлива. Контейнери мають мобільність, тому такі рослинні композиції можна швидко монтувати, демонтувати або переміщати в залежності від потреб. Контейнерний вид озеленення також можна використовувати для забору повітря із зеленої зони.

Зниження потужності внутрішньо-будинкової систем вентиляції та кондиціонування можливо досягти за рахунок комплексного використання всіх видів озеленення.

Інтегровані системи кондиціонування з навколишнім середовищем – це комплексні рішення, які поєднують в собі елементи систем кондиціонування повітря, вентиляції та інших технологій для покращення якості повітря в приміщенні і зниження негативного впливу на навколишнє середовище.

Такі системи можуть використовувати різноманітні технології, включаючи:

- використання енергоефективних систем кондиціонування повітря, які забезпечують ефективне охолодження і обігрів приміщення без значного споживання енергії;

- використання систем вентиляції з високою ефективністю, які забезпечують постійну циркуляцію свіжого повітря в приміщенні і зменшують кількість шкідливих викидів у навколишнє середовище.

На рисунку 2 запропонована схема припливної підлого-стельової вентиляції та кондиціонування із забором повітря із зеленої зони [2].

Припливна підлого-стельова система вентиляції та кондиціонування розташовується між встановленою системою фальш підлоги (3), бетонними плитами перекриття (2) і підвісною стелею (4). Приплив повітря в приміщення здійснюється з двох зон.

З нижньої зони приміщення приплив здійснюється через розташовані в конструкції підлоги дифузори (5) безпосередньо в робочу зону приміщення.

З верхньої зони приміщення приплив здійснюється через розташовані в підшивній стелі суміжного нижнього поверху дифузори (6) безпосередньо у верхню зону приміщення.

Стельові та підлогові дифузори рекомендується розташовувати безпосередньо над/під робочою зоною людини, тому що швидкість повітря зменшується при віддаленні від дифузора (рис. 3).

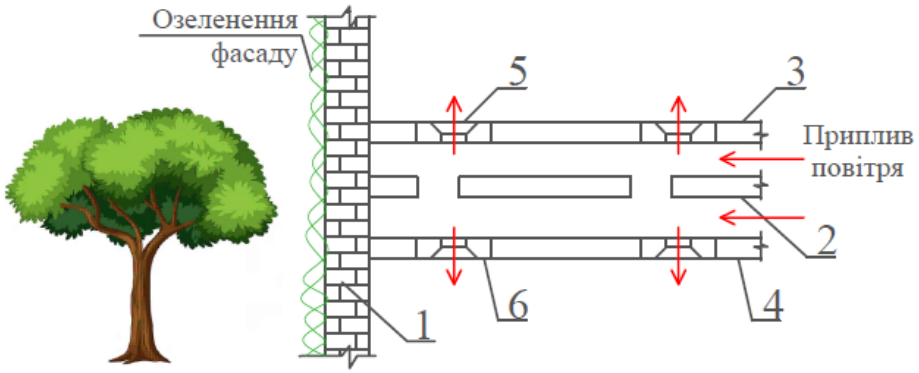


Рис. 2. Схема припливної підлого-стельової вентиляції та кондиціонування із забором повітря із зеленої зони: 1 – зовнішня огорожувальна конструкція (стіна); 2 – плита перекриття; 3 – покриття підлоги; 4 – підшивна стеля; 5 – підлоговий дифузор; 6 – стельовий дифузор

В припливну підлого-стельову систему вентиляції та кондиціонування повітря подається із зеленої зони, в якій температура повітря нижча, ніж у навколишньому середовищі, що дозволить знизити потужність системи на 7–10% залежно від ступеня озеленення будівлі та прибудинкової території.

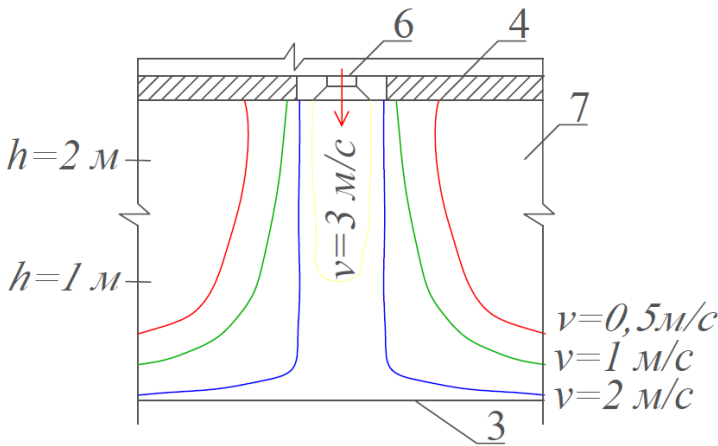


Рис. 3. Розподіл потоків вентиляційного повітря від стельового дифузора: 3 – покриття підлоги; 4 – підшивна стеля; 6 – стельовий дифузор; 7 – зона приміщення

Висновки

На підставі розглянутих видів озеленення та запропонованої інтегрованої системи кондиціонування можна вважати, що зелені насадження значно сприяють поліпшенню зовнішніх мікрокліматичних умов в теплий період року. За рахунок комплексного використання всіх видів озеленення можна знизити вплив температури зовнішнього повітря на температуру внутрішнього повітря приміщення за рахунок розробки інтегрованих систем кондиціонування з навколишнім середовищем.

За рахунок цього при розробці таких систем ми можемо досягнути:

1. Зниження температури припливного повітря із зони озеленення, що знизить енергетичні затрати на охолодження і зволоження.
2. Зниження забруднення припливного повітря.
3. При використанні дерев і кущів певних порід в зоні забору зовнішнього повітря, що виділяють фітонцидні й інші сприятливі виділення, покращити якість припливного повітря.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Петренко В.О. Повітряний, санітарний, кліматичний баланс регіону: Навчальний посібник. Дніпропетровськ: ДВНЗ ПДАБА, 2015. 63 с.
2. Зниження потужності системи кондиціювання будівлі за рахунок його озеленення та прибудинкової території / А.А. Михальченко, В.О. Петренко // Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості та транспорту. 2016. Вип. 3. С. 374–378.
3. Богова І.О., Теодоронський В.С. Озеленення населених міст: навчальний посібник, 2012.
4. Брагіна В.І., Белова З.Л., Сидоренко В.М. Вертикальне озеленення будівель та споруд. – Київ: Будівельник, 1980.
5. Визначення взаємозв'язків між показниками якості атмосферного повітря та стану середовища приміщень / С.З. Поліщук, В.Ю. Каспійцева, А.І. Кораблева // Охорона навколишнього середовища промислових регіонів як умова сталого розвитку України: матеріали VI Всеукр. наук.-практ. конф., 9–10 груд. 2010 р. 2010. С. 18–22.
6. Вплив сонячної радіації та вітру на параметри мікроклімату приміщень в Дніпропетровському регіоні / І.Л. Ветвицький, І.О. Колесник, В.Ю. Каспійцева, Б.А. Мартиненко // Матеріали конференції «Математичні проблеми технічної механіки». 2015. С. 119–120.
7. Орловська Ю.В. Зелене будівництво – шлях до стійкого розвитку урбоєкосистем на основі досвіду ЄС / Ю.В. Орловська, Т.Ф. Яковишина // Економічний простір. 2017. № 120. С. 216–223. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecpros_2017_120_22.
8. Вісім ідей для зелених міст України / авт. кол.: С. Романко, Н. Андрусевич. Київ: 350.org, 2020. 56 с.
9. ДБН В.2.5–67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціювання повітря. [Чинні від 2013-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд та ЖКГ України, 2013. 167 с.
10. ДСТУ-НБ В.1.2-27:27-2010. Будівельна кліматологія. [Чинні від 2011-11-01]. К. : Міненергійбуд України, 2011, 123 с.
11. ДСТУ EN 12831-1:2017. Енергоефективність будівель. Метод розрахунку проектного теплового навантаження. Частина 1. Теплове навантаження, Модуль М3-3 (EN 12831-1:2017, IDT) [Чинні від 2017-12-15].

Стаття надійшла до редакції 07.12.2023 і прийнята до друку після рецензування 21.02.2024

REFERENCES

1. Petrenko, V. (2015). Air, sanitary and climatic balance of the region. Dn-sk: PGASA [in Ukrainian].
2. Mihalchenko, A., & Petrenko, V. (2016). Reducing the power of the building's air conditioning system due to its landscaping and the surrounding area. *Modern innovative technologies for training engineering personnel for the mining industry and transport*, 3, 374-378 [in Ukrainian].

3. Bogova, I.O., & Teodoronskiy, V.S. (2012). Greening of inhabited cities: study guide [in Ukrainian].
4. Bragina, V.I., Belova, Z.L., & Sidorenko, V.M. (1980). Vertical greening of buildings and structures. Kyiv: Budivelnyk [in Russian].
5. Polischyk, S., Kaspiytseva, V., & Korabliova, A. (2010). Determination of interrelationships between the indicators of atmospheric air quality and the state of the indoor environment. In *Environmental protection of industrial regions as a condition for sustainable development of Ukraine: materials of the VI All-Ukrainian Scientific and Practical Conference* (pp. 18-22) [in Ukrainian].
6. Vetvitskiy, I., Kolesnik, I., Kaspiytseva, V., & Martinenko, B. (2015). The influence of solar radiation and wind on the microclimate parameters of premises in the Dnipropetrovsk region. In *Materials of the conference Mathematical problems of technical mechanics* (pp. 119-120) [in Ukrainian].
7. Orlovska, Yu., & Yakovyshyna, T.F. (2017). Green building – way to sustainable development of urban ecosystems on EU experience. *Economic space*, 120. 216-223 [in Ukrainian]. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecpros_2017_120_22
8. Romanko, S., & Andrysevich, N. (2020). Eight ideas for green cities of Ukraine. Kyiv [in Ukrainian].
9. DBN V.2.5–67:2013. (2013). Heating, ventilation and air conditioning. [Effective from 2013-09-01]. Kyiv: Ministry of Regional Construction and Housing and Housing of Ukraine [in Ukrainian].
10. DSTU-NB V.1.2-27:27-2010. (2011). Building climatology. [Effective from 2011-11-01]. K.: Ministry of Regional Development of Ukraine [in Ukrainian].
11. DSTU EN 12831-1:2017. (2017). Energy efficiency of buildings. The method of calculating the design thermal load. Part 1. Thermal load, Module M3-3 (EN 12831-1:2017, IDT) [Effective from 2017-12-15] [in Ukrainian].

The article was received 07.12.2023 and was accepted after revision 21.02.2024

Голякова Ірина Віталіївна

кандидат технічних наук, доцент кафедри опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

Адреса робоча: вул. Архітектора Олега Петрова, 24, м. Дніпро, Україна, 49600

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7185-7202> **e-mail:** holiakova.ira@pdaba.edu.ua

Петренко Віктор Олегович

кандидат технічних наук, доцент

Адреса робоча: вул. Михайла Бойчука, 41Б, м. Київ, Україна, 01014

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4331-6844> **e-mail:** petrenko@meta.ua

Петренко Анатолій Олегович

кандидат технічних наук, доцент кафедри опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

Адреса робоча: вул. Архітектора Олега Петрова, 24, м. Дніпро, Україна, 49600

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0406-9852> **e-mail:** petrenko_ao@pdaba.edu.ua

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

UDC 331.101.1

Vitaliy Tsopa¹, Doctor of Technical Sciences, Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4811-3712> **e-mail:** dr.tsopav@gmail.com

Oleg Kruzhilko², Doctor of Technical Sciences, senior researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8624-1515> **e-mail:** olkruzhilko@ukr.net

Serhii Cheberiachko³, Doctor of Technical Sciences, Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5866-4393> **e-mail:** cheberiachkoyi@ukr.net

Oleg Deryugin³, Candidate of Technical Science, Associate Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2456-7664> **e-mail:** deryugin_o@ukr.net

Tetiana Nehrii⁴, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4239-3178> **e-mail:** tetiana.nehrii@gmail.com

¹International Management Institute, Kyiv, Ukraine

²Technical University «Metinvest polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine

³Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

⁴Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR EVALUATING THE COMPREHENSIVE ERGONOMIC INDICATOR OF HAND TOOLS

Abstract. *Objective:* development of an algorithm for evaluating the comprehensive ergonomic indicator of hand tools to reduce physical strain during their use.

Materials and Methods. The algorithm development utilized the nomenclature of ergonomic indicators specified in DSTU 7895:2015 "Design and Ergonomics. Rules for evaluating the ergonomic level of quality of industrial products," which is categorized into two levels. The first level includes usability, control and monitoring convenience, product planning, serviceability, product hygiene, and safety. The second level involves physical and mental workload, fatigue, and compliance with anthropometric parameters.

Results. An algorithm for evaluating the comprehensive ergonomic indicator of hand tools has been developed, consisting of five steps: compiling a list of ergonomic characteristics of hand tools according to production tasks, selecting a group of five or more experts, conducting preliminary assessment of the product's comprehensive ergonomic indicator, analyzing expert assessments, discussing strengths and weaknesses, construction, and making decisions regarding the choice of weight coefficients, verifying the obtained results, and developing recommendations for application conditions for a specific product. The distinctive feature of the proposed algorithm lies in establishing weight coefficients of the tool's characteristics considering safety, convenience, and working conditions. The results of evaluating the comprehensive ergonomic indicator of angle grinders are

presented, allowing for the effectiveness of the developed algorithm based on feedback from study participants and providing recommendations for its further improvement.

The novelty lies in establishing correlations between two levels of ergonomic indicators through weight coefficients, allowing for the consideration of the complexity of working conditions, safety, and convenience of hand tools.

Practical value: checklists for processing score assessments based on established ergonomic criteria have been developed.

Keywords: hand tools; ergonomics; check-list; algorithm.

В.А. Цопа¹, О.Є. Кружилко², С.І. Чеберячко³, О.В. Дерюгін³, Т.О. Негрій⁴

¹Міжнародний інститут менеджменту, м. Київ, Україна

²ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка», м. Запоріжжя, Україна

³Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна

⁴Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОЦІНЮВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗНИКА ЕРГОНОМІЧНОСТІ РУЧНОГО ІНСТРУМЕНТУ

Анотація. Мета роботи – розробка алгоритму оцінювання комплексного ергономічного показника ручного інструменту, що дозволить зменшити фізичне навантаження при його використанні.

Матеріали і методи. Для розробки алгоритму була використана зазначена в ДСТУ 7895:2015 «Дизайн і ергономіка. Правила оцінювання ергономічного рівня якості промислової продукції» номенклатура ергономічних показників, які розподіляються на два рівні: перший включає зручність використання, керування, контролю та обслуговування, спланованість виробу, гігієнічність виробу і безпечність; другий – фізичне, психічне навантаження, стомлюваність та відповідність антропометричним параметрам.

Результати. Розроблено алгоритм оцінювання комплексного ергономічного показника ручного інструменту, що складається з п'яти кроків: складання переліку ергономічних характеристик ручного інструменту у відповідності до виробничих задач, підбір групи експертів з п'яти і більше фахівців, проведення попереднього оцінювання комплексного ергономічного показника виробу, аналіз отриманих оцінок експертами, обговорення сильних і слабких сторін, конструкції та прийняття рішення щодо вибору вагових коефіцієнтів, перевірка отриманих результатів, розробка рекомендацій щодо умов застосування для конкретного виробу. Особливість запропонованого алгоритму полягає у встановленні вагових коефіцієнтів значущості характеристик інструменту з урахуванням безпечності, зручності та умов праці. Наведено результати оцінювання комплексного ергономічного показника кутових шліфувальних машин, що дозволило встановити дієвість розробленого алгоритму за відгуками учасників дослідження і навести рекомендації щодо його подальшого вдосконалення.

Наукова новизна полягає у встановленні взаємозв'язків між двома рівнями ергономічних показників через вагові коефіцієнти, які дозволяють врахувати складність умов праці, безпечність та зручність ручного інструменту.

Практична цінність полягає у розробці чек-листів для опрацювання бальних оцінок за встановленими ергономічними критеріями.

Ключові слова: ручний інструмент; ергономіка; чек-лист; алгоритм.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.68-84>

Вступ

Незважаючи на світову тенденцію до збільшення автоматизації виробничих завдань, у деяких галузях народного господарства досі використовуються ручні інструменти. Наприклад сільське господарство, будівельна, лісова галузь та інші. Це призводить до появи виробничого травматизму та розвитку професійних захворювань опорно-рухового апарату. Потенційно небезпечні засоби виробництва – інструмент ударної дії та слюсарно-монтажний. Найчастіше під час роботи з таким інструментом працівники отримують травми очей і рук. Часто виникає прогресуюче пошкодження рук, ліктя, зап'ястя, кисті, нервів, сухожиль і сухожильних оболонок пальців. Вважається, що кількість травм можна зменшити, якщо ручні інструменти були розроблені з акцентом на комфорт користувача та принципи ергономічного дизайну. Тому виникає актуальна задача, яка пов'язана з розробкою простих дієвих механізмів для визначення комфортного використання ручного інструменту при виконанні конкретних виробничих завдань [1, 2].

Аналіз літературних джерел

Для ергономічної оцінки в статті [3] запропонований контрольний перелік основних характеристик ручних інструментів, для виявлення найбільш придатних при виконанні конкретного виробничого завдання у певних умовах праці. Автори запропонували чек-лист, який складався із шістнадцяти запитань, але чомусь не вказали, як вони пов'язані з умовами праці, що не дозволяє зробити відповідні рекомендації. В наступній роботі [4] автори зауважили, що виконання роботи в незручній позі та ще й з незручним інструментом значно збільшує ризик травмування опорно-рухового апарату працівників, тому було запропоновано удосконалити існуючий метод з оцінки ергономічності ручного інструменту "Questionnaire for hand tools (CQH)", з урахуванням антропометричних характеристик працівників. Разом з тим даний опитувальник враховує тільки особливості роботи виготовлення меблі. Цікава робота була запропонована автором [5], де розглядається взаємозв'язок ергономічності інструменту та питання безпеки, що дозволить приймати відповідні рішення для розробки та планування профілактичних заходів для зменшення нещасних випадків, травм і можливих захворювань. Найбільш критичним питанням в оцінюванні є визначення критеріїв для узгодження оціночних матриць. Автори роботи [6] зацікавились впливом вібрації електроінструменту на розвиток захворювань опорно-рухового апарату. На основі аналізу значної кількості інструментів встановили, що, на жаль, виробники чи дистриб'ютори надають обмежені дані про рівень вібрації при застосуванні інструменту, що призводить до розвитку захворювань, а головне, до помилок в оцінюванні ергономічних показників. Пропонують при визначенні ризику ввести коефіцієнт невизначеності, який допоможе врахувати експлуатаційні особливості ручного інструменту. Недоліком є відсутність шкали для оцінки цього коефіцієнта, що потребує проведення експериментальних досліджень. В результаті проведеного аналізу бачимо значну зацікавленість як в проведенні ергономічної оцінки ручного інструменту, так і розробці відповідних опитувальників, анкет, чек-листів, контрольних списків, які допомагають швидко виявити рівень ергономічності

ручного інструменту. З іншого боку, важливо даний процес пов'язати з оцінкою ергономічного ризику, що допоможе врахувати вплив конструкції ручного інструменту на розвиток професійних захворювань опорно-рухового апарату людини.

Мета роботи

Розробка алгоритму оцінювання комплексного ергономічного показника ручного інструменту, що дозволить зменшити фізичне навантаження при його використанні.

Матеріали і методи

Аналіз ергономічних показників знарядь праці полягає у вивченні структури діяльності людини під час використання виробу та його обслуговування; загальної організації, габаритно-компонувальних показників і характеристик виробу; характерного робочого положення людини чи робочої пози, яка відповідає процесу діяльності; ергономічних властивостей окремих елементів виробу та засобів діяльності: органів керування (розмірів та форми приводних елементів, значення зусиль, амплітуд, частоти використання тощо), засобів відображення інформації (загальної завантаженості інформаційного поля, розмірів і яскравості знаків, частоти миготіння сигналів, контрасту між знаками та фоном тощо); засобів організації та підтримування робочої пози (крісел, підлокітників, табуретів, підставок, підніжок, ослінчиків тощо); характеристик чинників, що їх генерує виріб у робочу зону та навколишнє середовище (шуму, вібрації, випромінювання, ультразвуку, нагрівання (охолодження), вологості, шкідливих речовини, пилу тощо). Для цього визначаються конкретні номенклатури ергономічних показників, за якими проводять спеціальну оцінку у дві стадії за рекомендаціями ДСТУ 7895:2015 «Дизайн і ергономіка. Правила оцінювання ергономічного рівня якості промислової продукції».

Номенклатура ергономічних показників розподіляється на два рівні. До першого відноситься: зручність використання, зручність керування і контролю, спланованість виробу, зручність обслуговування, гігієнічність виробу і безпечність. До другого – фізичне навантаження, психічне навантаження, розвиток стомлення та відповідність конструкції виробу та його елементів антропометричним характеристикам. При цьому показники другого рівня є складовими показників першого рівня.

Звідси, під час оцінювання, кожний експерт на підставі результатів порівняльного аналізу ергономічних властивостей поданих виробів оцінює їх ергономічні показники за п'ятибальною шкалою (1 – дуже погано, 2 – погано, 3 – задовільно, 4 – гарно, 5 – кращий) і заносить їх до спеціального опитувальника (табл. 1). Крім того, далі проводиться колективне обговорення й корегування попередніх результатів. При цьому експерти обмінюються думками щодо виставлених оцінок та їх обґрунтування. Якщо відхилення оцінок за кожним експертом від середньоарифметичної величини оцінки експертної групи на другій стадії не перевищує $\pm 0,5$ бала, то середню арифметичну величину оцінок для комплексного ергономічного показника у балах E_c розраховують за формулою

$$E_c = \frac{\sum_{j=1}^n E_j}{n}, \quad (1)$$

де E_c – загальна оцінка комплексного ергономічного показника виробу; E_j – оцінка комплексного ергономічного показника виробу, визначена експертом; n – кількість експертів.

Відмітимо, що в стандарті ДСТУ 3963 передбачено застосування для розрахунку комплексного ергономічного показника виробу вагових коефіцієнтів, які характеризують значимість конкретного ергономічного показника при користуванні виробом.

Таблиця 1. Чек-лист з оцінки комплексного ергономічного показника виробу

№	Технічний, ергономічний, експлуатаційний показник виробу	Оцінка у балах	
		загальна	складові
1	Зручність використання виробу за призначенням	e_1	
1.1	Фізичне навантаження		e_{11}
1.2	Психологічне навантаження (напруженість роботи)		e_{12}
1.3	Розвиток стомлення та зниження функційного стану користувача виробом за заданий час		e_{13}
1.4	Відповідність конструкції виробу та його елементів антропометричним характеристикам		e_{14}
$\text{Сума } E_{j21} = 0.03e_{11} + 0.06e_{12} + 0.04e_{13} + 0.06e_{14}$			
2	Зручність керування і контролю (керуваність)	e_2	
2.1	Зручність сприйняття інформації		e_{21}
2.2	Зручність конструкції органів керування виробом		e_{22}
2.3	Раціональність компоновання виробу		e_{23}
$\text{Сума } E_{j22} = 0.04e_{21} + 0.06e_{22} + 0.06e_{23}$			
3	Опанованість виробу	e_3	
3.1	Якість інформаційної моделі		e_{31}
3.2	Повнота та зручність інструкції з експлуатації виробу		e_{32}
$\text{Сума } E_{j23} = 0.03e_{31} + 0.06e_{32}$			
4	Зручність обслуговування виробу	e_4	
5	Гігієнічність виробу	e_5	
5.1	Фізичні чинники виробу		e_{51}
5.2	Хімічні чинники виробу		e_{52}
$\text{Сума } E_{j25} = 0.04e_{51} + 0.04e_{52}$			
6	Безпечність виробу	e_6	
$\text{Сума } E_{j1} = 0.19e_1 + 0.19e_2 + 0.19e_3 + 0.19e_4 + 0.12e_5 + 0.12e_6$			
$\text{Сума } E_{j2} = E_{j21} + E_{j22} + E_{j23} + E_{j25}$			
Оцінка комплексного ергономічного показника виробу, визначена експертом $E_j = E_{j1} + E_{j2}$			

Діапазон значень вагових коефіцієнтів для ергономічних показників наведено в додатку ДСТУ 3963. Їх значення встановлюються експертом, з урахуванням умов праці, величини навантаження, індивідуальних параметрів людини, яка буде ними користуватись. При цьому величина вагового коефіцієнта для ергономічних показників 1-го роду визначається як сума всіх вагових коефіцієнтів показників 2-го рівня, які входять до його складу.

Алгоритм з визначення комплексного ергономічного показника виробу.

Перший крок. Складання переліку ергономічних характеристик ручного інструменту у відповідності до виробничих задач, для яких він призначений на конкретному робочому місці (табл. 2). Визначення впливових чинників навколишнього середовища при роботі з виробом, що перевіряється (розмір місця виконання виробничого завдання, кліматичні параметри, гігієнічні показники, інтенсивність праці, важкість праці та інше), а також індивідуальні показники працівників (фізичний стан, рівень стресостійкості, антропометричні дані та інше), що дозволить уточнити вагові коефіцієнти.

Таблиця 2. Приклад номенклатури ергономічних показників якості за стандартом

№	Ергономічний показник
<i>Комплексні показники 1-го рівня</i>	
1	Зручність використання виробу за призначенням
2	Зручність керування і контролю (керуваність)
3	Опанованість виробу
4	Зручність обслуговування
5	Гігієнічність виробу та середовища робочої зони
6	Безпечність виробу
<i>Комплексні показники 2-го рівня</i>	
7	Фізичне навантаження
8	Психологічне навантаження (напруженість роботи)
9	Розвиток стомлення та зниження функційного стану користувача за заданий час
10	Відповідність конструкції виробу та його елементів антропометричним характеристикам

Другий крок. Підбір групи експертів з п'яти і більше фахівців, які будуть визначати бали за кожним ергономічним показником, зважаючи на свій досвід, освіту і підвищення кваліфікації. З їх даних формують відповідну таблицю.

Третій крок. Проведення оцінювання комплексного ергономічного показника виробу, що складається з визначення його складових за сумою ергономічних показників 1-го і 2-го роду. Щодо першого складника – розрахунку суми ергономічних показників 2-го роду – рекомендуємо скористатись відповідним чек-листом, який наведено в таблиці 3.

Зазначені показники в таблиці 3, за якими відбувається встановлення бальних оцінок, визначались з рекомендацій «Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», затверджених наказом МОЗ від 08.04.2014 № 248.

Визначення бальних оцінок за ергономічними показниками 1-го роду проводимо за чек-листом (табл. 4). В колонці 2 (табл. 4) наведені питання, відповідь на які дозволяє оцінити зазначені ергономічні показники за 5-бальною шкалою. В колонці 3 наведена максимальна кількість балів, яку можна поставити при позитивній відповіді. В колонках 4 і 5 зазначаємо бали при позитивній (5 балів) й негативній (1 бал) відповідях. В колонці 6 ставимо бали при відповіді «не знаю», «не впевнений» – 2-4 бали.

Таблиця 3. Чек-лист для визначення ергономічних показників 2-го роду

Позначення показника	Ергономічний показник 2-го роду	Бали				
		1	2	3	4	5
<i>I</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<i>e11</i>	Фізичне навантаження					
<i>e11.1</i>	Величина зусилля у порівнянні з максимальним, %	< 10	11-30	31-50	51-80	> 80
<i>e11.2</i>	Навантаження, яке відчувається при роботі з виробом	Не відчувається	Незначне	Помірне	Значне	Дуже значне
Середнє значення за ФН						
<i>e12</i>	Психологічне навантаження					
<i>e12.1</i>	Напруженість роботи через сприйняття сигналів від виробу	Відсутність необхідності сприйняття сигналів	Сприймання від виробу, але немає потреби в корекції дій	Сприймання сигналів з наступною корекцією дій та операцій	Сприймання сигналів з наступним порівнянням фактичних значень параметрів з їх номінальними	Сприймання сигналів з наступною комплексною оцінкою взаємопов'язаних параметрів
<i>e12.2</i>	Частота зусиль при використанні виробу	< 4	4-8	9-14	15-19	> 20
Середнє значення за ПН						
<i>e13</i>	Розвиток стомлення за заданий час					
<i>e13.1</i>	Характеристика втоми за визначений час	Малопомітна втома	Помітна	Очевидна	Сильна втома	Сильно виражена втома
<i>e13.2</i>	Швидкість рухів	розслаблені	повільні	нормальна	прискорена	Значно прискорена
Середнє значення за РС						
<i>e14</i>	Відповідність конструкції виробу антропометричним характеристикам					
<i>e14.1</i>	Діаметр рукоятки	110-130	105-110 або 130-140	100-105 або 140-155	-	< 100 або > 155
<i>e14.2</i>	Довжина рукоятки, зігнутої під певним кутом	100-120	90-100 або 120-135	80-90 або 135-150	-	< 80 або > 150
Середнє значення ВАП						
<i>e21</i>	Зручність сприйняття інформації					
<i>e21.1</i>	Якість сигналів					
Середнє значення ЗС						
<i>e22</i>	Зручність конструкції органів керування виробом					
<i>e22.1</i>	Можливість регулювання	Регулюється	Регулюються окремі елементи	-	-	Не регулюється
Середнє значення ЗК						

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5	6	7
<i>e23</i>	Раціональність компоновання виробу					
<i>e23.1</i>	Покриття поверхні	Передбачене покриття поверхні спеціальним матеріалом	Покриття поверхні передбачене, але існує ризик травмування	Покриття поверхні не передбачене, існує ризик травмування	-	Поверхня не покрита, існує ризик травмування
<i>e23.2</i>	Габарити					
Середнє значення РК						
<i>e31</i>	Якість інформаційної моделі					
<i>e31.1</i>	Якість надписів	чіткі, зрозумілі, впізнавані, запам'ятовуються	-	потрібен час, щоб зрозуміти їх	-	нечіткі, незрозумілі, невпізнавані, не запам'ятовуються
Середнє значення ЯІ						
<i>e32</i>	Повнота та зручність інструкції з експлуатації виробу					
<i>e32.1</i>						
<i>e51</i>	Фізичні чинники виробу					
<i>e51.1</i>	Шум, дБ	до 60	60-70	70-80	80-85	більше 85
<i>e51.2</i>	Вібрація, м/с ²	0-1	1-2	2-3	4-5	більше 5
<i>e51.3</i>	Температура нагрівання поверхні, °С	20-25	18-20, 25-28	15-18 28-30	13-15 30-33	10-15, 33-35
<i>e51.4</i>	Маса виробу (кг)	< 5	5-10	10-15	15-17	> 17
Середнє значення ГВ						
<i>e52</i>	Хімічні чинники виробу					
<i>e52.1</i>	Виділення аерозолів при роботі з виробом, мг/м ³	до 1	1-2	2-3	3-4	більше 4
Середнє значення ХЧ						

Таблиця 4. Опитувальник за ергономічними показниками 1-го роду

Позначення показника	Ергономічний показник	Загальна кількість балів	Так	Ні	Н/З
<i>e1</i>	Чи зручне використання виробу за призначенням?	5			
<i>e2</i>	Чи зручні керування й контроль при роботі з виробом?	5			
<i>e3</i>	Чи швидке опанування виробу?	5			
<i>e4</i>	Чи легке обслуговування виробу?	5			
<i>e5</i>	Чи створює виріб гігієнічне навантаження на робочу зону при його застосуванні?	5			
<i>e6</i>	Чи безпечний виріб при експлуатації?	5			

Четвертий крок. Аналіз отриманих оцінок, обговорення сильних і слабких сторін, конструкції та прийняття рішення щодо вибору вагових коефіцієнтів для ергономічних показників 2-го роду, які визначаються, виходячи зі складності робіт, зручності, комфортності та безпечності виробу та

знаходяться в діапазоні від 0 до 0,2. Наприклад, враховуючи умови праці, в яких виконує роботу працівник, виникає необхідність виділити ті чи інші характеристики ручного інструменту, які зможуть зменшити фізичне навантаження. Наприклад, роботи в умовах стисненого простору потребують ручних інструментів з незначними габаритними розмірами, тоді як цей параметр в інших умовах може бути навіть слабкою стороною через невідповідність антропометричним розмірам. Рекомендації щодо визначення вагових коефіцієнтів наведені в таблиці 5.

Таблиця 5. Характеристика вагових коефіцієнтів ергономічних показників 2-го роду

Величина вагового коефіцієнта	Характеристика
0,03	Ергономічний показник має незначний вплив на комфортність, зручність та безпеку при виконанні виробничого завдання з урахуванням умов праці, які відповідають допустимим гігієнічним нормативним показникам
0,06	Ергономічний показник має помірний вплив на комфортність, зручність та безпеку при виконанні виробничого завдання з урахуванням умов праці, які відповідають допустимим гігієнічним нормативним показникам
0,09	Ергономічний показник має суттєвий вплив на комфортність, зручність та безпеку при виконанні виробничого завдання з урахуванням умов праці, які відповідають допустимим гігієнічним нормативним показникам
0,12	Ергономічний показник має незначний вплив на комфортність, зручність та безпеку при виконанні виробничого завдання з урахуванням умов праці, які відповідають гігієнічним нормативним показникам за класом шкідливості 1-го ступеня
0,15	Ергономічний показник має помірний вплив на комфортність, зручність та безпеку при виконанні виробничого завдання з урахуванням умов праці, які відповідають гігієнічним нормативним показникам за класом шкідливості 1-го ступеня
0,18	Ергономічний показник має суттєвий вплив на комфортність, зручність та безпеку при виконанні виробничого завдання з урахуванням умов праці, які відповідають гігієнічним нормативним показникам за класом шкідливості 1-го ступеня
0,2	Ергономічний показник має незначний вплив на комфортність, зручність та безпеку при виконанні виробничого завдання з урахуванням умов праці, які відповідають гігієнічним нормативним показникам за класом шкідливості 2-го ступеня

Вагові коефіцієнти ергономічних показників 1-го роду визначаються як сума вагових коефіцієнтів ергономічних показників 2-го роду, виходячи з тієї умови, що їхня сума дорівнює одиниці. У разі відсутності останніх приймається середнє значення, що розраховане за всіма ваговими коефіцієнтами ергономічних показників 2-го роду.

Остаточна оцінка відбувається з урахуванням комплексних показників 2-го роду. Розрахунок загального (сумарного) комплексного ергономічного показника виробу виконується за всіма визначеними ергономічними показниками (табл. 1).

П'ятий крок. Перевірка отриманих результатів, розробка рекомендацій щодо умов застосування для конкретного виробу, визначення обмежень та сфери використання.

Для другого кроку необхідно підібрати групу експертів, які мають значний досвід роботи із інструментом, що оцінюється. Для проведення дослідження були сформовані три групи учасників: досвідчені працівники (стаж яких був більше 10 років); молоді працівники (стаж яких складав менше 5 років) і фахівці (викладачі з університетів, які спеціалізуються на ергономії). Загалом брали участь 24 добровольці.

Обробку матеріалу проводили із застосуванням додатку стандартного пакету програм Microsoft Office – Excel 2010. Отримані дані мали нормальний закон розподілу ймовірностей. Кількість спостережень була достатньою для отримання незміщених оцінок середньоквадратичного відхилення (δ). Для порівняння середніх величин кількісних показників при нормальному розподіленні використовували критерій Ст'юдента. Достовірним вважали рівень значущості $p < 0,05$ з надійністю 95%.

Для наведення прикладу з оцінки ергономічності ручного інструменту підібрали три кутові шліфувальні машинки (рис. 1). Їх технічні характеристики наведені в таблиці 6.



Рис. 1. Типи кутових шліфувальних машин для проведення дослідження з оцінки комплексного ергономічного показника: Bosch GWS 14-125 (1); WEV 15-125 Quick (2); STURM 1.9кВт (3)

Таблиця 6. Експлуатаційні характеристики кутових шліфувальних машин

Експлуатаційні характеристики	Тип кутової шліфувальної машини		
	Bosch GWS 14-125	WEV 15-125 Quick	STURM 1.9кВт
Потужність	1,4 кВ	1,5 кВ	1,9 кВТ
Вага	2,2 кг	2,5 кг	3,1 кг
Кількість оборотів холостого ходу	7500 об/хв	2800-11000 об/хв	8700 об/хв
Регулювання обертів	Є	Є	Немає
Плавний пуск	Немає	Є	Є
Захист від випадкового ввімкнення	Є	Є	Ні
Запобіжна муфта	Є	Є	Немає
Безключова заміна диску	Немає	Є	Немає
Захист від вібрації	Немає	Антивібраційна додаткова рукоятка	Немає
Діаметр диску	125 мм	125 мм	180 мм

Результати дослідження

Приклад оцінки показників ергономічності ручного інструменту другого роду наведено в таблиці 7. В таблиці 8 наведено приклад опитування експертів щодо показників ергономічності першого роду. Підсумковий розрахунок комплексного показника ергономічності виробу – таблиця 9. Вагові коефіцієнти для розрахунку кількості балів за групами ергономічних показників другого роду були визначені у відповідності до рекомендацій таблиці 5, зважаючи, що кутові шліфувальні машини є одними із найнебезпечніших ручних інструментів, які потребують мінімального навантаження, максимального інформаційного супроводу, зручності й відповідності антропометричним параметрам користувачів. Було прийнято, що умови праці відповідають допустимим умовам праці за гігієнічною класифікацією.

Таблиця 7. Результати визначення оцінок за ергономічними показниками 2-го роду

№	Ергономічний показник 2-го роду	Тип кутової шліфувальної машини		
		Bosch GWS 14-125	WEV 15-125 Quick	STURM 1.9кВт
1	2	3	4	5
e_{11}	Фізичне навантаження	3	2	4
e_{12}	Психологічне навантаження	2	2	2
e_{13}	Розвиток стомлення та зниження функційного стану користувача виробом за заданий час	3	4	3
e_{14}	Відповідність конструкції антропометричним характеристикам	3	3	4
Сума $E_{j21} = 0.06e_{11} + 0.09e_{12} + 0.09e_{13} + 0.06e_{14}$		0,81	0,84	0,93
e_{21}	Зручність сприйняття інформації	4	4	3
e_{22}	Зручність конструкції органів керування виробом	3	5	3
e_{23}	Раціональність компоновання виробу	4	4	4
Сума $E_{j22} = 0.06e_{21} + 0.09e_{22} + 0.06e_{23}$		0,75	0,93	0,69
e_{31}	Якість інформаційної моделі	4	4	3
e_{32}	Повнота та зручність інструкції з експлуатації виробу	4	4	3
Сума $E_{j23} = 0.03e_{31} + 0.06e_{32}$		0,36	0,36	0,27
e_{51}	Фізичні чинники виробу	3	3	2
e_{52}	Хімічні чинники виробу	-	-	-
Сума $E_{j25} = 0.06e_{51} + 0.04e_{52}$		0,18	0,18	0,12

Аналіз отриманих даних показав, що комплексний ергономічний показник кутових шліфувальних машин найбільше залежить від ергономічних показників 2-го роду, серед яких перевагу віддавали зручності конструкції органів керування виробом та психологічному навантаженню, яким встановили найбільший ваговий коефіцієнт. При цьому, під час розрахунку,

суми балів за ергономічними показниками 1-го роду прийняли максимальну величину вагового коефіцієнта серед розрахованих для підсилення безпекової складової.

Таблиця 8. Результати визначення оцінок за ергономічними показниками 1-го роду

№	Ергономічний показник 1-го роду	Тип кутової шліфувальної машини		
		Bosch GWS 14-125	WEV 15-125 Quick	STURM 1.9кВт
1	Чи зручне використання виробу за призначенням?	4	4	3
2	Чи зручні керування й контроль при роботі з виробом?	4	5	3
3	Чи швидке опанування виробу?	4	4	4
4	Чи легке обслуговування виробу?	4	4	4
5	Чи не створює виріб гігієнічне навантаження на робочу зону при його застосуванні?	3	4	2
6	Чи безпечний виріб при експлуатації?	3	4	2
Сума $E_{j1} = 0.19e_1 + 0.16e_2 + 0.09e_3 + 0.1e_4 + 0.08e_5 + 0.15e_6$		4,32	4,89	3,45

Таблиця 9. Результати визначення оцінки комплексного ергономічного показника кутових шліфувальних машин

№	Етап розрахунку суми ергономічних показників за групами	Тип кутової шліфувальної машини		
		Bosch GWS 14-125	WEV 15-125 Quick	STURM 1.9кВт
1	Сума балів за ергономічними показниками 2-го роду	2,1	2,31	2,01
2	Сума балів за ергономічними показниками 1-го роду	4,32	4,89	3,45
3	Оцінка комплексного ергономічного показника виробу, визначена експертом $E_j = E_{j1} + E_{j2}$	6,42	7,2	5,46

Виходячи з результатів розрахунку ергономічних показників 2-го роду, бачимо, що найбільшу перевагу при оцінюванні було надано показникам фізичного, психічного навантаження та настання стомлення під час роботи з ручним інструментом, тоді як ергономічні показники фізичних чинників отримали найменшу кількість балів. Зазначимо, що номенклатурні ергономічні показники (табл. 2) формувались, виходячи з наданих технічних характеристик виробником. Однак їх можна значно розширити, користуючись даними стандарту ДСТУ 7895:2015, де наведено значний перелік різних ергономічних показників виробів.

Обговорення результатів дослідження

Отримані результати дозволяють визначити ергономічність ручного інструменту на основі суб'єктивних оцінок фахівців, які безпосередньо мають до них відношення, з урахуванням конкретних умов праці, а також зручності й безпечності виконання виробничого завдання. За наведеними результатами комплексного ергономічного показника виробу не можна говорити про якість наведених марок кутових шліфувальних машинок, а тільки про їх ергономічність для виконання конкретного виробничого завдання, наперед визначеними працівниками у заданих умовах праці. Крім того, встановлені оцінки розраховувались з обмеженої кількості ергономічних показників 2-го роду, що також не дозволяє говорити про перевагу однієї марки кутової машини над іншою. Зазначимо, що наведені розрахунки використовувались у якості прикладу, а не порівняння ергономічності конкретних марок кутових шліфувальних машин.

Важливою умовою якісного оцінювання є зменшення суб'єктивізму, яке можна досягти через якомога більше залучення до обговорення можливих рішень учасників зі значним досвідом роботи [8]. При знайомстві з ручним інструментом експертам пропонувалось звернути увагу на його пристосування до умов праці на робочому місці [9]. Зокрема, чи дизайн рукоятки дозволяє працювати в обмеженому просторі.

Загалом, запропонований алгоритм для аналізу ергономічності ручного інструменту сприятиме не лише забезпеченню працівників відповідним зручним інструментом, але й певною мірою зниженню ергономічного ризику травмування чи розвитку професійного захворювання опорно-рухового апарату людини. Це досягається через підвищення рівня комфорту, зручності використання і швидкості виконання завдань, що допомагає покращити умови праці та сприяє загальному здоров'ю працівників.

Наприклад, визначений комплексний ергономічний показник виробу можна застосувати для розрахунку професійно-ергономічного ризику через врахування розробки шкали інтенсивності виробничого завдання, де саме фізичне, психологічне навантаження призводять до збільшення ймовірності настання небезпечної події – фізичного перевантаження працівника (табл. 10).

Таблиця 10. Шкала інтенсивності фізичного перевантаження

№ з/п	Рівень інтенсивності перевантаження	Критерій фізичного перевантаження, %	Критерій комплексного ергономічного показника виробу	Бальна оцінка
1	Вкрай високий	75-100	До 3	5
2	Високий	50-75	3-5	4
3	Середній	25-50	5-8	3
4	Низький	1-25	8-10	2
5	Відсутній	0	10-12	1

Особливістю запропонованого підходу являється не тільки наявність чек-листа, а і можливість ранжування значущості ергономічних показників через їх значимість для конкретного працівника, виробничого завдання й умов праці.

Крім того, незначна кількість показників дозволяє швидко провести аналіз і визначити придатність інструменту до заданих умов праці. Разом з тим в даному дослідженні присутні обмеження. Зокрема, антропометричні показники людини, що може вносити протиріччя у виставлених балах, які потім осереднюються. Звідси виникає потреба в індивідуальному підході та аналізі кожного отриманого результату. Також виникає потреба у поєднанні запропонованої оцінки ергономічності з процедурою керування професійними ризиками [10]. Наприклад, через додавання показника комфортності чи зручності ручного інструменту. В подальшому виникає потреба у проведенні таких досліджень, які дозволять отримати загальну цілісну картину стосовно величини ергономічного ризику [11], що потребує заміни, контролю чи будівництва захисних бар'єрів, які зменшать кількість травм і професійних захворювань опорно-рухового апарату. Разом з тим цей підхід і так збільшує складність виявлення ергономічного ризику, особливо при зміні робочої пози та умов виконання роботи. За фактом така оцінка, на жаль, проводиться нерегулярно, що потребує внесення відповідних коригувань.

При проведенні дослідження існували деякі розбіжності щодо наведених шкал для кожного показника, наведеного в чек-листі. Учасники повідомляли щодо складності розуміння визначення бальних оцінок. Особливо при визначенні форми рукояток. Також існували суттєві відмінності між дослідниками щодо зручності рукоятки та при оцінці загальної зручності. Аналіз отриманих результатів показує, що зазначені розбіжності виникли через нерозуміння чек-листа, про що повідомила майже третина учасників дослідження. Тому виникає необхідність у більш детальному опрацюванні алгоритму з визначення ергономічності й особливостей використання чек-листа та визначення бальних показників. Разом з тим відмічаємо і наявність схожих результатів при оцінюванні ергономічних показників. Це дозволяє зробити висновок про прийнятність чек-листа, якщо до ергономічності ручного інструмента немає різномірних думок. Також бачимо, що початківці завжди виставляли вищі оцінки.

Висновок

1. Розроблено алгоритм оцінювання комплексного ергономічного показника ручного інструменту, що складається з п'яти кроків: складання переліку ергономічних характеристик ручного інструменту у відповідності до виробничих задач, підбір групи експертів п'яти і більше фахівців, проведення попереднього оцінювання комплексного ергономічного показника виробу, аналіз отриманих оцінок експертами, обговорення сильних і слабких сторін, конструкції та прийняття рішення щодо вибору вагових коефіцієнтів, перевірка отриманих результатів, розробка рекомендацій щодо умов застосування для конкретного виробу.

2. Особливість запропонованого алгоритму полягає у встановленні вагових коефіцієнтів значущості характеристик інструменту з урахуванням безпеки, зручності та умов праці.

3. Наведено результати оцінювання комплексного ергономічного показника кутових шліфувальних машин, що дозволило встановити дієвість розробленого алгоритму за відгуками учасників дослідження і навести рекомендації щодо його подальшого вдосконалення.

4. Запропоновано взаємозв'язки між двома рівнями ергономічних показників через вагові коефіцієнти, які дозволяють врахувати складність умов праці, безпечність та зручність ручного інструменту.

5. Розроблено чек-листи для опрацювання бальних оцінок за встановленими ергономічними критеріями.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бородіна, Н.А., Чеберячко, С.І., Дерюгін, О.В. (2020). Ергономічний аналіз ручного інструменту для умов автосервісу. Метод дослідження. Частина 1. *Науково-виробничий журнал «Автошляховик України»*, 3, 7-12. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2020-3-263-7-12>
2. Бородіна, Н.А., Чеберячко, С.І., Дерюгін, О.В. (2020). Ергономічний аналіз ручного інструменту для умов автосервісу. Результати досліджень. Частина 2. *Науково-виробничий журнал «Автошляховик України»*, 4, 10-12. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2020-4-264-10-21>
3. Dababneh, A., Lowe, B., Krieg, E., Kong, Y.-K., Waters, T. (2004). A Checklist for the Ergonomic Evaluation of Nonpowered Hand Tools, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 1(12), D135-D145. <https://doi.org/10.1080/15459620490883150>
4. Jain, R., Bihari Rana, K., Lal Meena, M., Sidh, S. (2021). Ergonomic assessment and hand tool redesign for the small scale furniture industry. *Materials today processing*, 44(6), 4952-4955. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.762>
5. Arciniega-Rocha, R.P., Erazo-Chamorro, V.C., Szabo, G. (2023). The Prevention of Industrial Manual Tool Accidents Considering Occupational Health and Safety. *Safety*, 9(3), 51. <https://doi.org/10.3390/safety9030051>
6. Johanning, E., Stillo, M., Landsbergis, P. (2020). Powered-hand tools and vibration-related disorders in US-railway maintenance-of-way workers. *Industrial Health*, 4, 58(6), 539-553. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2020-0133>
7. Stanton, N., Hedge, A., Brookhuis, K., Salas, E., Hendrick, H. (2005). The handbook of human factors and ergonomics methods. *CRC Press LLC, Washington, D.C., USA*, 764 p. ISBN 0-415-28700-6. Режим доступу: <https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/ip/BUKU%20ERGONOMI/BUKU%20INGGRIS/Handbook%20of%20HF%20and%20Ergo%20Methods.pdf>
8. Дерев'янюк, Б.В. Щодо мінімізації суб'єктивізму при наданні платних послуг приватним особам вищими навчальними закладами системи МВС. *Проблеми правознавства та правоохоронної діяльності* : збірник наукових праць. – Донецьк : Донецький юридичний інститут МВС України, 2012. – № 3 (50). – С. 204-212. – Режим доступу: <https://repository.ndippp.gov.ua/handle/765432198/331>
9. Цимбал, Н., Донченко, С. Застосування методу ергономічного дизайну для розробки спецодягу зварювальників суднобудівної галузі. *Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми сучасного дизайну»*, Київський національний університет технологій та дизайну, 2018, 418-421. – Режим доступу: https://er.knuid.edu.ua/bitstream/123456789/10596/1/APSD2018_V1_P418-421.pdf
10. Мигаль, Г.В., Протасенко, О.Ф. Нові поняття сучасної ергономіки. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*, 2018, №79, 162-170. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vikt_2018_79_20
11. Третьякова, Л.Д., Остапенко, Н.В. Оцінювання ризику у використанні захисного одягу. *Проблеми охорони праці в Україні*, 2016, № 32, 57-66. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/pop_2016_32_8

Стаття надійшла до редакції 15.09.2023 і прийнята до друку після рецензування 01.12.2023

REFERENCES

1. Borodina, N., Cheberiachko, S., & Deryugin, O. (2020). Ergonomic analysis of hand tools for car service conditions. Results of the study. Part 1. *A Scientific and Industrial Journal the Avtoshliakhovyk Ukrayiny*, 3, 7-12. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2020-3-263-7-12>
2. Borodina, N., Cheberiachko, S., & Deryugin, O. (2020). Ergonomic analysis of hand tools for car service conditions. Results of the study. Part 2. *A Scientific and Industrial Journal the Avtoshliakhovyk Ukrayiny*, 3, 7-12. 4, 10-12. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2020-4-264-10-21>
3. Dababneh, A., Lowe, B., Krieg, E., Kong, Y.-K., & Waters, T. (2004). A Checklist for the Ergonomic Evaluation of Nonpowered Hand Tools. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 1(12), D135-D145. <https://doi.org/10.1080/15459620490883150>
4. Jain, R., Bihari Rana, K., Lal Meena, M., Sidh, S. (2021). Ergonomic assessment and hand tool redesign for the small scale furniture industry. *Materials today processing*, 44(6), 4952-4955. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.762>
5. Arciniega-Rocha, R.P., Erazo-Chamorro, V.C., & Szabo, G. (2023). The Prevention of Industrial Manual Tool Accidents Considering Occupational Health and Safety. *Safety*, 9(3), 51. <https://doi.org/10.3390/safety9030051>
6. Johanning, E., Stillo, M., & Landsbergis, P. (2020). Powered-hand tools and vibration-related disorders in US-railway maintenance-of-way workers. *Industrial Health*, 4, 58(6), 539-553. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2020-0133>
7. Stanton, N., Hedge, A., Brookhuis, K., Salas, E., & Hendrick, H. (2005). The handbook of human factors and ergonomics methods. *CRC Press LLC, Washington, D.C., USA*. 764 p. ISBN 0-415-28700-6. Retrieved from <https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/ip/BUKU%20ERGONOMI/BUKU%20INGGRIS/Handbook%20of%20HF%20and%20Ergo%20Methods.pdf>
8. Derevianko, B.V. (2012). Shchodo minimizatsii subiektyvizmu pry nadanni platnykh posluh pryvatnym osobam vyshchymy navchalnymy zakladamy systemy MVS. *Problemy pravoznavstva ta pravookhoronnoi diialnosti: zbirnyk naukovykh prats*, 3 (50), 204-212. Donetsk: Donetskyi yurydychnyi instytut MVS Ukrainy. Retrieved from <https://repository.ndipp.gov.ua/handle/765432198/331>
9. Tsymbal, N., & Donchenko, S. (2018). Application of the method of the ergonomic design for the development of the equipment of the waterbuilding devices for weldings. In *International Scientific and Practical Conference "Current Issues in Modern Design,"* (pp. 418-421). Kyiv National University of Technologies and Design. Retrieved from https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/10596/1/APSD2018_V1_P418-421.pdf
10. Mypal, H., & Protasenko, O. (2018). New Concepts in Modern Ergonomics. *Open Information and Computer Integrated Technologies*, 79, 162-170. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/vikt_2018_79_20
11. Tretiakova, L.D., & Ostapenko, N.V. (2016). Otsiniuvannia ryzyku u vykorystanni zakhysnoho odiahu. *Problemy okhorony pratsi v Ukraini*, 32, 57-66. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/pop_2016_32_8

The article was received 15.09.2023 and was accepted after revision 01.12.2023

Цопа Віталій Андрійович

доктор технічних наук, професор кафедри менеджменту, Міжнародний інститут менеджменту

Адреса робоча: вул. Шулявська, 10/12, м. Київ, Україна, 04116

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4811-3712> **e-mail:** dr.tsopav@gmail.com

Кружилко Олег Євгенович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»

Адреса робоча: Південне шосе, 80, м. Запоріжжя, Україна, 69008

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8624-1515> **e-mail:** olkruzhilko@ukr.net

Чеберячко Сергій Іванович

доктор технічних наук, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"

Адреса робоча: пр. Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7307-1553> **e-mail:** cheberiachkoyi@ukr.net

Дерюгін Олег Валентинович

кандидат технічних наук, доцент кафедри управління на транспорті, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"

Адреса робоча: пр. Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2456-7664> **e-mail:** deryugin_o@ukr.net

Негрій Тетяна Олександрівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4239-3178> **e-mail:** tetiana.nehrii@gmail.com

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 65.011.56

Serhiy Bushuev, Dr.Sc., professor, head of the project management department
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7815-8129>

Andriy Ivko, PhD, doctoral student of the Department of Project Management
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3388-8355>

Yuriy Tikhonovych, PhD, doctoral student of the Department of Project Management
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-9200-7486>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

SYNCRETIC PROJECT MANAGEMENT IN THE ERA OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE EXPLOSION

Abstract. *As the technological landscape rapidly evolves, the convergence of innovation and artificial intelligence (AI) presents unprecedented opportunities and challenges for project management. This paper introduces a comprehensive mathematical model for the syncretic management of innovative projects in the age of the AI explosion. Syncretism in this context refers to the seamless integration of diverse elements, including interdisciplinary collaboration, AI technologies, and adaptive methodologies, to optimize project outcomes. The proposed model encompasses various facets of project management, innovation, and AI integration. It delineates stages of project lifecycle management, emphasizing resource allocation, risk assessment, and adaptive strategies. In the innovation management domain, the model incorporates methodologies for idea generation, technology scouting, and open innovation, recognizing AI's role in shaping the innovative landscape. A crucial aspect of the model lies in the integration of AI technologies throughout the project. This includes identifying relevant use cases, managing data effectively, selecting appropriate AI models, and establishing decision support systems. The syncretic approach emphasizes cross-functional collaboration, fostering an environment where different disciplines seamlessly contribute to project success. Resource optimization is a key focus, leveraging AI to allocate resources efficiently, predict maintenance needs, and enhance overall project performance. Ethical and legal considerations are embedded within the model to ensure responsible AI usage, and the paper outlines mechanisms for ongoing training and development to equip teams with the necessary skills. The model's effectiveness is evaluated through the lens of monitoring and evaluation, with defined key performance indicators, continuous monitoring, and feedback loops for iterative improvements. Communication and collaboration are underscored, utilizing modern tools to facilitate stakeholder engagement and effective teamwork. This paper contributes to the evolving discourse on project management by providing a robust framework that adapts to the dynamic nature of AI and innovation. It serves as a guide for project managers, interdisciplinary teams, and decision-makers navigating the challenges and opportunities presented by the syncretic management of innovative projects in the era of the AI explosion.*

Keywords: *Syncretic; Management; Innovative Projects; AI Explosion.*

С. Бушуєв, А. Івко, Ю. Тихонович

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

СИНКРЕТИЧНЕ УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ В ЕПОХУ ВИБУХУ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

***Анотація.** З різноманітністю технологічного ландшафту стрімко зростає конвергенція інновацій та штучного інтелекту (ШІ), що створює непередбачені можливості та виклики для управління проєктами. У цій роботі представлено комплексну математичну модель для синкретичного управління інноваційними проєктами в епоху вибуху ШІ. Синкретизм у цьому контексті означає безшовне поєднання різноманітних елементів, включаючи міждисциплінарну співпрацю, технології ШІ та адаптивні методології, з метою оптимізації результатів проєкту. Запропонована модель охоплює різні аспекти управління проєктами, інновацій та інтеграції ШІ. Вона визначає етапи управління життєвим циклом проєкту, наголошуючи на розподілі ресурсів, оцінці ризиків та адаптивних стратегіях. У сфері управління інноваціями модель включає методології для генерації ідей, пошуку технологій та відкритих інновацій, визначаючи роль ШІ у формуванні інноваційного ландшафту. Важливим аспектом моделі є інтеграція технологій ШІ протягом всього проєкту. Це включає визначення відповідних випадків використання, ефективне управління даними, вибір відповідних моделей ШІ та встановлення систем підтримки прийняття рішень. Синкретичний підхід наголошує на міжфункціональній співпраці, сприяючи створенню середовища, де різні дисципліни безперешкодно сприяють успіху проєкту. Оптимізація ресурсів є ключовим аспектом, використовуючи ШІ для ефективного розподілу ресурсів, передбачення потреб у технічному обслуговуванні та покращення загальної ефективності проєкту. Етичні та правові аспекти вбудовані у модель для забезпечення відповідального використання ШІ, і у роботі описані механізми для постійного навчання та розвитку, щоб забезпечити команди необхідними навичками. Ефективність моделі оцінюється через призму моніторингу та оцінки, з визначеними ключовими показниками ефективності, постійним моніторингом та зворотними зв'язками для ітеративних покращень. Комунікація та співпраця підкреслюються, використовуючи сучасні інструменти для сприяння залученню зацікавлених сторін та ефективній роботі в команді. Ця робота здійснює свій внесок у дискусію про управління проєктами, надаючи рамкову модель, яка адаптується до динамічної природи ШІ та інновацій. Вона служить керівництвом для очільників проєктів, міждисциплінарних команд та осіб, що приймають рішення, які працюють над викликами та можливостями, що створюються синкретичним управлінням інноваційними проєктами в епоху вибуху ШІ.*

***Ключові слова:** Синкретичне; Управління; Інноваційні Проєкти; Вибух ШІ.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.85-98>

1. Вступ

У епоху, яку відзначає стрімке поширення технологій штучного інтелекту (ШІ), ландшафт управління проєктами пройшов глибоке перетворення. Синтез інновацій та ШІ породив небачені можливості, формуючи спосіб концептуалізації, виконання та, нарешті, успіху проєктів. У цій статті

досліджується парадигма синкретичного управління, підхід, що безперешкодно поєднує різноманітні елементи, від міждисциплінарної співпраці до передових технологій ШІ, для навігації складнощами інноваційних проєктів в епоху вибуху ШІ.

Фоном для цієї дискусії є динамічна технологічна еволюція, де неспинний темп досягнень у галузі ШІ став каталізатором революційних інновацій. Оскільки організації прагнуть використовувати потенціал ШІ, традиційні парадигми управління проєктами повинні еволюціонувати, щоб врахувати складнощі та можливості, які відкриває ця технологічна революція.

Синкретизм у контексті цієї роботи означає гармонійне поєднання різних дисциплін, методологій та технологій. Наша увага зосереджена на розробці комплексної математичної моделі, яка не лише визнає симбіозний зв'язок між інноваціями та ШІ, але й використовує цей синергетичний ефект для оптимізації результатів проєкту. Від концептуалізації ідей до виконання проєктів модель синкретичного управління має бути керівною рамкою, яка адаптується до змінного ландшафту технологій ШІ та сприяє створенню середовища, сприятливого для інноваційного успіху.

Ця стаття розкриває ключові складові запропонованої моделі синкретичного управління. Ми досліджуємо етапи управління життєвим циклом проєкту, включаючи адаптивні стратегії, оцінку ризиків та розподіл ресурсів. Аспект управління інноваціями підкреслює роль ШІ в генерації ідей, пошуку технологій та відкритих інновацій, визнаючи трансформаційний вплив ШІ на творчий процес.

Центральним елементом нашої дискусії є безшовна інтеграція технологій ШІ протягом всього життєвого циклу проєкту. Ми досліджуємо визначення випадків використання ШІ, ефективні стратегії управління даними, вибір моделей та створення систем підтримки прийняття рішень. Синкретичний підхід, який ми пропагуємо, виходить за рамки технологічних розглядів, щоб обійняти міжфункціональну співпрацю, визнаючи різноманітну експертизу, необхідну для успішного завершення проєкту.

Оптимізація ресурсів, критичний аспект запропонованої моделі, використовує потужність ШІ для ефективного розподілу ресурсів, передбачення потреб у технічному обслуговуванні та покращення загальної продуктивності проєкту. Етичні та юридичні аспекти вбудовані у структуру моделі, підкреслюючи відповідальне використання технологій ШІ. Постійні програми навчання та розвитку вбудовані для забезпечення тими необхідними навичками, що дозволять командам орієнтуватися в ареалі, насиченому ШІ.

Крізь призму моніторингу та оцінки ми досліджуємо ефективність моделі синкретичного управління, використовуючи визначені ключові показники ефективності, моніторинг у реальному часі та зворотні зв'язки для ітеративних вдосконалень. Комунікація та співпраця, за сприяння сучасних інструментів, позиціонуються як невід'ємні складові для залучення зацікавлених сторін та ефективної роботи в команді.

Починаючи це дослідження синкретичного управління в епоху вибуху ШІ, нашою метою є внесення міцної рамки, яка відповідає керівникам проєктів, міждисциплінарним командам та приймачам рішень, які перетинають складні перехрестя інновацій та ШІ. Мета цієї роботи – служити керівництвом для зацікавлених сторін в невідомих територіях сучасного управління проєктами, де злиття інновацій та ШІ обіцяє переозначити межі того, що досяжно.

2. Огляд літератури

ШІ може замінити людей в управлінні інноваціями, що вимагає від компаній переосмислення їхніх процесів інновацій та врахування цифрової трансформації [1]. ШІ може покращити управління проектами, керуючи очікуваннями зацікавлених сторін, вирішуючи конфлікти та забезпечуючи бездоганне виконання проекту [2]. Технічні досягнення в галузі штучного інтелекту (ШІ) призводять до створення машин, подібних до людей, здатних працювати автономно і імітувати нашу когнітивну поведінку. Прогрес та зацікавленість серед менеджерів, академіків та громадськості створили хайп у багатьох галузях промисловості, і багато фірм інвестують величезні кошти, щоб скористатися цією технологією через інновації у бізнес-моделях [3]. Однак менеджерам мало підтримки від академії, коли вони прагнуть впровадити ШІ в операції своєї фірми, що призводить до збільшеного ризику невдачі проекту та небажаних результатів. ШІ має потенціал революціонізувати галузі та суспільство, але виклики та дослідницькі порядки повинні бути вирішені, щоб забезпечити його успішну реалізацію та майбутній вплив [4]. Злиття стрімкого прогресу у галузі ШІ та потреби у гнучкому управлінні проектами для підтримки інновацій створює плідний ґрунт для дослідження [5]. Хоча спеціалізована галузь "синкретичного управління" для проєктів, що керуються ШІ, все ще народжується, ми можемо знайти відповідні висновки, розсіяні по кількох областях. Технології штучного інтелекту можуть покращити управління проектами, надаючи інструменти планування для конкретної області, гібридні комп'ютерні системи та інтерактивну графіку на основі знань [6]. ШІ може значно покращити управління проектами, відповідаючи вимогам як ШІ, так і управління проектами, підтримуючи розробку цільового рішення для бізнесу [7]. Навчання та адаптація за допомогою постійних алгоритмічних втручань допомагають у розвитку чіткого розуміння поточної ситуації, а також у вирішенні складніших викликів у міру їх виникнення. В основі штучного інтелекту лежить когнітивна психологія та розробка прикладних програм, заснованих на знаннях. Швидші обчислювальні підходи за допомогою ШІ використовуються для вирішення складних проблем [8]. Одночасно виникають нові, більш складні питання, які важко зрозуміти і передбачити людському розуму і які ще далекі від вирішення. Динамічний розвиток глобальних технічних, економічних, політичних та екологічних умов створює непереборні виклики для керівників компаній і стратегів. Проекти та управління проектами використовуються для виконання бізнес-планів і досягнення цілей державного добробуту. Інтеграція штучного інтелекту в управління проектами пропонує потенціал для трансформації, вдосконалення інтелектуальної автоматизації, прийняття рішень на основі даних і можливостей прогнозування, одночасно вирішуючи виклики традиційних методів [9]. Штучний інтелект, зокрема машинне навчання, може значно покращити ефективність управління проектами в будівництві та ІТ-проєктах за рахунок вдосконалення планування, вимірювання та управління невизначеністю [10]. Штучний інтелект може оптимізувати управління проектами, усуваючи слабкі місця та підвищуючи ефективність, незважаючи на потенційні ризики та проблеми [11]. Це дослідження надає детальну концептуальну інформацію про штучний інтелект та різні точки зору.

Штучний інтелект визначається як нова технічна дисципліна, яка розробляє прикладну систему, технологічний метод для моделювання та розширення людського інтелекту. Це дослідження є оглядом, в якому обговорюється, як штучний інтелект впливає на управління проектами. У документі [12] обговорювалися різні переваги ШІ та його впровадження. Результати показують, що технології та ШІ не можуть замінити людський розум. У цій статті обговорюється роль штучного інтелекту в управлінні проектами. Прискорення впровадження штучного інтелекту як рушія інновацій змусить професію управління проектами змінити свій підхід. Менеджери та лідери проєктів повинні задовольняти нові та нові очікування зацікавлених сторін щодо використання нових інструментів і методів для реалізації успішних проєктів. ШІ слід розглядати не лише як відмінність проєкту, але й як цінність, яку він додає до виконаного проєкту [13]. Концептуальна модель синкретичної методології управління проектами розглядається в роботі [14].

Стратегічне управління в епоху ШІ розглядає праця Марко Іансіті та Каріма Р. Лакхані "Конкуренція в епоху ШІ. Стратегія та лідерство для наступної парадигми". Ця книга досліджує, як ШІ перетворює конкурентні ландшафти, та пропонує стратегічні рамки для того, щоб організації процвітали у цьому новому середовищі. "Перевага ШІ. Як використати революцію штучного інтелекту на користь" Ендрю Нг, Ерік Брінвольфссон і Джеремі Шрейдж акцентується на практичних стратегіях для організацій, щоб використовувати ШІ у різних функціях та відділах. Колекція статей "Посібник HBR з управління в епоху штучного інтелекту" від Harvard Business Review детально розглядає конкретні виклики та можливості управління проектами з використанням ШІ, включаючи підвищення кваліфікації робочої сили, етичні питання та управління ризиками.

Управління проектами та інноваціями розглядає книга "Мистецтво інновацій: уроки творчості" Тома Келлі, засновника IDEO. Вона надає практичні поради для сприяння інноваціям в організаціях, підкреслюючи спрямованість на користувачів та ітеративне прототипування. "Управління проектами для Agile. Адаптивні та ітеративні стратегії для розробки програмного забезпечення" Джеймса Шора та Шейна Вардена досліджує методології гнучкого управління проектами, які добре підходять для навігації у невизначеностях інноваційних проєктів. Класична книга "Дилема інноватора. Коли нові технології змушують великі фірми зазнати невдач" Клейтона М. Крістенсена підкреслює проблеми, з якими стикаються встановлені організації при адаптації до руйнівних технологій, пропонуючи цінні висновки для управління інноваціями під час швидкої технологічної зміни.

"Штучний інтелект у проектному управлінні. Комплексний посібник" Джека Велча висвітлює різні способи використання ШІ для покращення процесів управління проектами, з використанням випадків вивчення та практичних порад. "Управління проектами в епоху розладу. Використання ШІ та автоматизації для створення цінності" Пола Д. Альгатта досліджує, як інструменти на базі ШІ можуть оптимізувати робочі процеси проєкту, підвищити прийняття рішень та автоматизувати рутинні завдання. "Людська перевага в епоху ШІ: лідерство, навчання та зростання в змінному світі" Тома Девенпорта та Брука Харрінгтона підкреслює важливість людської інтуїції та лідерських якостей в успішній реалізації ШІ, закликаючи організації

зосередитися на розвитку "гібридної робочої сили", яка використовує як людські, так і ШІ здібності. Важливо зрозуміти, що галузь синкретичного управління для проєктів, що керуються ШІ, все ще розвивається і доступна література є розрізною. Однак, використовуючи висновки з суміжних областей, таких як стратегічне управління, управління проєктами та інтеграція ШІ, ви можете побудувати міцну основу для розуміння та впровадження цього нового підходу до інновацій.

3. Принципи синкретичного управління

Синкретичне управління поєднує в собі різні підходи, методи і інструменти з метою створення комплексної стратегії управління, яка б максимально враховувала потреби проєкту та сприяла досягненню його цілей. Розглянемо ключові принципи синкретичного управління (рис. 1).

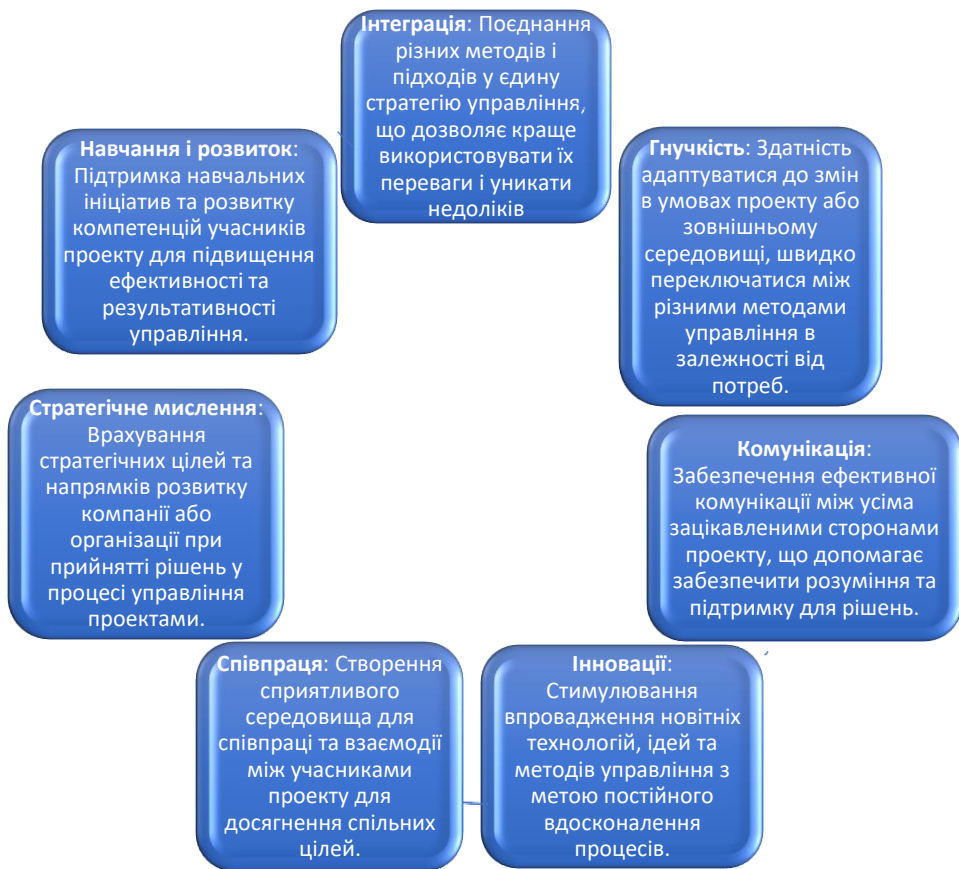


Рис. 1. Принципи синкретичного управління

Ці принципи допомагають створити універсальну і гнучку стратегію управління, яка може бути успішно застосована в різних галузях та умовах.

Застосування принципів синкретичного управління має такі переваги (табл. 1).

Таблиця 1. Застосування принципів синкретичного управління

№	Принцип	Опис
1	Ефективність	Поєднання різних підходів і методів дозволяє використовувати найкращі практики з кожного з них, що сприяє досягненню більш ефективних результатів.
2	Гнучкість	Синкретичне управління надає можливість адаптуватися до змін у процесі проекту, швидко переключатися між різними методами та стратегіями в залежності від ситуації.
3	Ширше охоплення проблем	Завдяки поєднанню різних підходів, синкретичне управління дозволяє більш повно охоплювати різноманітні аспекти проекту та його управління.
4	Стимулювання інновацій	Використання синкретичного підходу сприяє стимулюванню інновацій та впровадженню новітніх технологій та методів управління.
5	Покращення комунікації та співпраці	Поєднання різних методів сприяє зміцненню комунікації та співпраці між учасниками проекту, що допомагає забезпечити більш ефективне досягнення цілей.
6	Постійне вдосконалення	Синкретичне управління сприяє постійному вдосконаленню процесів та методів управління, оскільки воно дозволяє поєднувати найкращі практики з різних джерел.

Застосування принципів синкретичного управління може сприяти підвищенню ефективності, гнучкості та інноваційності в управлінні проектами та іншими сферами діяльності.

4. Структурна модель синкретичного управління

Синкретичне управління інноваційними проектами в період експоненційного зростання штучного інтелекту передбачає інтеграцію різноманітних підходів, методологій та перспектив для успішного подолання складнощів і невизначеностей, пов'язаних з проектами, що ведуться з використанням ШІ. Розглянемо ключові принципи структури синкретичного управління (рис. 2).

Розглянемо зміст кожного принципу структурної моделі синкретичного управління:

1. Міждисциплінарна співпраця.

- **Склад команди.** Створення кросфункціональних команд з учасниками, що мають різноманітні навички, включаючи експертизу в галузі ШІ, знання домену, управління проектами та комунікаційні навички.
- **Місця спільної роботи.** Створення середовищ, які сприяють відкритому спілкуванню та співпраці між технічними та не-технічними членами команди.

2. Гнучкі та адаптивні методології.

- **Гнучкі рамки.** Впровадження гнучких методологій, таких як Scrum або Kanban, для сприяння гнучкості та адаптивності відповідно до швидко змінюваних технологій ШІ та вимог проекту.
- **Ітеративна розробка.** Розбиття проектів на менші, керовані ітерації, що дозволяє постійне вдосконалення та коригування на основі емерджентних тенденцій ШІ.



Рис. 2. Структурна модель синкретичного управління

3. Етичний та відповідальний ІІІ.

- Етичний каркас. Розробка та дотримання етичного каркасу, який керує відповідальним використанням ІІІ, враховуючи такі фактори, як пом'якшення упередженості, прозорість та відповідальність.
- Дизайн, спрямований на людину. Пріоритетність потреб і досвіду людини у дизайні та впровадженні рішень ІІІ, що забезпечує відповідність етичним принципам.

4. Стратегічне планування.

- Футуризм. Регулярне оцінювання та передбачення тенденцій ІІІ, забезпечення відповідності проєктів майбутньому шляху розвитку технологій ІІІ.
- Управління ризиками. Впровадження надійних стратегій управління ризиками для вирішення невизначеностей, пов'язаних з експоненційним зростанням, враховуючи технічні, регуляторні та ринкові ризики.

5. Постійне навчання та розвиток.

- Програми навчання. Інвестування у постійні програми навчання для членів команди, щоб тримати їх у курсі останніх досягнень та найкращих практик ІІІ.
- Обмін знаннями. Організація сесій обміну знаннями у межах команди та сприяння участі в конференціях та заходах промисловості.

6. Управління даними та безпека.

- Управління даними. Встановлення ефективних практик управління даними для забезпечення якості, конфіденційності та безпеки даних, використовуваних у проєктах ІІІ.
- Протоколи безпеки. Впровадження надійних заходів кібербезпеки для захисту систем ІІІ від потенційних загроз та атак.

7. Стратегічне партнерство.

- Залучення до екосистеми. Співпраця з зовнішніми партнерами, науковими установами та експертами галузі для використання більш широкого набору знань та ресурсів.
- Співпраця з відкритим кодом. Використання ініціатив з відкритим кодом та внесок у спільноту для прискорення інновацій та відповідності стандартам галузі.

5. Математична модель для синкретичного управління інноваційними проектами

Розробка комплексної математичної моделі для синкретичного управління інноваційними проектами в епоху вибуху штучного інтелекту є складним завданням, оскільки вона охоплює широкий спектр якісних та кількісних факторів. Однак ми можемо дослідити побудову рамки, яка включає різні аспекти синкретичного управління за допомогою математичних компонентів. Давайте розглянемо компоненти моделі.

1. Стратегічне бачення.

- Визначте кількісні метрики для ваших інноваційних цілей (наприклад, збільшення доходу, задоволення клієнтів, покращення ефективності).
- Встановіть ваги для цих метрик на основі їх стратегічного значення (наприклад, зростання доходу може мати вищу вагу, ніж залучення користувачів).
- Розробіть систему оцінки на основі цих метрик і ваг для оцінки "стратегічної відповідності" потенційних проектів.

2. Холістична оцінка.

- Створіть багатокритеріальну модель прийняття рішень для оцінки можливостей проекту. Встановіть ваги для різних критеріїв, таких як технічна можливість, економічна доцільність, соціальний вплив та етичні аспекти.
- Оцініть кожен варіант проекту за цими критеріями, використовуючи нечітку логіку, яка може керувати якісними та невизначеними параметрами.
- Об'єднайте окремі бали критеріїв в загальний бал "холістичної оцінки" для кожного проекту.

3. Колаборативний синергізм.

- Моделюйте співпрацю як мережу осіб та команд з експертизою та набором навичок, що відповідають проекту.
- Розрахуйте "потенціал синергії" на основі перекриття та доповнення цих навичок.
- Використовуйте алгоритми аналізу мережі, щоб ідентифікувати оптимальні команди для максимізації синергії та потоку знань.

4. Гнучка адаптація.

- Використовуйте симуляції Монте-Карло для моделювання потенційних ризиків та невизначеностей, пов'язаних з проектом.
- Визначте ключові показники ефективності (KPI), щоб відстежувати прогрес та стан проекту.

- Розробіть механізм зворотного зв'язку, де відхилення від КРІ спричиняють коригування термінів, бюджетів або стратегій виконання проєкту.

Вихідні дані моделі.

- Пріоритетизація проєктів. Ранжування потенційних проєктів на основі їх комбінованих балів зі стратегічної відповідності, холістичної оцінки та потенціалу синергії.
- Розподіл ресурсів. Оптимізація розподілу ресурсів на основі експертизи команди, балансування навантаження та критичності проєкту.
- Планування заходів у випадку непередбачених ситуацій. Генерація стратегій мінімізації ризиків на основі симульованих сценаріїв та ідентифікованих вразливостей.

Це концептуальна рамкова модель, і конкретні математичні функції, алгоритми та вхідні дані залежать від вашої конкретної галузі, цілей проєкту та наявних даних. При її застосуванні доведеться залучити фахівців у галузі та науковців-дослідників для вдосконалення та ефективної реалізації цієї моделі. Крім того, пам'ятайте, що чисто математична модель не може охопити всі аспекти синкретичного управління. Інтуїція, лідерство та адаптивне прийняття рішень залишаються ключовими для подолання складнощів інновацій, які приводять штучний інтелект. Давайте представимо запропоновану математичну модель для компоненту Стратегічного бачення Синкретичного управління проєктами.

Мета застосування моделі. Максимізувати очікуваний вплив ваших інноваційних проєктів з використанням штучного інтелекту, враховуючи їх відповідність цілям організації та їх потенціал успіху.

Змінні. G_i вектор, що представляє i -ту стратегічну ціль вашої організації (наприклад, зростання доходів, задоволення клієнтів, операційна ефективність).

Wg_i вага, що призначена i -тій цілі, відображаючи її відносне значення (наприклад, $Wg_{\text{дохід}} > Wg_{\text{залучення}}$).

P_j бінарна змінна, що вказує, чи вибрано j -тий проєкт для впровадження (1), чи ні (0).

I_{jg_i} вплив j -того проєкту на i -ту ціль, кількісно виражений за допомогою оцінки або метрики (наприклад, прогнозоване збільшення доходу, покращення індексу задоволеності клієнтів).

U_j очікувана корисність j -того проєкту, що враховує такі чинники, як технічна можливість, потенціал на ринку та вимоги до ресурсів.

Формулювання моделі. Максимізується вираз:

$$\sum_{N=1}^{i=1} W_{g_i} \times \sum_{M=1}^{j=1} P_j \times I_{jg_i} \times U_j - \sum_{N=1}^{i=1} W_{g_i} \times \sum_{M=1}^{j=1} P_j \times L_{jg_i} \times U_i \rightarrow MAX$$
$$\sum_{M=1}^{j=1} P_i \leq B,$$

де, B – обмеження бюджету.

Кожне обмеження може бути налаштоване для вашого конкретного контексту (наприклад, потужність команди, терпимість до ризику). Пояснення моделі. Об'єктивна функція максимізує зважену суму впливу по всіх цілях та

проектах, враховуючи їх очікувану корисність також. Ваги W_{gi} забезпечують, що проекти, які зроблять більший внесок у високопріоритетні цілі, матимуть загальний більший вплив.

Змінні вибору P_j дозволяють вибрати найкращі проекти в межах обмеження бюджету B . Запропонована модель є інструментом для підтримки вашого прийняття рішень, а не остаточною відповіддю. Оцінка і якісні фактори все ще відіграють важливу роль у створенні успішного стратегічного бачення для ваших інновацій, заснованих на штучному інтелекті.

6. Розробка рамкової моделі синкретичного управління проектами

Створення комплексних рамок синкретичного управління проектами безумовно викликає складнощі, оскільки адаптабельність передбачає поєднання кількісних та якісних чинників.

Рамкова модель синкретичного управління проектами включає в себе комбінацію різних методів, підходів і інструментів для ефективного керування проектами. Основні складові такої моделі наведені на рис. 3.

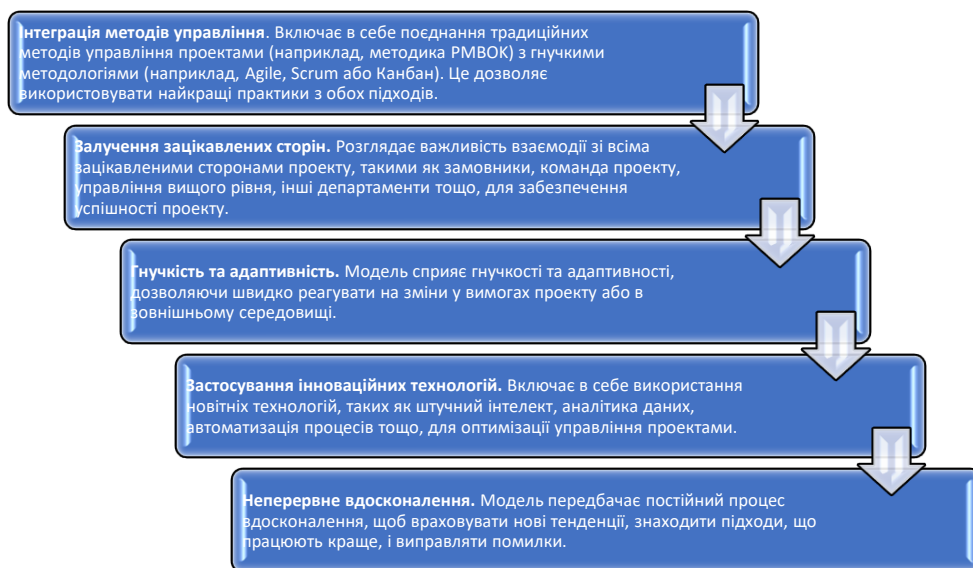


Рис. 3. Складові рамкової моделі синкретичного управління проектами

Рамкова модель спрямована на створення більш адаптивних та ефективних практик управління проектами, що відповідають сучасним вимогам і викликам у галузі управління проектами. Ці рамки є концептуальною високорівневою уявою, а конкретні деталі моделі будуть залежати від контексту вашого проекту, наявних даних та обраних стратегій контролю.

7. Приклади застосування синкретичного управління проектами

Розглянемо кілька прикладів застосування синкретичного управління проектами.

Розробка нового продукту з використанням штучного інтелекту (ШІ). Компанія розпочинає проєкт з розробки нового продукту, який використовує технології штучного інтелекту для поліпшення функціональності та користувацького досвіду. Синкретичне управління проєктом включає в себе формування команди з різними навичками (технічні експерти зі штучного інтелекту, розробники програмного забезпечення, дизайнери), застосування гнучких методологій розробки продукту та етичні аспекти використання штучного інтелекту (наприклад, забезпечення прозорості та захисту приватності даних користувачів).

Впровадження системи управління виробництвом з інтеграцією ШІ. Виробнича компанія вирішує впровадити систему управління виробництвом, яка використовує алгоритми штучного інтелекту для оптимізації процесів виробництва та управління запасами. Синкретичне управління проєктом включає в себе аналіз вимог бізнесу та технічних можливостей, планування ресурсів та ризиків, а також підтримку користувачів із залученням експертів з області ШІ для розв'язання технічних проблем.

Створення інноваційного медичного діагностичного засобу. Дослідницька група працює над проєктом створення нового медичного діагностичного засобу, який використовує алгоритми штучного інтелекту для аналізу зображень та даних пацієнтів з метою швидкого та точного виявлення захворювань. Синкретичне управління проєктом включає в себе співпрацю з лікарями та медичними експертами для визначення потреб ринку та етичних питань, використання гнучких методологій для швидкого впровадження та виправлення помилок, а також розробку плану випробувань та отримання регуляторного схвалення.

Ці приклади демонструють, як синкретичне управління проєктами може бути застосоване в різних сферах, де важливе поєднання технічної експертизи, стратегічного планування та етичних аспектів для досягнення успішних результатів.

8. Висновки

Синкретичне управління в епоху експоненційного зростання штучного інтелекту вимагає цілісного та адаптивного підходу. Шляхом поєднання технічної експертизи, етичних аспектів, стратегічного планування та колаборативних практик організації можуть ефективно подолати виклики та використати можливості, що виникають внаслідок швидкого розвитку штучного інтелекту.

Представлені тут рамки синкретичного управління надають комплексну стратегію для подолання викликів та використання можливостей, пов'язаних з інноваційними проєктами в умовах експоненційного зростання штучного інтелекту. Шляхом синтезу міждисциплінарного співробітництва, гнучких методологій, етичних аспектів та стратегічного планування організації можуть створити сприятливе середовище для успішних ініціатив, спрямованих на штучний інтелект.

Акцент на різноманітності команди та постійному навчанні підкреслює важливість адаптації до швидко змінюваних технологій та ринкових ландшафтів. Етичні та відповідальні принципи штучного інтелекту, вбудовані у рамки, пріоритезують не лише технічні досягнення, але й вплив на

суспільство та окремих осіб, сприяючи цілісному та стійкому підходу до розвитку штучного інтелекту.

Стратегічне планування, включаючи футуризм та управління ризиками, є важливим для передбачення та вирішення невизначеностей, властивих області штучного інтелекту. Крім того, визнання потреби у відповідності до регулятивних вимог та правової експертизи гарантує, що проекти відповідають зростаючим стандартам, сприяючи довірі та відповідальності.

Колаборативні елементи рамок, такі як стратегічні партнерства та співпраця з відкритим кодом, підкреслюють взаємозалежний характер екосистеми штучного інтелекту. Використання зовнішньої експертизи та внесок у галузеві ініціативи прискорює інновації та сприяє колективному підходу до вирішення загальних проблем.

Синкретичний підхід до управління прагне забезпечити баланс між технологічним прогресом та етичною відповідальністю. Включення цих принципів у тканину управління проектами дозволить організаціям не лише використовувати трансформаційну силу штучного інтелекту, але й сприятиме створенню стійкого та інклюзивного майбутнього штучного інтелекту. Ця рамка – не статичне рішення, а динамічна галузь знань, яка розвивається разом з ландшафтом штучного інтелекту для забезпечення стійкості та успіху в умовах небаченого зростання і змін.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Haefner, N., Wincent, J., Parida, V., & Gassmann, O. (2021). Artificial intelligence and innovation management: A review, framework, and research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120392>
2. Lokhande, A. (2022). Use of Artificial Intelligence Smart Tools in Projects. In *2022 8th International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICSSS54381.2022.9782273>
3. Reim, W., Åström, J., & Eriksson, O. (2020). Implementation of Artificial Intelligence (AI): A Roadmap for Business Model Innovation. *AI*. <https://doi.org/10.3390/ai1020011>
4. Dwivedi, Y., et al. (2019). Artificial Intelligence (AI): Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and policy. *Int. J. Inf. Manag.*, 57, 101994. <https://doi.org/10.1016/J.IJINFOMGT.2019.08.002>
5. Bushuyev, S., & Puziichuk, A. (2021). Development organizational structure for value-oriented reengineering project of construction enterprises. In *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, 22-25 September, Lviv, Ukraine (Vol. 2, pp. 367-370). Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/9648758>
6. Levitt, R., & Kunz, J. (1987). Using artificial intelligence techniques to support project management. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 1, 3-24. <https://doi.org/10.1017/S0890060400000111>
7. Auth, G., Jöhnk, J., & Wiecha, D. (2021). A Conceptual Framework for Applying Artificial Intelligence in Project Management. In *2021 IEEE 23rd Conference on Business Informatics (CBI)*, 01, 161-170. <https://doi.org/10.1109/CBI52690.2021.00027>
8. Lokhande, A. (2022). Use of Artificial Intelligence Smart Tools in Projects. In *2022 8th International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICSSS54381.2022.9782273>
9. Savio, R., & Ali, J. (2023). Artificial Intelligence in Project Management & Its Future. *Saudi Journal of Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.36348/sjet.2023.v08i10.002>

10. Taboada, I., Daneshpajouh, A., Toledo, N., & Vass, T. (2023). Artificial Intelligence Enabled Project Management: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app13085014>
11. Prifti, V. (2022). Optimizing Project Management using Artificial Intelligence. *European Journal of Formal Sciences and Engineering*, 5, 30-38. <https://doi.org/10.26417/667hri67>
12. Alshaikhi, A., & Khayyat, M. (2021). An investigation into the Impact of Artificial Intelligence on the Future of Project Management. In *2021 International Conference of Women in Data Science at Taif University (WiDSTaif)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/WiDSTaif52235.2021.9430234>
13. Odeh, M. (2023). The Role of Artificial Intelligence in Project Management. *IEEE Engineering Management Review*, 51, 20-22. <https://doi.org/10.1109/EMR.2023.3309756>.
14. Bushuyev, S., & Ivko, A. (2023). Conceptual Model of Syncretic Methodology Data of Development Projects Management for Self-managed Organizations. *CEUR Workshop Proceedings*, 2023, pp. 266-275.

Стаття надійшла до редакції 14.12.2023 і прийнята до друку після рецензування 11.03.2024

The article was received 14.12.2023 and was accepted after revision 11.03.2024

Сергій Бушуєв

д.т.н., професор, завідувач кафедри управління проектами, Київський національний університет будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7815-8129>

Андрій Івко

к.т.н., докторант кафедри управління проектами, Київський національний університет будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3388-8355>

Юрій Тихонович

к.ю.н., докторант кафедри управління проектами, Київський національний університет будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-9200-7486>

УДК 004.942; 519.168; 519.854.3

Volodymyr Vasyanin, D. S. (Computer science), Head of department
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4046-5243> **e-mail:** archukr@meta.ua

Oleksandr Trofymchuk, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, D. S. (Computer science), professor, Director
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** itgis@nas.gov.ua

Liudmyla Ushakova, Leading engineer
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9020-1329> **e-mail:** archukr@i.ua

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

RESEARCH OF THE OPTIMIZATION PROBLEM OF STRUCTURE HIERARCHICAL COMMUNICATION NETWORK WITH CHANGING ITS PARAMETERS

Abstract. The article is devoted to the study of the problem of optimizing the hierarchical structure of a multicommodity communication network with discrete flows when changing its important parameters, such as the capacity of network arcs in transport blocks and the size of the transport block for transportation of the discrete small-lot cargo or of the data transmission in a digital communication network. The network has three levels of hierarchy – a backbone, a zonal and an internal and four types of nodes - backbone nodes of the first, second and third types, forming the backbone and zonal levels of the network, and nodes of the fourth type, which subordinate to each backbone node and forming the internal levels of the network. Types of nodes differ from each other in terms of functionality. The main task of the study is to establish how the structure of the backbone network changes (the number and location of backbone nodes of the first, second, and third types), the flow processing and distribution scheme, and the technical and economic indicators of the network's functioning for different values of its parameters. The principles of organization of sorting and distribution of flows in a three-level network and its mathematical model are given. A mathematical model of the optimization problem of the backbone network structure and flow sorting and distribution scheme is formulated. Algorithms for solving the problem are based on the discrete analogue of the local descent method proposed by the authors earlier, when the neighborhoods of the metric space of possible solutions are chosen based on heuristic considerations, taking into account the specifics of the problem being solved. Computer modeling of the problem on a network containing 10 nodes at the specified change in the both parameters is carried out. The modeling was carried out on the example of the transport network of cargo transportation using a computer program that is part of the instrumental software of the Information and Analytical Decision Support System (IA DSS), which is being developed at the Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine. An experimental study of solution the problem showed that the structure of the network is weakly dependent on the change in the carrying capacity of the arcs and the size of the transport block. The proposed computer technology for solving problem when the network parameters are changed allows you to interactively modeling various options of a network, changing the topology, hierarchical structure, flows, parameters and constraints of the model and from the set of the obtained solutions to choose a best option, taking into account the selected a goal function and the accepted constraints; calculate preliminary

technical and economic indicators of the network's functioning, estimate the cost of additional resources and plan the amount of investment required for the modernization and construction of its structural elements, which ultimately makes it possible to increase the efficiency functioning of the network by optimizing use of its resources and reducing the operating costs for the processing and transportation of flows.

Keywords: *hierarchical communication networks; discrete flows and parameters; optimization problems; computer modeling.*

В.О. Васянін, О.М. Трофимчук, Л.П. Ушакова

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ ІЄРАРХІЧНОЇ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ ПРИ ЗМІНІ ЇЇ ПАРАМЕТРІВ

Анотація. *Стаття присвячена дослідженню задачі оптимізації ієрархічної структури багатопродуктової комунікаційної мережі з дискретними потоками при зміні її важливих параметрів, таких як пропускна спроможність дуг мережі у транспортних блоках та розмір транспортного блоку для перевезення дискретних вантажів або передачі даних у мережі цифрового зв'язку. У мережі виділено три рівні ієрархії – магістральний, зональний і внутрішній і чотири типи вузлів – магістральні вузли першого, другого і третього типу, що утворюють магістральний і зональний рівні мережі, і вузли четвертого типу, які підлегли кожному магістральному вузлу і утворюють внутрішні рівні мережі. Типи вузлів відрізняються один від одного функціональними можливостями. Основним завданням дослідження є встановити, як змінюється структура магістральної мережі (кількість і розташування магістральних вузлів першого, другого і третього типу), схема обробки і розподілу потоків і техніко-економічні показники функціонування мережі для різних значень її параметрів. Наведено принципи організації сортування і розподілу потоків в трирівневій мережі і її математична модель. Сформульовано математичну модель задачі оптимізації структури магістральної мережі і схеми сортування і розподілу потоків. Алгоритми розв'язання задачі засновані на запропонованому раніше авторами дискретному аналогу методу локального спуску, коли околиці метричного простору можливих розв'язків вибираються з евристичних міркувань з урахуванням особливостей розв'язуваної задачі. Проведено комп'ютерне моделювання задачі на мережі, що містить 10 вузлів при заданій зміні обох параметрів. Моделювання проводилося на прикладі транспортної мережі перевезення вантажів за допомогою комп'ютерної програми, яка є частиною інструментальних програмних засобів інформаційно-аналітичної системи підтримки прийняття рішень (ІАС ППР), що розробляється в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України. Експериментальне дослідження розв'язання задачі показало, що структура мережі слабо залежить від зміни пропускної спроможності її дуг і розміру транспортного блоку. Запропонована комп'ютерна технологія розв'язання задачі при зміні параметрів мережі дозволяє проєктувальнику в інтерактивному режимі моделювати її різні варіанти, змінюючи топологію, ієрархічну структуру, потоки, параметри і обмеження моделі, і з множини отриманих розв'язків вибирати найкращий варіант з урахуванням обраної функції мети і прийнятих обмежень; розраховувати*

попередні техніко-економічні показники функціонування мережі, оцінювати вартість додаткових ресурсів і планувати величину потрібних інвестицій на модернізацію та будівництво її структурних елементів, що в кінцевому підсумку дає можливість підвищити ефективність функціонування мережі за рахунок оптимізації використання її ресурсів і зниження експлуатаційних витрат на обробку і транспортування потоків.

Ключові слова: ієрархічні комунікаційні мережі; дискретні потоки і параметри; задачі оптимізації; комп'ютерне моделювання.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.99-125>

Вступ

Одними з пріоритетних галузей економіки України визначено транспорт та зв'язок, підвищення ефективності функціонування яких потребує створення комплексу автоматизованих систем обробки даних та управління різного рівня та призначення, взаємопов'язаних на засадах технологічної, організаційної, документаційної, програмної та інформаційної сумісності та утворюючих цілісну інформаційну інфраструктуру комунікаційних мереж. Тому оптимізація структури державних та корпоративних комунікаційних мереж та автоматизація процесів керування транспортними потоками в них є актуальними та перспективними напрямками у досягненні якісно нового рівня розвитку галузей транспорту та зв'язку, інтенсифікації ринкових перетворень в Україні та її інтеграції до Європейського Співтовариства.

В даний час більшість існуючих комунікаційних мереж (таких як транспортні мережі – ТМ, мережі передачі даних – МПД) мають ієрархічну структуру і складну систему управління обробкою та розподілом потоків, що циркулюють в них. Насамперед це обумовлено їх масштабістю, різноманітністю та складністю виконуваних функцій, функціонуванням в умовах неповної інформації та впливу випадкових факторів. Кількість рівнів ієрархії мережі може визначатися адміністративним розподілом території, структурою органів територіального управління, прийнятою технологією обробки та розподілу потоків вантажів, інформації та ін. Як правило, такі мережі складаються з децентралізованої розподіленої магістральної мережі та низових мереж – зональних та внутрішніх. Проектування ієрархічної структури мережі у більшості практичних випадків має спадний характер. На верхньому рівні вирішуються завдання структурного синтезу та перспективного розвитку мережі, для яких використовуються більш агреговані моделі розподілу потоків та розрахунку експлуатаційних та техніко-економічних показників її функціонування. На нижчих рівнях проектування деталізація об'єктів має збільшуватися з метою найбільш адекватного їх опису та прийняття раціональних рішень. Це зумовлює ітераційно-циклічний характер процесів проектування та управління, що включають процедури синтезу та аналізу можливих рішень на всіх рівнях мережі. Оскільки рішення приймаються за умов невизначеності, пов'язаних з неповнотою наявної інформації, і також з огрубленням математичних моделей, необхідно розділяти рішення на перспективні, поточні (тактичні) і оперативні.

Як відомо, більшість математичних моделей управління, що характеризують складну систему як єдине ціле, не є адекватними реальним процесам через труднощі формального опису багатьох обмежень. Для ієрархічних мереж неадекватність загальних моделей пояснюється також

неможливістю оперативного коригування моделей в умовах перебігу процесу, що змінюються, а також необґрунтованістю вибору критеріїв або заміною низки критеріїв одним, що має складний умовно-економічний характер. Спроби подати модель на рівні агрегованих показників ведуть до втрати специфіки організації обробки та розподілу потоків і, як правило, до неадекватності моделі. Складання розгорнутих моделей, коли керування на нижніх рівнях представлено деталізованими моделями, призводить до необачних одержуваних рішень та некомпетентності фахівців, відповідальних за організацію транспортних процесів. Вирішення такої ситуації може бути у створенні комплексу взаємопов'язаних багаторівневих моделей планування та управління, що відображають ієрархію комунікаційної мережі та відповідний їй ступінь агрегування показників. Оскільки фізична просторова структура більшості існуючих мереж вже склалася, насамперед, найбільший інтерес представляє вирішення завдань тактичного планування та оперативного управління, націлених головним чином на оптимізацію їх функціонування за наявних ресурсів на конкретно заданих проміжках часу, коли потоки в мережі та її основні техніко-економічні та експлуатаційні характеристики залишаються досить стабільними.

Ця робота є продовженням низки досліджень ієрархічних мереж з багатопродуктовими дискретними потоками кореспонденцій [1–11]. Під кореспонденцією розуміється пара різних вузлів мережі, між якими є спрямований дискретний потік елементів заданої величини, наприклад, неподільних вантажів уніфікованого розміру в ТМ, байт, кілобайт, мегабайт і т.п. в МПД. У багатопродуктовій мережі кожен вузол може обмінюватися кореспонденціями з іншими вузлами. У транспортній магістральній мережі всі кореспонденції повинні транспортуватися у транспортних блоках (контейнерах, пливковій упаковці, на піддонах) заданого розміру, а в мережі передачі даних – у віртуальних транспортних блоках (віртуальних контейнерах). Розмір транспортних блоків вимірюється кількістю одиниць кореспонденцій, що у них вміщується. Це пов'язано з рядом чинників, найбільш важливими з яких є концентрація потоків при об'єднанні кореспонденцій (тарно-штучних вантажів або потоків даних (потоків повідомлень)) з різними адресами призначення в загальні транспортні блоки, які можуть не збігатися з адресою призначення транспортного блоку. У транспортних мережах це також важливо і для збереження вантажів, можливості їх автоматизованої і механізованої обробки, зберігання на відкритих майданчиках, спрощення обробки супровідної документації та ін. Формування збірних кореспонденцій дозволяє скоротити кількість необхідних транспортних блоків та транспортних засобів, більш ефективно використовувати пропускну спроможність каналів зв'язку. Перед транспортуванням кореспонденції розсортовуються на адреси їх доставки в сортувальних центрах (магістральних вузлах) ТМ, а потім упаковуються в транспортні блоки. В МПД роль сортувальних центрів виконують мультіплектори передачі даних.

Аналіз вітчизняних та зарубіжних літературних джерел, а також робіт в Інтернеті показує слабку вивченість багатопродуктових задач оптимізації обробки та розподілу потоків зі збірними кореспонденціями. Так, в одній з небагатьох робіт [12] розглядається задача маршрутизації збірних тарно-штучних вантажів у багатопродуктовій мережі, в якій інтегруються процеси їх сортування та транспортування та враховуються обмеження на час доставки

вантажів. При цьому в один транспортний блок групуються тільки такі вантажі, у яких збігаються пункти відправлення та призначення і часові вікна доставки, обмеження на пропускні спроможності вузлів та дуг мережі не враховуються. В [13, 14] наводяться багатопродуктові моделі маршрутизації з обмеженнями на пропускні спроможності дуг мережі та з жорсткими (the Hard Transit Time-Constrained, HTC-MCNF) та м'якими (the Soft Ttransit Ttime-Constrained, STC-MCNF) обмеженнями на час доставки вантажів, але вантажі з різними адресами призначення не поєднуються у загальні транспортні блоки.

На відміну від більшості існуючих підходів до моделювання та аналізу функціонування багатопродуктових мереж, у даній роботі розглядаються дискретні моделі транспортних процесів з цілочисловими змінними та параметрами. У практичних задачах повинні враховуватися процеси сортування кореспонденцій (вантажів, або потоків даних) у сортувальних центрах, обмеження на час їх доставки споживачам, коливання потоків та навантажень в окремих вузлах та лініях зв'язку транспортної мережі, вантажопідйомність транспортних засобів або пропускна спроможність каналів зв'язку, нелінійність наведених витрат на обробку та транспортування потоків і багато інших реальних факторів та обмежень. Це призводить до необхідності розробки нових математичних моделей, методів, алгоритмів та інформаційної платформи для управління обробкою, розподілом і маршрутизацією потоків кореспонденцій та визначає важливість досліджуваної науково-прикладної проблеми для розвитку транспорту та зв'язку в Україні.

В [15] розглянута узагальнена задача упаковки і розподілу потоків кореспонденцій в ієрархічній мережі, розв'язання якої здійснюється в кілька етапів. На першому етапі розв'язується задача вибору ієрархічної структури магістральної мережі, схеми сортування кореспонденцій у вузлах мережі та пакування їх у транспортні блоки [2, 5, 7, 9]. На другому етапі постає задача розподілу та маршрутизації потоків транспортних блоків зі збірними кореспонденціями, які були сформовані при розв'язанні першої задачі [6, 8, 11, 16]. В [9] досліджувалася задача оптимізації ієрархічної структури багатопродуктової комунікаційної мережі при зміні її щільності (відношення кількості дуг мережі до максимально можливої кількості дуг для заданого числа вузлів в мережі). Основним завданням дослідження було встановити, як змінюється структура магістральної мережі – кількість і розташування магістральних вузлів, схема обробки і розподілу потоків і техніко-економічні показники функціонування мережі для різного ступеня її щільності.

Метою цієї роботи є математичне формулювання і експериментальне дослідження задачі оптимізації ієрархічної структури мережі при зміні таких її важливих параметрів, як розмір транспортного блоку і вантажопідйомність транспортних засобів або пропускна спроможність каналів зв'язку.

Ієрархічна структура мережі

У мережі виділено три рівні ієрархії – магістральний, зональний та внутрішній та чотири типи вузлів – вузли першого, другого, третього та четвертого типів. Вузли першого, другого і третього типу, що знаходяться на транспортних магістралях ТМ або МПД, і ділянки маршрутів транспортних засобів або каналів зв'язку, що з'єднують магістральні вузли, становлять магістральну мережу. Усі магістральні вузли мають зони обслуговування (ЗОВ), які

утворюють зональні рівні магістральної мережі. Вузли четвертого типу знаходяться у внутрішній зоні обслуговування будь-якого магістрального вузла і разом із ним утворюють внутрішню мережу. Кожен вузол у мережі має назву, географічні координати, унікальний індекс та порядковий номер. Кожному вузлу можна поставити у взаємно-однозначну відповідність множину індексів (номерів) інших вузлів, що кореспондуються з ним у магістральній та внутрішній мережі. На рис. 1 показано фрагменти мережі, а також приклади ЗОВ для вузлів першого, другого та третього типу (де m – вузли четвертого типу).

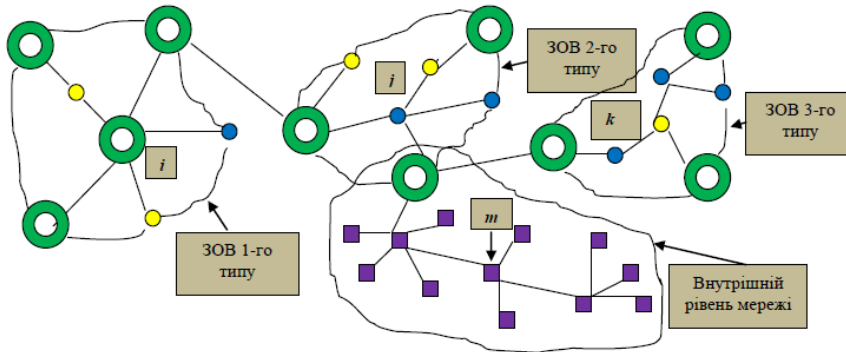


Рис. 1

Усі магістральні вузли є сортувальними центрами, в яких кореспонденції спочатку сортуються за адресами (вузлами) призначення, а потім пакуються як збірні кореспонденції в транспортні блоки. Вузли першого типу можуть сортувати потоки у всі магістральні вузли в зоні свого обслуговування та у всі інші вузли першого типу у магістральній мережі. У вузлах другого і третього типу кількість магістральних напрямів сортування потоків обмежена кількістю вузлів, що знаходяться всередині та на межі їх зон обслуговування. Тому в магістральній мережі, після сортування потоків кореспонденцій та упаковки їх у транспортні блоки, не може бути прямого потоку транспортних блоків між вузлами першого типу та вузлами другого або третього типу і навпаки, якщо вони не знаходяться в одній зоні обслуговування. Вузли другого та третього типу відрізняються від вузлів першого типу функціональними можливостями, рівнем технічної оснащеності, числом обслуговуючого персоналу та ін. У цих вузлах заборонено сортування транзитних потоків кореспонденцій (крім потоків між вузлами четвертого типу у внутрішній мережі). У вузлах третього типу, на відміну від вузлів другого типу, заборонена обробка транзитних потоків транспортних блоків. У вузлах четвертого типу потоки не сортуються, а безпосередньо відправляються у відповідний магістральний вузол. Транспортування кореспонденцій у внутрішній мережі виконується за кільцевими маршрутами внутрішніми транспортними засобами або провайдерами по регіональних каналах зв'язку.

Типи вузлів та зони обслуговування можуть задаватися проєктувальником мережі або визначатися в автоматизованому режимі. У будь-якому випадку вирішується задача вибору оптимальної структури мережі за критерієм мінімуму наведених витрат на її функціонування та встановлюється склад та кількість вузлів кожного типу.

Загальну схему сортування потоків для транспортної мережі показано на рис. 2. Вхідний потік кореспонденцій із загального накопичувача (або накопичувачів) надходить на лінії сортування. Число таких ліній регулюється в залежності від загального обсягу кореспонденцій, що щодобово надходить на сортування. Вхідний потік включає вихідні, вхідні та транзитні кореспонденції та обробляється в міру їх надходження у безперервному режимі або з попереднім накопиченням залежно від інтенсивності потоку. Пристрій зчитування унікальних індексів кореспонденцій (або їх розширених штрих-кодів), розташований на початку кожної лінії, зчитує індекси та передає їх у комп'ютер.

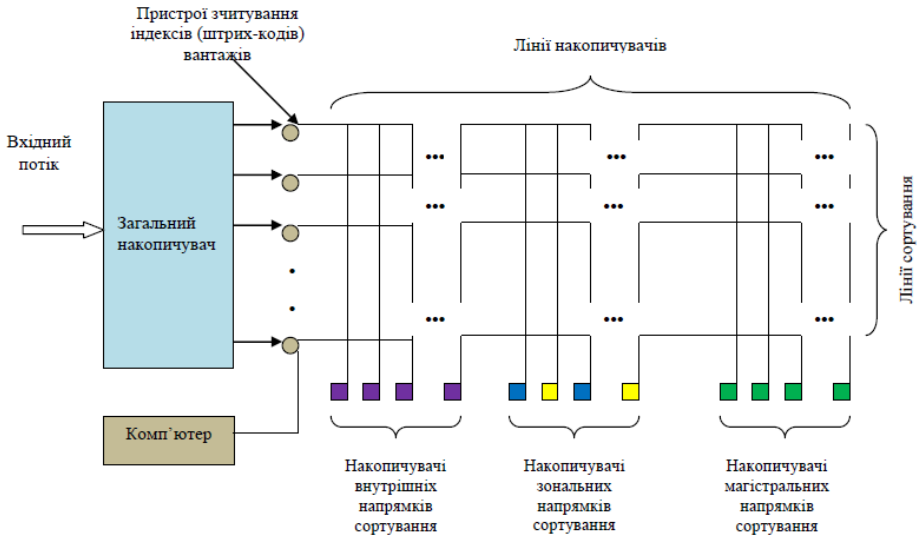


Рис. 2

Розширений штрих-код може містити дані про індекси підприємств відправника та одержувача; про коди юридичних чи фізичних осіб відправників та одержувачів; про дату прийому кореспонденції у транспортному підприємстві відправника та ін. Така розширена інформація про кожну кореспонденцію дає можливість автоматизованого відстеження її просування від відправника до одержувача. У пам'яті комп'ютера зберігаються сортувальні таблиці, що містять групи індексів, що відповідають кожному напрямку сортування. Загальна кількість напрямків сортування визначається сумою магістральних, зональних та внутрішніх напрямків. Відповідно до розшифрованого індексу кореспонденція направляється в потрібний накопичувач. Склад груп індексів, що відповідають внутрішнім та зональним напрямкам сортування, практично постійний та змінюється лише при введенні нових підприємств, що обслуговуються даним вузлом, або зміні зони обслуговування вузла. Кількість та склад магістральних напрямків сортування визначаються після розв'язання задачі упаковки та формування потоків транспортних блоків [17, 18].

У мережах передачі даних також виконуються подібні технологічні операції сортування інформаційних потоків. Сучасні опорні мережі передачі даних з волоконно-оптичними лініями зв'язку і технологіями спектрального ущільнення каналів WDM, DWDM, HDWDM (wavelength-division multiplexing,

dense WDM, high dense WDM) дозволяють мультиплексувати від 16 до 64 і більше спектральних каналів в одній лінії зв'язку і передавати об'єми інформації до 27 Тбіт/с (1 Тбіт = 10^{12} біт) і більше. У таких мережах в ролі «сортувальної машини» виступають мультиплексори, які об'єднують окремі інформаційні потоки у віртуальні контейнери.

Так, наприклад, схожа технологія віртуальних контейнерів, при якій в один віртуальний контейнер можуть об'єднуватися повідомлення з різними адресами призначення, застосовується при побудові перспективних великомасштабних загальнонаціональних і інтернаціональних мереж передачі даних на основі надширокосмугових каналів і схем типу опорної мережі (backbone). Відома, наприклад, Європейська опорна мережа E-bone. В даний час при проектуванні таких мереж використовуються метод комутації каналів, європейська технологія синхронної цифрової ієрархії (Synchronous Digital Hierarchy, SDH) або американська технологія синхронних оптичних мереж (Synchronous Optical NETs, SONET) із застосуванням оптоволоконних ліній зв'язку та спектрального ущільнення каналів WDM, DWDM, HDWDM.

Математична модель мережі, функції витрат та задача оптимізації структури мережі

Згідно з введеними поняттями визначимо математичну модель ієрархічної мережі. Нехай фізична мережа задана зв'язним графом $\hat{G}(\hat{N}, \hat{P})$ з множиною вузлів $\hat{N} = N_1 \cup N_2 \cup N_3 \cup N_4$, $\hat{n} = |\hat{N}|$, і множиною дуг \hat{P} , $\hat{p} = |\hat{P}|$, де N_1, N_2, N_3, N_4 – множини вузлів першого, другого, третього і четвертого типу, \hat{n} і \hat{p} – відповідно число вузлів і дуг мережі, а $||$ – знак потужності множини. Дуги є ділянками доріг або лініями зв'язку і можуть бути як орієнтованими, так і не орієнтованими. Довжини дуг задані матрицею $\hat{R} = ||\hat{r}_{ij}||_{\hat{n} \times \hat{n}}$, $\hat{r}_{ij} \in R^1$, $(i, j) \in \hat{P}$, де R^1 – множина дійсних чисел. Потоки дискретних потоків кореспонденцій між усіма парами вузлів задані цілочисловою матрицею $\hat{A} = ||\hat{a}_{ij}||_{\hat{n} \times \hat{n}}$, де \hat{a}_{ij} – потік з вузла i у вузол j , $i, j = \overline{1, \hat{n}}$, $i \neq j$. Визначимо також магістральну мережу $G(N, E)$ з множиною вузлів $N = N_1 \cup N_2 \cup N_3$, $n = |N|$, множиною дуг E , $e = |E|$ і внутрішні мережі $\tilde{G}_k(\tilde{N}_k, \tilde{P}_k)$, $\tilde{N}_k = \{N_0^k, N_4^k\}$, $N_0^k \in N$, $N_4^k \subseteq N_4$, $|N_0^k| = 1$, $n_k = |\tilde{N}_k| = 1 + |N_4^k|$, $p_k = |\tilde{P}_k|$, $k = \overline{1, n}$.

Для внутрішніх мереж виконується умова $\bigcap_{k=1}^n \tilde{G}_k(\tilde{N}_k, \tilde{P}_k) = \emptyset$. Для повної мережі є процедура редукції $\varphi: \hat{G}(\hat{N}, \hat{P}) \Rightarrow G(N, E) + \bigcup_{k=1}^n \tilde{G}_k(\tilde{N}_k, \tilde{P}_k)$, яка відповідно до принципів сортування і транспортування кореспонденцій в ієрархічній мережі перетворює потокову матрицю $\hat{A} = ||\hat{a}_{ij}||_{\hat{n} \times \hat{n}}$ в матриці

$A = \| a_{ij} \|_{n \times n}$ і $\tilde{A}_k = \| \tilde{a}_{ij}^k \|_{n_k \times n_k}$, а матрицю довжин дуг $\hat{R} = \| \hat{r}_{ij} \|_{\hat{n} \times \hat{n}}$ – відповідно в матриці $R = \| r_{ij} \|_{n \times n}$ і $\tilde{R}_k = \| \tilde{r}_{ij}^k \|_{n_k \times n_k}$, $k = \overline{1, n}$. У матриці A значення a_{ii} , $i = \overline{1, n}$, визначають внутрішні об'єми на обробку потоків в магістральній мережі.

Процедура редукції дозволяє автоматизованим способом перетворити дані початкової повної мережі в дані магістральної і внутрішніх мереж при зміні її структури і супідрядності вузлів четвертого типу магістральним вузлом.

Що стосується функцій витрат на обробку та транспортування потоків, то при практичному проектуванні і аналізі комунікаційних мереж повинні використовуватися реальні вартісні показники, наприклад середньорічні приведені витрати на обробку і транспортування потоків. На практиці існує безліч різних функцій, використовуваних для розрахунку витрат на функціонування мережі. У міру організаційно-технічного вдосконалення мережі ці функції постійно піддаються змінам і уточненням. У кожному випадку визначення адекватних функцій витрат є складним завданням, яке має бути вирішене окремо перед проведенням чисельного моделювання. Очевидно, що при вирішенні задач оптимізації в цільову функцію мають бути включені тільки найбільш важливі складові витрат, залежні від шуканих змінних. У сформульованих нижче задачах передбачається використання в усіх складових цільової функції капітальних і експлуатаційних витрат, приведених до порівнянного виду.

Як правило, в математичних моделях, що описують процеси обробки і транспортування потоків, витрати зв'язують з величиною потоку по дугах мережі або шляхах передачі потоку. Для мереж передачі даних, де дуги асоціюються з каналами зв'язку, такі постановки виявляються досить прийнятними. У разі транспортних мереж значно складніше адекватно визначити вартісні функції, отже і отримати в результаті вирішення задачі достовірну відповідь. Представлення поточкових задач у вигляді задач лінійного програмування з вартісними коефіцієнтами взагалі може виявитися абсурдним з практичної точки зору. За переконанням авторів, в реальних задачах треба розраховувати транспортні витрати по маршрутах транспортних засобів, тобто зв'язувати об'єми і шляхи розподілу потоків з множиною шуканих «оптимальних» маршрутів [11, 15, 16]. Для кожного визначеного в результаті вирішення маршруту, знаючи його характеристики (довжину, вантажопідйомність і тип транспортного засобу і ін.), легко розрахувати середньорічні приведені витрати для кожного маршруту і отримати достовірнішу оцінку транспортних витрат для усієї мережі перевезень. «Маршрутний» підхід прийнятний і для мереж передачі даних, оскільки кожен маршрут – це або орієнтована дуга, або послідовність таких дуг (комутовані канали).

У задачі оптимізації структури мережі не вводяться «маршрутні» функції витрат, оскільки вона є однією з перших підзадач узагальненої задачі обробки, розподілу і маршрутизації кореспонденцій [15]. При її вирішенні розраховується тільки орієнтовна оцінка транспортних витрат і нижня межа витрат на обробку транспортних блоків.

Задача оптимізації упаковки кореспонденцій і вибору структури мережі виникає у магістральних транспортних мережах і опорних мережах передачі даних з потоками дискретних кореспонденцій від постачальників до одержувачів, суть якої полягає в концентрації потоків вантажів і інформації між вузлами мережі [17, 18]. Дискретні кореспонденції з різними адресами призначення, що виходять з вузлів мережі, можуть об'єднуватися одна з іншою і упаковуватися в загальні транспортні блоки (контейнери або віртуальні контейнери). В результаті об'єднання потоків зменшується кількість транспортних блоків для транспортування кореспонденцій, скорочується число напрямів сортування кореспонденцій у вузлах мережі в інші вузли, збільшується коефіцієнт завантаження транспортних блоків і транспортних засобів, більш продуктивно використовується висока пропускна спроможність магістральних каналів зв'язку. В той же час в окремих вузлах мережі виникають транзитні потоки кореспонденцій, що призводить до збільшення загальної вартості обробки потоків в мережі і збільшення часу доставки кореспонденцій одержувачам.

Нехай $G(N, E)$ – ієрархічна магістральна мережа з множиною вузлів $N = N_1 \cup N_2 \cup N_3$, $n = |N|$, де N_1, N_2, N_3 – множини вузлів першого, другого і третього типу відповідно і множиною орієнтованих дуг E , $e = |E|$. Вважатимемо, що мережа така, що для кожної прямої дуги $kl, k < l$ існує зворотна $lk, l > k$. Дуга представляє маршрут транспортного засобу або комутовану лінію зв'язку мережі передачі даних, кінцеві вузли яких збігаються з початковим і кінцевим вузлом дуги. Передбачається, що географічні координати розміщення вузлів мережі відомі і відома цілочислова матриця потоків кореспонденцій між усіма вузлами мережі $A = \| a_{ij} \|_{n \times n}$, у якої рядки відповідають вузлам відправлення, а стовпці – вузлам призначення, і є деяка перетворена матриця $X = \| x_{ij} \|_{n \times n}$, елементи якої є цілочисловими шуканими змінними задачі упаковки. Усі кореспонденції однорідні (одного типу), при транспортуванні можуть об'єднуватися в різних вузлах і упаковуватися в транспортні блоки тільки цілком, тобто забороняється їх розгалуження (розщеплювання, дроблення на частини) і транспортування по декількох шляхах. Потоки $a_{ii}, i = \overline{1, n}$, у матриці A представляють внутрішні потоки між вузлами четвертого типу в зоні обслуговування i -го вузла, які по магістральній мережі не транспортуються. Усі кореспонденції у магістральній мережі повинні транспортуватися в деяких транспортних блоках заданого розміру $\omega \gg a_{ij}, i, j = \overline{1, n}, i \neq j, \omega \in Z^+$. Нехай S – множина пар індексів (i, j) вузлів, що кореспондуються; x_{ij}, u_{ij} – змінні, що визначають відповідно величину потоку з i у j у кореспонденціях і транспортних блоках. Первинно всі

$$x_{ij} = a_{ij}, \text{ а } u_{ij} = \left\lceil \frac{x_{ij}}{\omega} \right\rceil, (\lceil x \rceil - \text{найменше ціле, більше або рівніше } x), ij \in S;$$

$w_{kl}, kl \in E$ – пропускні спроможності дуг мережі в транспортних блоках,

$w_{kl} \in \{w_1, w_2, \dots, w_\alpha\}$, w_i , $i = \overline{1, \alpha}$ – впорядковані за зростанням цілі позитивні числа; $d_{kl} \in R^+$, $kl \in E$ – довжини дуг; $C_{tr}^{kl}(w_{kl}, d_{kl}) \in R^+$, $kl \in E$ – дискретні вартості дуг, такі, що $C_{tr}^{kl}(w_i, d_{kl}) \leq C_{tr}^{kl}(w_{i+1}, d_{kl})$, $i = \overline{1, \alpha-1}$; h_i , $i = \overline{1, n}$ – максимальна пропускна спроможність i -го вузла по обробці транзитних кореспонденцій. Для вузлів другого та третього типу $h_i = 0$; t_{ij} , T_{ij} , $ij \in S$ – розрахунковий і заданий час на доставку потоків a_{ij} з i у j ; v_{ij} , $ij \in S$, v_{\max} – кількість транзитних об'єднань (злиття) потоку a_{ij} з іншими потоками і максимально допустима кількість транзитних об'єднань.

Оскільки при розв'язанні задачі упаковки кореспонденцій невідомі фактичні шляхи розподілу потоків транспортних блоків по маршрутах транспортних засобів або каналах зв'язку, у задачі розраховується тільки орієнтовна оцінка транспортних витрат і нижня межа витрат на обробку транспортних блоків. Тому в якості $C_{tr}^{kl}(w_{kl}, d_{kl})$ прийнята функція $C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij})$ питомої вартості транспортування потоку величиною u_{ij} на відстань d_{ij} від вантажопідйомності транспортного засобу або пропускної спроможності каналу зв'язку, що задається у вигляді параметра $w_\xi \in \{w_1, w_2, \dots, w_\alpha\}$, $\xi = \overline{1, \alpha}$. Наприклад, можна вважати, що $C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij}) = u_{ij}(k_1^\xi + k_2^\xi d_{ij}) / w_\xi$, $\xi = \overline{1, \alpha}$, $\forall ij \in S$, де k_1^ξ , k_2^ξ – задані коефіцієнти.

При розв'язанні задачі виникає питання: як структура мережі залежить від вибору значення w та ω . Зазначимо, що всі витрати для всіх значень w та ω розраховуються лише орієнтовно при розподілі сформованих потоків транспортних блоків по найкоротших шляхах за лексикографічним критерієм: мінімум дуг у шляху, мінімум довжини шляху [19].

Вимагається визначити кількісний і якісний склад вузлів мережі і схему сортування кореспонденцій в кожному вузлі, при яких максимально знижуються приведені витрати на функціонування мережі. Формально, необхідно для усіх можливих комбінацій типів вузлів розв'язати задачу упаковки і знайти мінімум функції

$$F = \sum_{ij \in S} C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij}) + \sum_{i=1}^n C_{sort}^i(x_i, q_i) + \sum_{i=1}^n C_{load}^i(u_i) \quad (1)$$

при обмеженнях

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ji} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ji}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} \leq h_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

$$t_{ij} \leq T_{ij}, \quad \forall ij \in S, \quad (4)$$

$$v_{ij} \leq v_{\max}, \quad \forall ij \in S, \quad (5)$$

$$x_{ij}, u_{ij} \geq 0 \text{ і цілі.} \quad (6)$$

Перша складова функції (1) визначає транспортні витрати, друга – витрати на сортування, а третя – витрати на обробку транспортних блоків. Вирази (2) і (3) представляють умови балансу і обмеження на пропускні спроможності вузлів, а (4), (5) і (6) відповідно – обмеження на час доставки та кількість транзитних об'єднань кореспонденцій і значення змінних.

У наведених виразах $C_{sort}^i(x_i, q_i)$ – нелінійна функція витрат від сумарного об'єму $x_i = a_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (a_{ij} + a_{ji}) + \sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}$ і кількості напрямів сортування $q_i = q_{in}^i + \sum_{j=1}^n \delta_{ij}$ кореспонденцій, що обробляються у вузлі i ($\delta_{ij} = 1$, якщо $x_{ij} \neq 0$ і $\delta_{ij} = 0$, якщо $x_{ij} = 0$, а q_{in}^i визначає задану кількість напрямів сортування для обробки кореспонденцій a_{ii} , $i = \overline{1, n}$); $C_{load}^i(u_i)$ – нелінійна функція витрат від сумарної кількості транспортних блоків $u_i = \sum_{j=1}^n (u_{ij} + u_{ji})$, оброблюваних у вузлі i . Функції $C_{sort}^i(\cdot)$, $C_{load}^i(\cdot)$, $i = \overline{1, n}$ можуть бути як опуклими, так і увігнутими для різних комунікаційних мереж. Так, наприклад, для розв'язання задачі (1)-(6) в транспортній мережі в цій роботі використаний наступний конкретний вид функцій:

$$C_{sort}^i(x_i, q_i) = k_3^i x_i \exp\left(-\frac{k_4^i x_i}{1 + q_i}\right), \quad i = \overline{1, n},$$

$$C_{load}^i(u_i) = \sqrt{k_5^i u_i^2 + k_6^i u_i}, \quad i = \overline{1, n},$$

де $k_3^i, k_4^i, k_5^i, k_6^i$, $i = \overline{1, n}$ – задані коефіцієнти.

Після розв'язання задачі $x_{ij} = a_{ij} + \sum_{rs} a_{rs}^*$, якщо кореспонденція a_{ij} не об'єднувалася ні з якою іншою кореспонденцією, де $\{a_{rs}^*\}$ – множина кореспонденцій, об'єднаних з кореспонденцією a_{ij} , і $x_{ij} = 0$, якщо кореспонденція a_{ij} об'єднувалася з будь-якою іншою кореспонденцією або $i = j$.

При розрахунку часу доставки використовуються параметри, які явно не входять у модель: заданий час на сортування кореспонденцій T_a і час на транзитне перевантаження транспортних блоків у вузлах мережі T_b , середня швидкість руху транспортних засобів або передачі повідомлень V_{av} та ін. (див. експериментальний розділ).

У [18] запропоновано алгоритми для розв'язання задачі упаковки з функціями витрат на обробку і транспортування кореспонденцій, які ґрунтовані на дискретному аналогу методу локального спуску, коли околиці метричного простору допустимих розв'язків вибираються з евристичних міркувань з урахуванням специфіки структур даних і особливостей задачі. Слід зазначити, що при розв'язанні задачі можна не враховувати обмеження на пропускні спроможності вузлів (3). Додаткові обмеження (4) і (5) можуть

також не враховуватися, проте на вимогу проектувальника транспортної мережі або адміністратора мережі передачі даних усі обмеження можуть бути задані як директивні.

В процесі розв'язання задачі визначається не лише структура мережі, але і оптимальна схема сортування вихідних потоків кореспонденцій у вибраній структурі. Якщо при цьому використовуються функції приведених витрат $C_{sort}^i(x_i, q_i)$, $C_{load}^i(u_i)$, адекватні процесам сортування і оброблення, то для вузлів мережі можна отримати досить реальну оцінку їх величини, тобто визначити необхідні приведені витрати на функціонування вузлів на період тактичного планування (друга складова функції (1) і частково третя – без урахування витрат на транзитне перевантаження транспортних блоків). Для транспортних витрат і витрат на обробку транспортних блоків розраховуються тільки попередні оцінки. Реальні оцінки цих витрат можуть бути отримані тільки після розв'язання задачі розподілу і маршрутизації сформованих транспортних блоків на транспортній мережі або мережі передачі даних (у витратах на обробку транспортних блоків у вузлах мережі враховуються тільки вхідні і вихідні потоки, – транзитні потоки не враховуються; для транспортних мереж не враховуються витрати на перевезення і обробку порожніх контейнерів).

Крім структури мережі, основними результатами розв'язання задачі є потокові матриці $X = \|x_{ij}\|_{n \times n}$ та $U = \|u_{ij}\|_{n \times n}$ кореспонденцій та транспортних блоків; матриця попередніх оцінок часу доставки кореспонденцій одержувачам $\tilde{T} = \|\tilde{t}_{ij}\|_{n \times n}$; довідкова матриця об'єднання потоків кореспонденцій $C = \|c_{ij}\|_{n \times n}$ [20], елементи якої визначаються так:

$$c_{ij} = \begin{cases} k, & \text{якщо потік } a_{ij} \text{ об'єднується з потоком } a_{ik}, \\ i, & \text{якщо потік } a_{ij} \text{ безпосередньо направляється в вузол } j, \\ 0, & \text{якщо } i = j, \end{cases} \quad (7)$$

де k – вузол, через який виконується перетворення потоку a_{ij} . Матриця C використовується для відновлення послідовності вузлів мережі $\Omega_{ij} = \{(i, k_1), (k_1, k_2), \dots, (k_m, j)\}$ з проміжними вузлами $\{k_1, k_2, \dots, k_m\}$, в яких виконується додаткове (транзитне) сортування кожного з потоків a_{ij} , $i, j = \overline{1, n}$, $i \neq j$, та їх загальне число $\nu_{ij} = |\{k_1, k_2, \dots, k_m\}|$, та розрахунку t_{ij} – часу їх доставки кінцевим одержувачам. Ці результати використовуються як вхідні дані для розв'язання задачі розподілу та маршрутизації потоків транспортних блоків. Довідкова матриця об'єднання потоків повністю визначає схему сортування кореспонденцій у всіх вузлах мережі та адресує потоки транспортних блоків, які будуть розподілені по маршрутах транспортних засобів або каналах зв'язку. У вузлах реальної транспортної мережі або мережі передачі даних довідкова матриця використовується для автоматизованого управління обладнанням, що здійснює процеси сортування адресних вантажів, або як таблиця злиття повідомлень у віртуальні контейнери.

При чисельному моделюванні задачі (1)-(6) проєктувальникові виводяться до і після оптимізації наступні показники: повні витрати; транспортні витрати; витрати на сортування потоків кореспонденцій у вузлах мережі; витрати на навантаження-вивантаження (обробку) транспортних блоків у вузлах мережі; витрати на придбання транспортних блоків; загальна кількість транспортних блоків в мережі, необхідна для відправлення усіх потоків в мережі; середній коефіцієнт завантаження транспортного блоку в мережі; середнє число напрямів сортування потоків кореспонденцій у вузлах мережі; сумарний об'єм транзитної обробки потоків кореспонденцій у вузлах мережі; мінімальний, максимальний і середній час доставки кореспонденцій одержувачеві та ін.

Комп'ютерна програма оптимізації структури мережі та результати чисельного експерименту

По суті, моделювання ієрархічної структури комунікаційної мережі є комп'ютерною технологією, що складається зі сценаріїв дій проєктувальника і програмної системи при виборі структури, вхідних даних і параметрів мережі, що проєктується. В інформаційно-аналітичній системі підтримки прийняття рішень (ІАС ППР) [4, 21, 22] сценарії реалізовані у вигляді багатовіконного та багатошарового графічного інтерфейсу, що дозволяє в картографічному вигляді переглядати структуру мережі та її окремі фрагменти; вихідні та вхідні потоки у вузлах мережі; значення всіх заданих обмежень та параметрів оптимізації; результати оптимізації для різних варіантів розв'язання задачі та ін. Проєктувальник у режимі діалогу може змінювати значення вихідних даних та параметрів задачі, отримувати множину розв'язків і вибирати з них найбільш сприятливий. При цьому він завжди може порівняти варіанти розв'язків щодо оцінки техніко-економічних показників функціонування мережі залежно від вибраних параметрів та критеріїв вподобання. Для експериментального дослідження розв'язання задачі вибору структури мережі та схеми сортування потоків, а також для навчання диспетчерів роботі з програмою розроблено її демонстраційну версію [5, 23]. Така програма включена до ІАС ППР і може працювати в автономному режимі, коли всі необхідні вхідні дані генеруються датчиком псевдовипадкових чисел. ІАС ППР розробляється в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України і у перспективі буде функціонувати в масштабі реального часу та дозволяти ефективно керувати нелінійними та нестационарними процесами обробки та розподілу потоків на всіх рівнях ієрархічної мережі.

На рис. 3 показана головна форма програми, у яку вводяться вхідні дані. У ній можна вибрати різні варіанти роботи програми та вказати, чи потрібно оптимізувати структуру мережі в автоматизованому режимі чи вводити типи вузлів та зони їх обслуговування вручну, використовувати в алгоритмах розв'язання задачі функції витрат чи ні. Для зміни початкової величини потоків у процесі розв'язання задачі може використовуватись коефіцієнт прогнозування потоків (K_p), початкове значення якого за замовчуванням встановлено рівним одиниці. У нижній частині головної форми розташовані вікно для виведення поточних повідомлень програми та кнопки активізації дій.

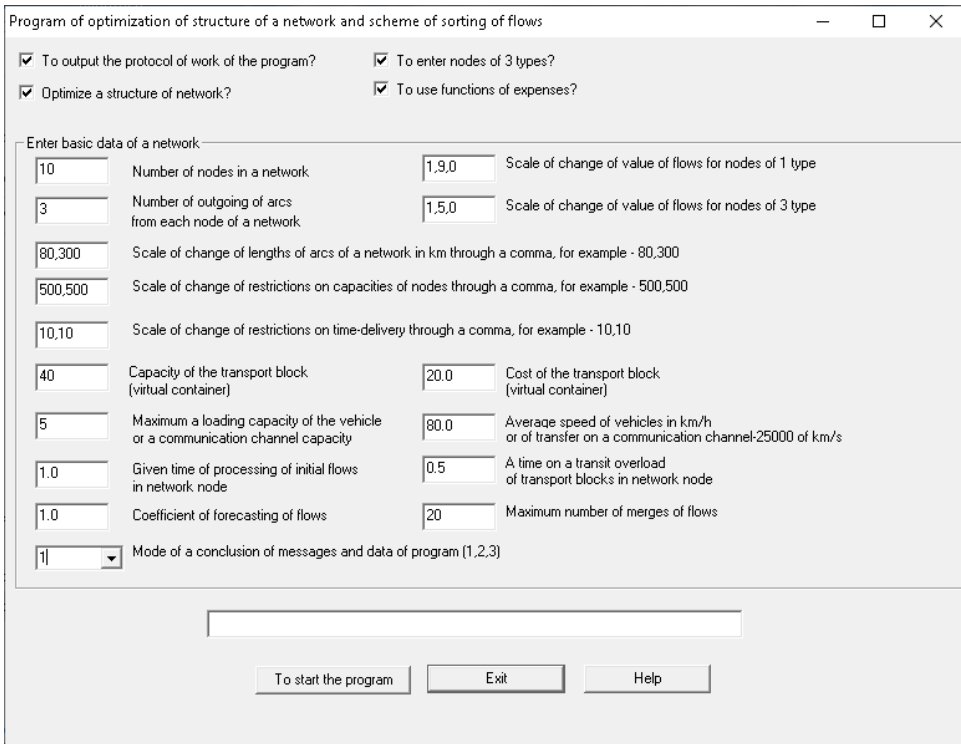


Рис. 3

Усі вихідні дані виводяться у два набори даних *outlopt* та *outl* і відображаються на екрані комп'ютера за допомогою системної програми WordPad. У форму *outlopt* виводяться обрана структура мережі та основні техніко-економічні показники її функціонування. У форму *outl* для кожного вузла мережі у відредагованому вигляді виводиться схема сортування потоків кореспонденцій та формування потоків транспортних блоків. Якщо задача вибору структури вирішується для транспортної мережі, то на початок форми *outl* додатково виводяться результати розв'язання задачі балансування матриці контейнерних потоків, що виникає через порушення умов балансу – рівності суми вихідних та вхідних контейнерів в окремих вузлах мережі. Балансування матриці виконується під час розв'язання задачі розвезення порожніх контейнерів [24].

Числовий приклад. Для проведення обчислювального експерименту датчиком псевдовипадкових чисел генерувалася транспортна мережа з числом вузлів $n=10$ і ступенем вузлів $val=3$. Довжини дуг змінювалися в межах від 80 до 300 км, а величина вихідних потоків вантажів із вузлів першого типу задавалася в межах від 1 до 9 одиниць, із вузлів другого та третього типу – у межах від 1 до 5 одиниць. Прийнято такі значення обмежень і параметрів: пропускні спроможності вузлів з обробки транзиту однакові і $h_i = 500, i = 1, n$ одиниць вантажів; максимальний час доставки вантажів одержувачу однаковий для всіх кореспонденцій та $T_{ij} = 10, ij \in S$ діб; початковий розмір транспортного блоку (контейнера) $\omega = 10$ одиниць вантажів; початкова вантажопідйомність транспортних засобів на маршрутах руху $w = 5$ контейнерів; час на сортування вантажів у вузлах мережі $T_a = 1$ доба; час на

транзитне перевантаження контейнерів у вузлах мережі $T_b = 0,5$ діб; час стоянки транспортних засобів в кінцевих пунктах слідування $T_{end} = 22$ год.; періодичність руху транспортних засобів $T_{move} = 24$ год.; вартість одного контейнера $C_{con} = 20$ умовних одиниць (у.о.); середня швидкість руху транспортних засобів $V_{av} = 80$ км/год; максимальна допустима кількість транзитних об'єднань вантажів $V_{max} = 20$, тобто не обмежувалася; режим виведення повідомлень та результатів розв'язання задачі $Mode=1$. Усі вхідні дані для розв'язання задачі при $w = 5$, $\omega = 40$ показані на рис. 3.

При розв'язанні задачі розраховувалися в у.о. до та після оптимізації: повні витрати у мережі F , транспортні витрати C_{tr} , витрати на сортування вантажів C_{sort} , витрати на навантаження та вивантаження контейнерів у транспортні

засоби C_{load} ; загальна кількість контейнерів у мережі $U = \sum_{ij \in S} \left\lceil \frac{a_{ij}}{\omega} \right\rceil$,

$U = \sum_{ij \in S} \left\lceil \frac{x_{ij}}{\omega} \right\rceil$; середній коефіцієнт завантаження контейнера

$K_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\delta_i} \sum_{j=1}^n x_{ij} / \left(\left\lceil \frac{x_{ij}}{\omega} \right\rceil \omega \right)$, $\delta_i = \sum_{j=1}^n \delta_{ij}$; середня кількість напрямів

сортування вантажів у вузлі мережі $N_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i$; значення мінімального

$\min flow$ та максимального $\max flow$ потоку контейнерів по дузі мережі.

Для розрахунку наведених середньорічних витрат на обробку і транспортування потоків використовувалися конкретні функції:

$$C_{tr}^{ij}(\cdot) = \frac{u_{ij}}{w} \left[\frac{13939, 2(T_{end} + 2d_{ij} / V_{av})}{T_{move}} + 7200 + 116, 8d_{ij} \right] \quad \forall ij \in S;$$

$$C_{sort}^i(\cdot) = 16, 8892975x_i \exp\left(-\frac{17, 74x_i}{1 + q_i}\right), \quad i = \overline{1, n};$$

$$C_{load}^i(\cdot) = \sqrt{25595u_i^2 + 2629u_i}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Для розрахунку часу доставки вантажів кінцевому одержувачеві застосовувалися наступні формули:

$$t_{ij} = \begin{cases} 2t_a + d_{ij} / (V_{av}\theta) + \psi_{ij}t_b, & \text{якщо } c_{ij} = i, \\ t_a(v_{ij} + 2) + \sum_{\xi\eta \in \Omega_{ij}} (d_{\xi\eta} / (V_{av}\theta) + \psi_{\xi\eta}t_b), & \text{якщо } c_{ij} \neq i, \end{cases}$$

де ψ_{ij} , $\psi_{\xi\eta}$ – кількість транзитних перевантажень контейнера, в якому знаходиться вантаж a_{ij} на ділянці (i, j) або

$(\xi, \eta) \in \Omega_{ij} = \{(i, k_1), (k_1, k_2), \dots, (k_m, j)\}$, d_{ij} , $d_{\xi\eta}$ – відстань ділянки, θ – коефіцієнт нормування часу (для транспортних мереж $\theta = 24$ години, для мереж передачі даних $\theta = 1$), c_{ij} – елементи довідкової матриці об'єднання потоків кореспонденцій $C = \|c_{ij}\|_{n \times n}$ (7).

Робота програми виконувалася в автоматизованому режимі, коли у головній формі зазначені поля «оптимізація структури мережі» та «вводити вузли третього типу». Після старту та повідомлення програми про кількість генерованих вузлів другого та третього типу, необхідно ввести потенційно можливу максимальну кількість вузлів другого та третього типу, які можуть бути включені до структури проєктованої мережі. Після відповіді проєктувальника програма починає оптимізувати структуру мережі, повідомляє про кількість вузлів другого та третього типу, включених до мережі, та виводить форми $out1opt$ та $out1$ для найкращого розв'язку задачі. Для кожної обраної конфігурації структури мережі у програмі ітеративно розв'язується задача (1)-(6) для наростаючих значень кількості транзитних об'єднань вантажів $\nu \leftarrow \nu + 1$, які є радіусами околиці пошуку екстремуму в алгоритмах локального спуску. Значення ν збільшується, доки значення цільової функції (1) перестануть змінюватися або $\nu \leq \nu_{max}$. У роботі [18] запропоновано дві групи алгоритмів локального спуску для розв'язання задачі (1)-(6). Перша група алгоритмів використовує задані функції витрат C_{tr}^{ij} , C_{sort}^i і C_{load}^i , друга – ні. Розробка алгоритмів другої групи обґрунтована тим, що для реальних комунікаційних мереж складно визначити функції, які достатньо адекватно характеризують витрати на процеси обробки та транспортування потоків кореспонденцій. Ці алгоритми орієнтовані на максимальне скорочення транспортних блоків у мережі, не використовують у своїй роботі функції витрат, але отримані ними розв'язки оцінюються (за заданими функціями витрат). Алгоритми першої групи показують кращі результати, але мають високі оцінки часової складності порядку $O(C_1 \nu_{max} n^5)$, складність алгоритмів другої групи становить від $O(C_2 \nu_{max} n^4)$ до $O(C_3 \nu_{max} n^2)$, де C_1 , C_2 , C_3 – деякі константи. В [18] експериментально показано, що результати розв'язання задачі (1)-(6), отримані різними групами алгоритмів на мережах, що містять до 500 вузлів, відрізняються не більше ніж на 2,65%.

Початкова структура мережі генерувалася так, щоб кожен потенційний вузол другого або третього типу був пов'язаний у своїй зоні обслуговування тільки із суміжними вузлами першого типу. Це обмеження дозволяє для будь-якої мережі із заданими параметрами згенерувати певну кількість вузлів другого або третього типу і надати структурі мережі більш правдоподібний вигляд. Так, наприклад, для мережі з $n = 10$ та $val = 3$ спочатку було генеровані 4 потенційних вузли третього типу та 6 вузлів першого типу. У процесі оптимізації 4 вузли третього типу набули статусу вузлів другого типу, тому що кожен з них потенційно може бути транзитним вузлом для перевантаження контейнерів з одного транспортного засобу на інший.

Результати розв'язання задачі для всіх значень w та ω наведено у табл. 1 і 2. У таблицях прийнято позначення: F , F_0 , F_{min} – відповідно значення функції (1)

(в умовних одиницях наведених витрат) до і після оптимізації; V_{opt} – кількість об'єднань кореспонденцій, при якій досягнуто локального оптимуму; n_1, n_2, n_3 – кількість вузлів першого, другого та третього типу; t_{av} – середній час доставки кореспонденцій одержувачу (діб); t_{sol} – час розв'язання задачі (у секундах).

Таблиця 1. Основні результати розв'язання задачі для $n = 10$, $val = 3$, $r_{ij} \in [80, 300]$, $(i, j) \in E$, $a_1 \in [1, 9, 0]$, $a_2 \in [1, 5, 0]$, $t_a = 1$ доба, $t_b = 0,5$ діб, $V_{av} = 80$ км/год, при зміні значень w_ξ , $\xi = \overline{1,7}$ та $\omega = 40$

Значення w_ξ , $\xi = \overline{1,7}$	$F, C_{tr}, C_{sort}, C_{load}$ (y.o.), U, K_{av}, N_{av} , $\min flow, \max flow$		$F_0 - F_{\min}$ y.o.	V_{opt}	n_1 n_2 n_3	t_{av} діб	t_{sol} с
	До оптимізації	Після оптимізації					
5	596715	188301	408413	5	10 0 0	3.53	1.93
	520206	125591					
	47629,2	53349,4					
	28879,2	9360,86					
	90, 0.087, 9, 3, 8	29, 0.587, 2, 1, 2					
10	336612	128243	208368	5	10 0 0	3.52	1.87
	260103	65245,5					
	47629,2	53316,8					
	28879,2	9680,84					
	90, 0.087, 9, 3, 8	30, 0.566, 2, 1, 2					
20	182772	94928,0	87844,1	3	9* 1 0	3.41	1.28
	109705	32271,5					
	48027,5	52975,6					
	25039,6	9680,85					
	78, 0.112, 7, 2, 8	30, 0.542, 2, 1, 2					
40	141534	77850,7	63683,6	3	10 0 0	3.42	1.74
	65025,8	16271,8					
	47629,2	52218,0					
	28879,2	9360,85					
	90, 0.087, 9, 3, 8	29, 0.510, 2, 1, 3					
60	119859	72086,4	47772,6	3	10 0 0	3.48	1.48
	43350,5	10828,2					
	47629,2	51897,4					
	28879,2	9360,86					
	90, 0.087, 9, 3, 8	29, 0.499, 2, 1, 3					
80	109021	68823,0	40198,4	2	10 0 0	3.46	1.78
	32512,9	8267,92					
	47629,2	51514,2					
	28879,2	9040,85					
	90, 0.087, 9, 3, 8	28, 0.475, 2, 1, 3					
100	102519	67498,7	35020,1	3	10 0 0	3.49	1.76
	26010,3	6750,99					
	47629,2	51386,9					
	28879,2	9360,83					
	90, 0.087, 9, 3, 8	29, 0.443, 2, 1, 3					

) $F_{\min} = 94928,0$ при $n_2 = 1$ і $V_{opt} = 3$; $F^ = 96575,6$ при $n_2 = 0$ і $V_{opt} = 3$;

$F^* - F_{\min} = 1647,6$ y.o., (1,74 %). Див. рис. 4.

Таблиця 2. Основні результати розв'язання задачі для $n = 10$, $val = 3$, $r_{ij} \in [80, 300]$, $(i, j) \in E$, $a_1 \in [1, 9, 0]$, $a_2 \in [1, 5, 0]$, $t_a = 1$ доба, $t_b = 0,5$ діб, $V_{av} = 80$ км/год, при зміні значень ω_ξ , $\xi = \overline{1,8}$ та $w = 40$

Значення ω_ξ , $\xi = \overline{1,8}$	$F, C_{tr}, C_{sort}, C_{load}$, (у.о.), U, K_{av}, N_{av} , min flow, max flow		$F_0 - F_{min}$ у.о.	V_{opt}	n_1 n_2 n_3	t_{av} діб	t_{sol} с
	До оптимізації	Після оптимізації					
10	120950	102064	18885,9	4	8* 2 0	2.91	0.73
	49485,1	34701,7					
	48345,0	49362,1					
	23119,7	18000,2					
	72, 0.494, 6, 1, 9	56, 0.743, 5, 1, 5					
20	133082	88857,8	44224,1	5	9** 1 0	3.18	1.25
	57780,9	23174,8					
	50261,4	53122,4					
	25039,6	12560,7					
	78, 0.239, 7, 2, 7	39, 0.697, 3, 1, 3					
40	146189	76699,4	69489,7	4	10 0 0	3.54	1.72
	67028,4	13573,9					
	50281,4	55044,5					
	28879,2	8080,95					
	90, 0.082, 9, 4, 9	25, 0.630, 2, 1, 2					
60	140601	76254,6	64346,3	5	10 0 0	3.74	1.86
	61033,6	11226,2					
	50688,0	57587,4					
	28879,2	7440,96					
	90, 0.059, 9, 3, 8	23, 0.561, 2, 1, 2					
80	140043	80402,6	59640,5	4	10 0 0	3.85	1.88
	59346,2	12792,6					
	51817,7	59529,1					
	28879,2	8080,94					
	90, 0.050, 9, 3, 8	25, 0.433, 2, 1, 2					
100	143423	77772,3	65650,3	6	10 0 0	3.76	1.92
	64063,9	12421,4					
	50479,6	57590,0					
	28879,2	7760,97					
	90, 0.036, 9, 3, 8	24, 0.346, 2, 1, 1					
120	145194	76851,2	68343,0	6	10 0 0	3.70	1.84
	66887,2	12702,1					
	49427,7	56388,1					
	28879,2	7760,96					
	90, 0.029, 9, 4, 9	24, 0.269, 2, 1, 1					
140	149449	80561,1	68887,8	3	10 0 0	3.59	1.78
	69993,0	16033,5					
	50576,7	55486,6					
	28879,2	9040,89					
	90, 0.027, 9, 3, 7	28, 0.160, 2, 1, 2					

) $F_{min} = 102064$ при $n_2 = 2$ і $V_{opt} = 4$; $F^ = 102890$ при $n_2 = 0$ і $V_{opt} = 2$;

$F^* - F_{min} = 826$ у.о., (0,81%). Див. рис. 5.

**) $F_{min} = 88857,8$ при $n_2 = 1$ і $V_{opt} = 5$; $F^* = 88960$ при $n_2 = 0$ і $V_{opt} = 3$;

$F^* - F_{min} = 102,2$ у.о., (0,115%). Див. рис. 6.

З табл. 1 видно, що зі збільшенням параметра w і при постійному параметрі $\omega = 40$ повні витрати, транспортні витрати та витрати на обробку контейнерів після оптимізації структури мережі значно знижуються. Витрати на сортування вантажів збільшуються менш помітно. При $w = 20$ і $v_{opt} = 3$ в мережу були введені відповідно 9 вузлів першого типу і один вузол другого типу.

З табл. 2 видно, що при постійному параметрі $w = 40$ і зі збільшенням параметра ω повні витрати і транспортні витрати після оптимізації структури мережі змінюються незначно. При $\omega = 10$, $v_{opt} = 4$ і $\omega = 20$, $v_{opt} = 5$ в мережу були введені відповідно 8 вузлів першого типу і два вузли другого типу та 9 вузлів першого типу і один вузол другого типу.

На рис. 4-6 показані діаграми повних витрат у мережі при постійних значеннях параметрів $\omega = 40$ і $w = 40$ і при зміні кількості вузлів другого типу, що включаються у мережу.

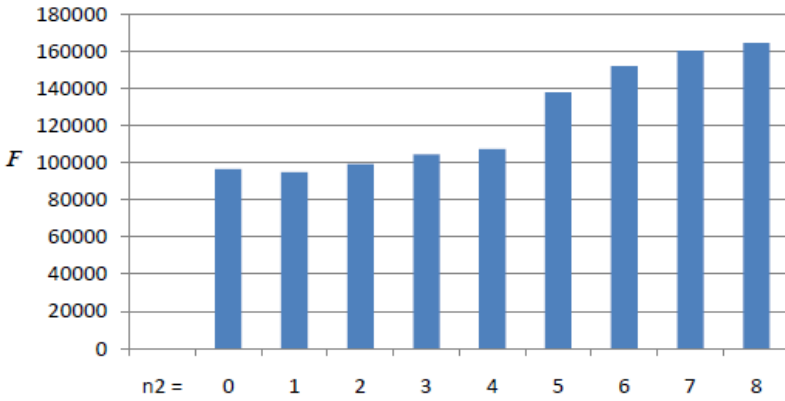


Рис. 4. Значення повних витрат у мережі при постійному значенні параметра $\omega = 40$ і зміні кількості вузлів другого типу, що включаються у мережу. Значення локальних мінімумів F до $n_2 = 4$ відстоять дуже близько один від одного

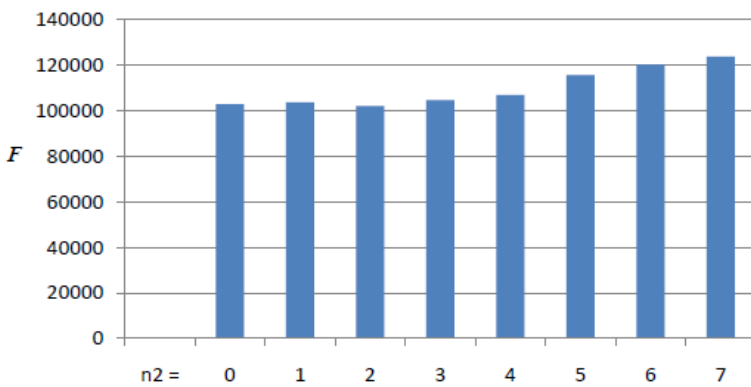


Рис. 5. Значення повних витрат у мережі при постійному значенні параметра $w = 40$ і зміні кількості вузлів другого типу, що включаються у мережу. Значення локальних мінімумів F до $n_2 = 4$ відстоять дуже близько один від одного

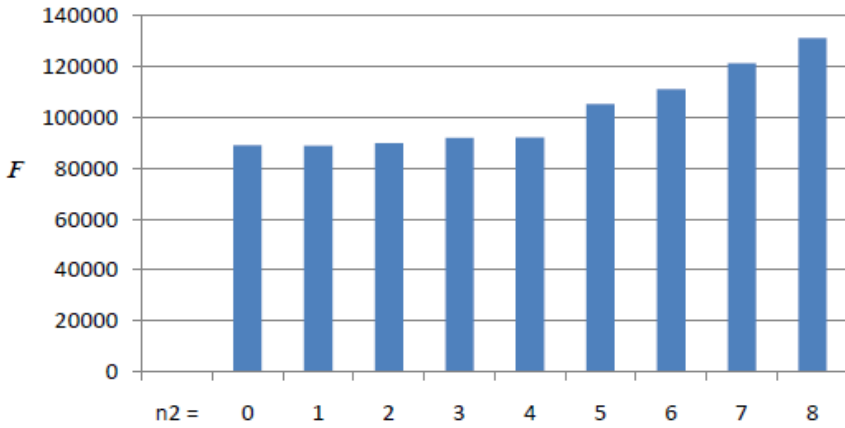


Рис. 6. Значення повних витрат у мережі при постійному значенні параметра $w = 40$ і зміні кількості вузлів другого типу, що включаються у мережу. Значення локальних мінімумів F до $n_2 = 4$ відстоять дуже близько один від одного

З таблиць та рисунків видно, що значення локальних мінімумів F до деякого порога n_2 відстоять дуже близько один від одного, тому структура мережі слабо змінюється при зміні ω та w , що і було теоретично обґрунтовано і доведено у роботі [25]. Аналізуючи отримані результати, слід очікувати, що при збільшенні розмірності мережі локальні оптимуми будуть не такі близькі, і структура мережі при зміні параметрів w і ω залишатиметься більш стабільною.

На рис. 7 наведено діаграму повних витрат у мережі до – 1, та після – 2 оптимізації, а також отримане зниження витрат після оптимізації – 3 при постійному значенні параметра $w = 40$ і зміні параметра ω .

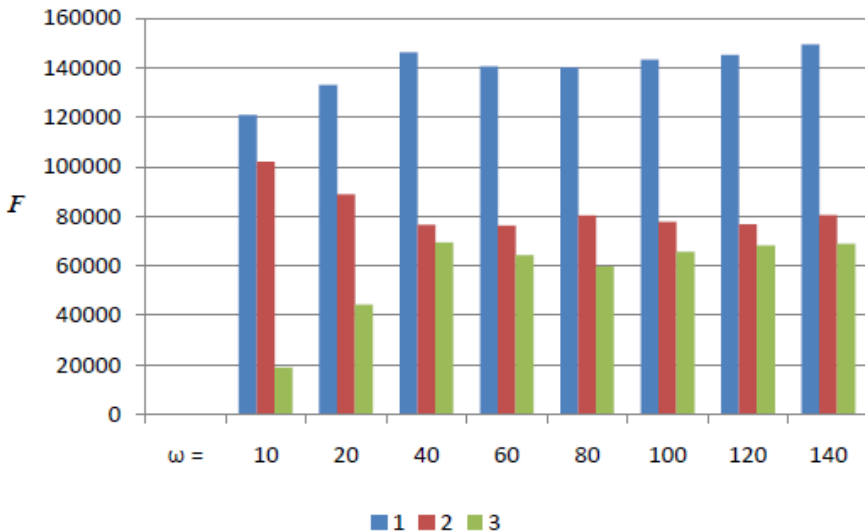


Рис. 7. Значення повних витрат у мережі до – 1, та після – 2 оптимізації, а також отримане зниження витрат після оптимізації – 3 при постійному значенні параметра $w = 40$ і зміні параметра ω

Розв'язання задачі проводилося на ПК з процесором *Intel Core 2 Duo* з тактовою частотою 2,66 ГГц та оперативною пам'яттю 2 Гб. Час виконання програми для всіх варіантів рішення не перевищував 2 секунд.

Програмне забезпечення розроблене в середовищі *Microsoft Developer Visual Studio* і може бути адаптоване для роботи в системі паралельного програмування *Intel® Parallel Studio XE 2020*, до якого увійшли останні версії компіляторів C/C++ та Фортран (<https://software.intel.com/ru-ru/try-buy-tools>).

Висновок

Експериментальне дослідження задачі оптимізації ієрархічної структури комунікаційної мережі показало, що структура мережі слабко змінюється при зміні її найбільш важливих параметрів w та ω . Найкращі результати розв'язку досягаються на близьких один до одного локальних оптимумах, коли значно знижуються повні витрати у мережі, кількість потрібних транспортних блоків та кількість напрямків сортування потоків кореспонденцій, значення мінімального та максимального потоку транспортних блоків по дузі мережі, водночас значно збільшується середній коефіцієнт завантаження транспортного блоку.

Безумовно, проведене експериментальне дослідження на мережах невеликої розмірності не претендує на повноту отриманих результатів для різноманіття можливих складних варіантів структур мережі, однак аналізуючи отримані результати, слід очікувати, що при збільшенні розмірності мережі локальні оптимуми будуть не такі близькі один до одного і структура мережі при зміні параметрів w і ω залишатиметься більш стабільною.

Запропонована комп'ютерна технологія розв'язання задачі при зміні її параметрів дозволяє проєктувальнику в інтерактивному режимі моделювати різні варіанти мережі, змінюючи топологію, ієрархічну структуру, потоки, параметри та обмеження моделі, і з отриманої множини результатів вибрати найкращий варіант з урахуванням обраної цільової функції і прийнятих обмежень; розраховувати попередні техніко-економічні показники функціонування мережі при прогностичних значеннях потоків, оцінювати вартість додаткових ресурсів та планувати величину потрібних інвестицій на модернізацію та будівництво її структурних елементів, що в кінцевому підсумку дає можливість підвищити ефективність функціонування мережі за рахунок оптимізації використання її ресурсів та зниження експлуатаційних витрат на обробку та транспортування потоків.

Математична модель задачі оптимізації ієрархічної структури мережі, а також запропоновані методи і алгоритми її розв'язання можуть бути використані для проєктування магістральних мереж передачі даних з технологією віртуальних контейнерів. Окремі результати роботи можуть з успіхом застосовуватися і до інших мережевих структур – мереж мобільного, поштового зв'язку та ін.

Розроблений інструментарій може бути також використаний для моделювання ієрархічної структури та оптимізації функціонування традиційних логістичних виробничих та транспортно-складських мережевих систем, що включають вузли постачальників сировини, виробництва товарів, склади та кінцевих споживачів, зокрема й у військовій сфері в умовах проведення бойових дій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Васянин, В.А. (2011). Модели и алгоритмы распределения дискретных многопродуктовых потоков в зональных сетях иерархических структур. *Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць*. Київ, 8, 176-190. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/58222>
2. Васянин, В.А. & Трофимчук, А.Н. (2012). Задача выбора иерархической структуры многопродуктовой коммуникационной сети с мелкопартионными дискретными потоками. *Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць*. Київ, 10, 182-204. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/57543>
3. Трофимчук, А.Н. & Васянин, В.А. (2013). Оптимизация процессов обработки и распределения потоков мелкопартионных грузов в иерархической многопродуктовой транспортной сети. *Sisteme de transport și logistică: Materialele Conferinței Internaționale, Chișinău, 11-13 decembrie 2013 / red. resp.: Dumitru Solomon; col. red.: Dumitru Gortolomei [et al.]. Chișinău: Evrica, ATIC, (Tipogr. AȘM). 317-331. Antetit.: Academia de Transporturi, Informatică și Comunicații.*
4. Trofymchuk, O.M., Ushakova, L.P. & Vasyanin, V.A. (2014). Management and decision making in hierarchical communication networks with discrete flows. V International Conference on Optimization Methods and Applications «Optimization and applications» (OPTIMA-2014) held in Petrovac, Montenegro, September 28 - October 4, Petrovac, Montenegro: Proceedings. Moscow, Russia: ESC Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Russia, 187-188.
5. Трофимчук, А.Н. & Васянин, В.А. (2016). Компьютерное моделирование иерархической структуры коммуникационной сети с дискретными многопродуктовыми потоками. *УСuM*, 2, 48-57. <https://doi.org/10.15407/usim.2016.02.048>
6. Васянин, В.А. (2016). Компьютерное моделирование распределения и маршрутизации дискретных многопродуктовых потоков в коммуникационной сети. *УСuM*, 3, 43-53. <https://doi.org/10.15407/usim.2016.03.043>
7. Трофимчук, А.Н., Ушакова, Л.П. & Васянин, В.А. (2016). Компьютерная технология моделирования иерархической структуры сети с дискретными потоками. *Modelare matematică, optimizare și tehnologii informaționale: Materialele Conferinței Internaționale, Volumul II, Chișinău, 22-25 martie 2016 / red. resp.: Dumitru Solomon; col. red.: Dumitru Lozovanu [et al.]. Chișinău: Evrica, ATIC, (Tipogr. AȘM), 2, 354-365. Antetit.: Academia de Transporturi, Informatică și Comunicații.*
8. Васянин, В.А., Трофимчук, А.Н. & Ушакова Л.П. (2016). Экономико-математические модели задачи распределения потоков в многопродуктовой коммуникационной сети. *Математичне моделювання в економіці*. 2, 5-21. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/131848>
9. Трофимчук, А.Н., Васянин, В.А. & Ушакова, Л.П. (2021). Исследование задачи оптимизации иерархической структуры разреженной и плотной коммуникационной сети. *Проблемы управления и информатики*, 1, 5-21. <https://doi.org/10.34229/0572-2691-2021-1-1>. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PUI_2021_1_3
10. Трофимчук, А.Н., Васянин, В.А. & Ушакова, Л.П. (2021). Анализ решения задачи оптимизации иерархической структуры разреженной и плотной коммуникационной сети. *International Scientific Conference MATHEMATICAL MODELING, OPTIMIZATION AND INFORMATION TECHNOLOGIES 7th edition (15-19 November, 2021) / Chișinău – Київ – Batum. 333-334. <https://www.youtube.com/watch?v=pNLRCmVeRbI> (видеодоклад).*
11. Vasyanin, V.A., Trofymchuk, O.M. & Ushakova, L.P. (2022). Problem of Groupage Cargo Routing in the Multicommodity Transport Network with Given Tariffs and Delivery Time Constraints. *Cybern Syst Anal.* **58**, 966–976. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00531-z>. <https://rdocu.be/c2Vh9>
12. Cohn, A., Root, S., Wang, A. & Mohr, D. (2007). Integration of the Load Matching and Routing Problem with Equipment Balancing for Small Package Carriers. University of

- Michigan Industrial and Operations Engineering, Technical Report number 05-04. - 2005. 31. (see also *Transportation Science*. 41(2). 238-252). <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0174>
13. E. Hellsten, D.F. Koza, I. Contreras, J.F. Cordeau & D. Pisinger. (2021). The transit time constrained fixed charge multi-commodity network design problem. *Computers & Operations Research*. 136, 105511. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105511>
14. Alessio Trivella, Francesco Corman, David F. Koza & David Pisinger. (2021). The multi-commodity network flow problem with soft transit time constraints: *Application to liner shipping*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 150, 102342. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102342>
15. Trofymchuk, O.M. & Vasyanin, V.A. (2015). Simulation of Packing, Distribution and Routing of Small-Size Discrete Flows in a Multicommodity Network. *Journal of Automation and Information Sciences*. 47(7). 15-30. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v47.i7.30>
16. Vasyanin, V.A. (2015). Problem of Distribution and Routing of Transport Blocks with Mixed Attachments and Its Decomposition. *Journal of Automation and Information Sciences*. 47(2). 56-69. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v47.i2.60>
17. O.M. Trofymchuk, V.A. Vasyanin & V.N. Kuzmenko. (2016). Complexity of one packing optimization problem, *Cybern. Syst. Analysis*, 52(1), 76–84. <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9802-9>
18. O.M. Trofymchuk, V.A. Vasyanin & V.N. Kuzmenko, (2016). Optimization algorithms for packing of small-lot correspondence in communication networks, *Cybern. Syst. Analysis*, 52(2), 258–268. <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9822-5>
19. V.A. Vasyanin. (2014). A Two-Criterion Lexicographic Algorithm for Finding All Shortest Paths in Networks, *Cybernetics and Systems Analysis*, 50(5), 759-767. <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9666-9>
20. Васянин, В.А. (2014). Справочная матрица слияния потоков в задачах оптимизации упаковок на многопродуктовых сетях. *Системні дослідження та інформаційні технології*, 3. 42-49. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/85552/05-Vasyanin.pdf?sequence=1>
21. Васянин, В.А. & Трофимчук, А.Н. (2010). Автоматизация процессов принятия решений в многопродуктовых коммуникационных сетях с мелкопартионными дискретными потоками. *Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць*. Київ, 5, 172-213. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/19407>
22. Трофимчук, А.Н. & Васянин, В.А. (2015). Информационные технологии поддержки принятия решений в коммуникационных сетях с дискретными потоками. *14 Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях»*, Київ, Пуща-Водиця, 5–9 жовтня 2015 р. Київ, 64-70.
23. Свідectво про реєстрацію авторського права на твір «Комп'ютерна програма оптимізації ієрархічної структури багатопродуктової комунікаційної мережі з дискретними потоками» / заявник і власник О.М. Трофимчук, В.О. Васянин, Л.П. Ушакова; А. с. від 20.07.2016 № 66791, Державна служба інтелектуальної власності України; заявка від 25.05.2016 № 67221 про реєстрацію авторського права на твір.
24. Васянин, В.А. & Ушакова, Л.П. (2015). Балансировка матрицы контейнерных потоков в задаче перевозки мелкопартионных грузов. *Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць*. Київ, 17, 98-115. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ebpk_2015_1_13
25. Методология проектирования многопродуктовых коммуникационных сетей с дискретными потоками [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 01.05.02 / Васянин Владимир Александрович; НАН Украины, Ин-т телекоммуникаций и глобал. информ. пространства. Киев, 2017. 497 с. https://itgip.org/wp-content/uploads/2017/03/dis_Vas.pdf

Стаття надійшла до редакції 10.08.2023 і прийнята до друку після рецензування 14.12.2023

REFERENCES

1. Vasyanin, V.A. (2011). Models and algorithms for the distribution of discrete multicommodity flows in zonal networks of hierarchical structures. *Environmental safety and natural resources: Zb. Sciences. prats*, 8, 176-190 [in Russian]. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/58222>
2. Vasyanin, V.A. & Trofimchuk, A.N. (2012). The problem of choosing the hierarchical structure of a multicommodity communication network with small batch discrete flows. *Environmental safety and natural resources: Zb. Sciences. Prats*, 10, 182-204 [in Russian]. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/57543>
3. Trofimchuk, A.N. & Vasyanin, V.A. (2013). Optimization of the processing and distribution of small-lot cargo flows in a hierarchical multiproduct transport network. *Sisteme de transport și logistică: Materialele Conferinței Internaționale, Chișinău, 11-13 decembrie 2013 / red. resp.: Dumitru Solomon; col. red.: Dumitru Gortolomei [et al.]*. Chișinău: Evrica, ATIC, (Tipogr. AȘM). 317-331. Antetit.: Academia de Transporturi, Informatică și Comunicații.
4. Trofymchuk, O.M., Ushakova, L.P. & Vasyanin, V.A. (2014). Management and decision making in hierarchical communication networks with discrete flows. V International Conference on Optimization Methods and Applications «Optimization and applications» (OPTIMA-2014) held in Petrovac, Montenegro, September 28 - October 4, Petrovac, Montenegro: Proceedings. Moscow, Russia: ESC Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Russia, 187-188.
5. Trofimchuk, A.N. & Vasyanin, V.A. (2016). Computer simulation of the hierarchical structure of a communication network with discrete multicommodity flows. *USiM*, 2, 48-57 [in Russian]. <https://doi.org/10.15407/usim.2016.02.048>
6. Vasyanin, V.A. (2016). Computer modeling of distribution and routing of discrete multicommodity flows in a communication network. *USiM*, 3, 43-53 [in Russian]. <https://doi.org/10.15407/usim.2016.03.043>
7. Trofimchuk, A.N., Ushakova, L.P. & Vasyanin, V.A. (2016). Computer technology for modeling the hierarchical structure of a network with discrete flows. *Modelare matematică, optimizare și tehnologii informaționale: Materialele Conferinței Internaționale, Volumul II, Chișinău, 22-25 martie 2016 / red. resp.: Dumitru Solomon; col. red.: Dumitru Lozovanu [et al.]*. Chișinău: Evrica, ATIC, (Tipogr. AȘM), 2, 354-365. Antetit.: Academia de Transporturi, Informatică și Comunicații.
8. Vasyanin, V.A., Trofimchuk, A.N. & Ushakova L.P. (2016). Economic and mathematical models of the problem of distribution of flows in a multicommodity communication network. *Mathematical modeling in economics*, 2, 5-21 [in Russian]. <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/131848>
9. Trofimchuk, A.N., Vasyanin, V.A. & Ushakova, L.P. (2021). Study of the problem of optimizing the hierarchical structure of a sparse and dense communication network. *Problems of management and informatics*, 1, 5-21 [in Russian]. <https://doi.org/10.34229/0572-2691-2021-1-1>. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PUI_2021_1_3
10. Trofimchuk, A.N., Vasyanin, V.A. & Ushakova, L.P. (2021). Analysis of the solution of the problem of optimizing the hierarchical structure of a sparse and dense communication network. In *International Scientific Conference Mathematical modeling, optimization and information technologies* (7th ed., pp. 333-334). Chișinău – Kyiv – Batum [in Russian]. <https://www.youtube.com/watch?v=pNLRCmVeRbI> (video report).
11. Vasyanin, V.A., Trofymchuk, O.M. & Ushakova, L.P. (2022). Problem of Groupage Cargo Routing in the Multicommodity Transport Network with Given Tariffs and Delivery Time Constraints. *Cybern Syst Anal*, 58, 966–976. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00531-z>. <https://rdcu.be/c2Vh9>

12. Cohn, A., Root, S., Wang, A. & Mohr, D. (2007). Integration of the Load Matching and Routing Problem with Equipment Balancing for Small Package Carriers. University of Michigan Industrial and Operations Engineering, Technical Report number 05-04. - 2005. 31. (see also *Transportation Science*, 41(2), 238-252). <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0174>
13. Hellsten, E., Koza, D.F., Contreras, I., Cordeau, J.F. & Pisinger, D. (2021). The transit time constrained fixed charge multi-commodity network design problem. *Computers & Operations Research*, 136, 105511. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105511>
14. Alessio Trivella, Francesco Corman, David F. Koza & David Pisinger. (2021). The multi-commodity network flow problem with soft transit time constraints: *Application to liner shipping*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 150, 102342. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102342>
15. Trofymchuk, O.M. & Vasyanin, V.A. (2015). Simulation of Packing, Distribution and Routing of Small-Size Discrete Flows in a Multicommodity Network. *Journal of Automation and Information Sciences*, 47(7), 15-30. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v47.i7.30>
16. Vasyanin, V.A. (2015). Problem of Distribution and Routing of Transport Blocks with Mixed Attachments and Its Decomposition. *Journal of Automation and Information Sciences*, 47(2), 56-69. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v47.i2.60>
17. Trofymchuk, O.M., Vasyanin, V.A. & Kuzmenko, V.N. (2016). Complexity of one packing optimization problem. *Cybern. Syst. Analysis*, 52(1), 76-84. <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9802-9>
18. Trofymchuk, O.M., Vasyanin, V.A. & Kuzmenko, V.N. (2016). Optimization algorithms for packing of small-lot correspondence in communication networks. *Cybern. Syst. Analysis*, 52(2), 258-268. <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9822-5>
19. Vasyanin, V.A. (2014). A Two-Criterion Lexicographic Algorithm for Finding All Shortest Paths in Networks. *Cybernetics and Systems Analysis*, 50(5), 759-767. <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9666-9>
20. Vasyanin, V.A. (2014). Reference Matrix of Flow Merging in Packing Optimization Problems on Multicommodity Networks. *System follow-up and information technologies*, 3, 42-49 [in Russian]. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/85552/05-Vasyanin.pdf?sequence=1>
21. Vasyanin, V.A. & Trofimchuk, A.N. (2010). Automation of decision-making processes in multi-product communication networks with small batch discrete flows. *Environmental safety and natural resources: Zb. Sciences. prats*, 5, 172-213 [in Russian]. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/19407>
22. Trofimchuk, A.N. & Vasyanin, V.A. (2015). Information technologies for decision support in communication networks with discrete flows. In *14 International scientific and practical conference "Modern information technologies for the management of environmental safety, environmental protection, visits in extreme situations"* (pp. 64-70). Kyiv [in Russian].
23. Certificate of copyright registration for the work "Computer program for optimizing the hierarchical structure of a multi-product communication network with discrete flows". Applicant and owner O.M. Trofymchuk, V.O. Vasyanin, L.P. Ushakova; A. p. dated 07/20/2016 No. 66791, State Intellectual Property Service of Ukraine; application dated 05/25/2016 No. 67221 on registration of copyright to the work.
24. Vasyanin, V.A. & Ushakova, L.P. (2015). Balancing the matrix of container flows in the problem of small-lot cargo transportation. *Environmental safety and natural resources: Zb. Sciences. prats*, 17, 98-115 [in Russian]. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ebp_k_2015_1_13
25. Vasyanin, V.A. (2017). Methodology for designing multicommodity communication networks with discrete flows, Doctoral Thesis, Kyiv [in Russian]. https://itgip.org/wp-content/uploads/2017/03/dis_Vas.pdf

The article was received 10.08.2023 and was accepted after revision 14.12.2023

Васянін Володимир Олександрович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу прикладної інформатики, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4046-5243> **e-mail:** archukr@meta.ua

Трофимчук Олександр Миколайович

член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, директор, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** itgis@nas.gov.ua

Ушакова Людмила Павлівна

провідний інженер відділу прикладної інформатики, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9020-1329> **e-mail:** archukr@i.ua

УДК 004.5:004.6:007.51 001.891-021

Oleksandr Nesterenko¹, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Information Technologies
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5329-889X>
e-mail: oleksandr_nesterenko@ieu.edu.ua

Valery Polischuk², Candidate of Engineering Sciences, Leading Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6991-0617> *e-mail*: valery.polischuk@ukr.net

Serhii Zharinov², Director
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3568-8127> *e-mail*: serhii.zharinov@gmail.com

¹International European University, Kyiv, Ukraine

²Ukrainian Scientific Center for Development of Information Technologies, Kyiv, Ukraine

APPLICATION OF INTEGRATIVE INFORMATION TECHNOLOGY IN THE EVALUATION PROCESSES OF RESEARCH INSTITUTIONS

Abstract. *The article proposes a solution to the scientific-applied problem of automating decision support regarding the review of criteria and indicators used in the evaluation of state-supported scientific institutions. This topic is highly relevant for scientific and technical activities both in the conditions of martial law and during the restoration of the country in peacetime. To address this issue, an information technology for decision support by experts is proposed based on an integrative methodology that involves data structuring, support for expert judgments, and visualization of decision-making processes using methods such as approval voting, hierarchy analysis, analytical networks, computer ontologies, and elements of graph theory. A concise description of the integrative methodology and the cognitive process of solving unstructured multi-criteria problems supported by this methodology is provided. The functionality of the developed software toolkit is discussed using an illustrative example related to determining the criteria base for the evaluation of scientific institutions. Elements of the ontological evaluation framework, a hierarchical model for the decision-making task of selecting quantitative assessment alternatives, and the results of experts determining criteria weights for evaluating alternatives and conducting pairwise comparisons of alternatives are presented. The conducted research indicates that the developed methodology and software tools, which have previously been tested in law enforcement agencies, can also be applied in other structures of government administration. The obtained results, aimed at enhancing the efficiency of evaluating scientific institutions, can be utilized to support decision-making in various aspects of managing scientific and technical activities.*

Keywords: *AHP; acceptable vote; visualization; graphs; scientific and technical activity; institutional evaluation.*

© О.В. Нестеренко, В.Б. Поліщук, С.С. Жарінов, 2024

О.В. Нестеренко¹, В.Б. Поліщук², С.С. Жарінов²

¹Міжнародний європейський університет, м. Київ, Україна

²Державне підприємство «Український науковий центр розвитку інформаційних технологій», м. Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕГРАТИВНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ В ПРОЦЕСАХ ОЦІНЮВАННЯ НАУКОВИХ УСТАНОВ

***Анотація.** В статті пропонується вирішення науково-прикладної задачі автоматизації підтримки прийняття рішень щодо перегляду критеріїв і показників, що застосовуються при оцінюванні наукових установ, яким надається підтримка держави. Дана тематика має значну актуальність як в умовах військового стану, так і при відновленні країни у мирний час. Для вирішення даної задачі запропонована інформаційна технологія підтримки прийняття рішень експертами на основі інтеграційної методології, що передбачає структурування даних, підтримку експертних суджень та візуалізацію процесів прийняття рішень з застосуванням методів схвального голосування, аналізу ієрархії, аналітичних мереж, комп'ютерних онтологій та елементів теорії графів. Наведено стислий опис інтеграційної методології та когнітивного процесу розв'язання неструктурованих багатокритеріальних задач, що підтримується цією методологією. Функціональність розробленого програмного інструментарію розглянуто на ілюстративному прикладі щодо визначення критеріальної бази оцінювання наукових установ. Представлено елементи онтологічної бази оцінювання, ієрархічну модель задачі вибору варіантів системи кількісного оцінювання, а також результати процедури визначення експертами ваг критеріїв для оцінювання альтернатив та проведення попарних порівнянь альтернатив. Проведені дослідження свідчать, що розроблена методологія та програмний інструментарій, які попередньо були апробовані в установах сектору безпеки і оборони, можуть застосовуватись й в інших структурах державного управління. Отримані результати, що спрямовані на підвищення рівня ефективності оцінювання наукових установ, можуть бути використані для підтримки прийняття рішень в різних напрямках управління науково-технічною діяльністю.*

***Ключові слова:** метод аналізу ієрархії; схвальне голосування; візуалізація; графи; науково-технічна діяльність; інституційне оцінювання.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.126-142>

Вступ

У зв'язку з динамічними змінами у науці і технологіях, військово-політичній ситуації та стані економіки, а також у пріоритетних напрямках розвитку науково-технічної сфери існуюча система визначення і оцінювання діяльності наукових установ потребує періодичного перегляду і постійного вдосконалення. Серед інструментів державної підтримки наукової діяльності важливе місце займає Державний реєстр наукових установ, яким надається підтримка держави (далі – Реєстр). Законодавче забезпечення його діяльності вимагає періодичної актуалізації методичного забезпечення оцінювання діяльності наукових установ (НУ). Перегляд критеріїв і показників, які застосовуються при оцінюванні НУ, представляє собою багатокритеріальну задачу вибору альтернатив, якими можуть бути варіанти складу критеріїв та

бальної оцінки їх внеску у загальну оцінку діяльності наукової установи. Розв'язання цієї задачі доцільно забезпечувати на основі відносно простої і у той же час науково обґрунтованої інформаційної технології, що базується на інтеграції низки методів підтримки прийняття рішень, а саме методів схвального голосування, аналізу ієрархій, аналітичних мереж з використанням онтологічних моделей даних та візуалізації процесів оцінювання альтернатив на графах. Ця технологія може використовуватись групою експертів із залученням спеціалістів наукових організацій різного профілю та сприятиме підвищенню об'єктивності у прийнятті рішень та їх ефективності.

Огляд літератури

Питання оцінювання діяльності наукових установ вже тривалий час залишається актуальним у всьому світі, викликаючи широкі дискусії щодо досконалості цих процесів і навіть доцільності проведення оцінювання [1]. Тим не менш, незважаючи на те, що зауваження щодо якості кількісних вимірів та експертної оцінки звучать все частіше, оцінка результатів досліджень і наукової діяльності стала очевидною необхідністю в багатьох країнах та є невід'ємним елементом управління науково-дослідною практикою. Відповідно у наукометричній літературі доступна значна кількість оціночних досліджень продуктивності публікацій [2]. В Україні також багатьма дослідниками звертається увага на незадовільну реалізацію існуючого законодавчого забезпечення розвитку науково-технологічної сфери в частині актуалізації пріоритетних напрямів і критеріїв для оцінки суб'єктів наукової діяльності з метою їх підтримки [3–7]. Так, наприклад, у роботі [6] на основі аналізу існуючого стану вітчизняної практики оцінювання наукової, науково-технічної та інноваційної діяльності наукових установ у порівнянні із світовим досвідом зроблено висновки про ненадійність метрик оцінки діяльності дослідницьких організацій та необхідність застосування експертних методів оцінювання, доповнених кількісними показниками.

Для подолання цих невідповідностей дослідники та фахівці пропонують низку підходів до підтримки прийняття рішень у багатокритеріальному середовищі, зокрема спираючись на евристичні інтерактивні та експертні методи. В роботі [8] представлено результати розроблення нових методів оцінювання продуктивності суб'єктів наукової діяльності (науковців і закладів вищої освіти), моделі й інформаційну технологію, які можуть бути використані для практичної організації наукової діяльності. В роботі [9] розглянуто підхід до розроблення та класифікації сценаріїв передбачення розвитку важливих наукових областей. Індикатори для кожного форсайту використовувалися для оцінки конкретної ймовірності реалізації кожного сценарію. Цей підхід може мотивувати та спрямовувати стратегічне планування та інвестиційні рішення щодо наукових установ відповідно до очікуваного майбутнього.

Вирішенню цих проблем сприятиме цифровізація процесів оцінювання діяльності НУ, що передбачає використання відкритих офіційних баз даних і державних реєстрів з даними про діяльність НУ, надання експертам достатньо простого і в той же час науково-обґрунтованого і формалізованого комп'ютерного інструментарію [10].

Для забезпечення підтримки прийняття рішень автори пропонують різноманітні підходи. Серед методів підтримки прийняття рішень в умовах, які характеризуються високою складністю та внутрішньою невизначеністю, значного поширення знайшов експертний метод аналізу ієрархій (MAI), за зарубіжною літературою відомий як АНР (Analytic Hierarchy Process). У статті [11] зазначається, що величезна кількість інформації, пов'язаної з управлінням, зазвичай доступна у формі експертних знань і може бути цінним джерелом для підвищення ефективності процесів прийняття рішень. Тому запропоновано використання MAI для інтеграції як статистичних кількісних даних, так і експертних знань у процесі прийняття рішень для ранжування альтернатив.

Серед засобів підтримки прийняття рішень набуває значної популярності візуалізація процесів та даних. Досліджуються різні аспекти візуалізації, починаючи від опрацювання основних принципів створення візуалізацій до вивчення когнітивних процесів, що лежать в основі їх використання [12]. Важливе значення візуалізація має при прийнятті групових рішень, коли двоє або більше експертів мають колективно зробити вибір з конкуруючого набору альтернатив на основі власних індивідуальних уподобань. Багато досліджень у галузі соціальних наук підтверджують цей висновок [13]. Вони показують, що візуалізовані у вигляді графів дані потребують менших когнітивних зусиль при інтерпретації, сприяють ефективності комунікації, ясності, швидкості та розуміння складних понять.

Наведений огляд літератури свідчить про важливість інформаційної підтримки прийняття рішень. Сучасним підходом до структурування різноманітної інформації є застосування комп'ютерних онтологій, що дозволяє інтегрувати експертні знання на основі ієрархічної структури даних та відношень між поняттями та об'єктами предметної області для загального розуміння інформаційних структур [14]. Враховуючи, що багатокритеріальна задача може бути представленою ієрархічною системою, а метод аналізу ієрархій добре підходить для ієрархічних структур даних, в багатьох роботах пропонується застосування MAI разом з онтологіями [15].

В роботі [16] зазначається, що для прийняття рішень в багатокритеріальному середовищі потрібно застосовувати мультифункціональні методології підтримки, які б враховували інформаційну складність задач. На основі такої методології в роботах [17, 18] запропоновано та обґрунтовано експертний метод, що інтегрує декілька відомих методів – схвального голосування (МСГ), аналізу ієрархій (MAI), аналітичних мереж (МАН) у поєднанні з онтологічними моделями даних та застосуванням графів для візуалізації процесів вибору альтернатив. З використанням експериментального зразка програмного засобу цього інтеграційного методу виконано низку апробацій в сфері оборони та цивільного захисту.

Матеріали і методи

Розглянемо одну з апробацій вищеназваного інтеграційного методу на прикладі визначення критеріальної бази оцінювання діяльності наукових установ. Для оцінювання наукової діяльності традиційно розрізняють зовнішні та внутрішні критерії. Внутрішні характеризують якість науки, рівень розвитку даної сфери досліджень, спроможність наукових установ (НУ)

виконувати дослідження і розробки, зокрема компетентність дослідників, обґрунтованість запропонованої вченими методики дослідження тощо. Зовнішні критерії свідчать про наукову цінність досліджень з точки зору наукової корисності, технологічної та суспільної потреби. Найважливішими з них є узгодженість зі стратегічними цілями держави у сфері оборони і економіки, вклад у розв'язання важливих соціальних проблем, участь в освоєнні перспективних наукових напрямків.

Для застосування внутрішніх критеріїв існує низка методичних розробок, багато з яких застосовуються на практиці. Як показує аналіз публікацій з тематики оцінювання діяльності НУ і окремих вчених, а також практика оцінювання, його об'єктивність може бути забезпечена застосуванням комбінованого підходу, який ґрунтується як на використанні бальних оцінок за визначеними показниками (чисельний, формальний підхід), так і на експертному оцінюванні (евристичний підхід). Сучасний рівень розвитку інформаційно-комунікаційних технологій дозволяє враховувати різні складові критеріїв, зокрема за публікаціями і цитуванням на основі міжнародних наукових баз даних і мереж (рис. 1).

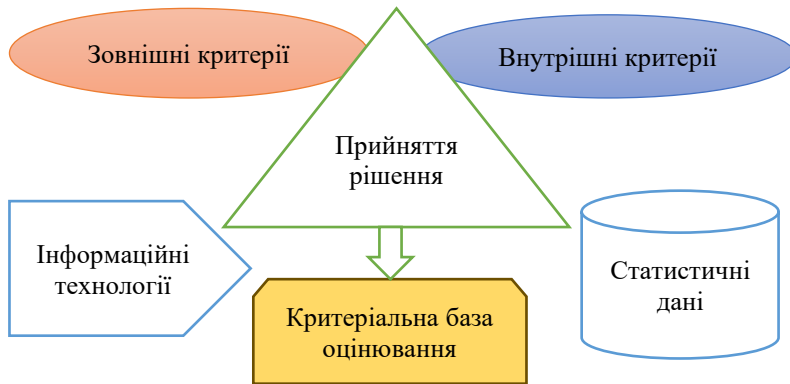


Рис. 1. Модель середовища формування критеріальної бази системи оцінювання діяльності наукових установ

Застосовувати зовнішні критерії оцінювання наукових досліджень складніше. У зв'язку із тим, що стратегічні цілі держави, важливі соціальні проблеми сформульовані на словесному (вербальному) рівні, а напрями наукових досліджень, програми і проекти повинні носити конкретний, цільовий характер, між їх формулюваннями існує семантичний розрив. Для вирішення цієї проблеми потрібна формалізація зовнішніх критеріїв. Так, наприклад, критеріальною основою при визначенні пріоритетів розвитку науково-технічної сфери експертні оцінки можуть спиратись на об'єктивні дані щодо стану предмету досліджень на основі концепції сталого розвитку. Методологія і результати оцінювання сталого розвитку можуть слугувати «перехідним містком» від вербальних формулювань зовнішніх критеріїв до визначення складових напрямів, програм та тематики досліджень, розробок і проектів.

Серед інструментів державної підтримки наукової діяльності важливе місце займає Державний реєстр наукових установ, яким надається підтримка

держави. Законодавче забезпечення його діяльності, а також динамічні зміни у науці і технологіях, військово-політичній ситуації та, як наслідок, у стані економіки потребують постійної актуалізації складу критеріїв і показників з метою їх включення до Реєстру. Сутність актуалізації – це перегляд критеріїв і показників оцінювання діяльності НУ, що представляє собою багатокритеріальну задачу вибору альтернатив, якими є варіанти складу критеріїв та бальної оцінки їх внеску у загальну оцінку діяльності наукової установи.

Концептуальна модель технології підтримки оцінювання наукових установ. Для вирішення багатокритеріальних задач напрацьовано низку підходів, більшість з яких спираються на експертні методи. Наведемо короткий опис запропонованої авторами інтегративної методології експертного оцінювання альтернатив. Передусім необхідно зазначити, що процес прийняття рішень зазвичай відбувається принаймні за три послідовні кроки: 1) аналіз проблеми, яку потрібно вирішити, 2) розроблення альтернативного рішення та 3) вибір найкращого рішення. Таким чином, задача прийняття рішення формально може бути визначеною схемою $\{X \rightarrow A, \Phi\} \rightarrow a^*$, де X – множина даних, що представляють область проблеми, $A = \{a\}$ – множина альтернатив (об'єктів вибору), яка може бути дискретною і континуальною; Φ – принцип (функція) вибору, за яким з використанням певних критеріїв встановлюється перевага в множині альтернатив A ; a^* – обрана альтернатива (або декілька), що вважається «найкращою».

В основу процедури експертного формування і оцінювання альтернатив покладено принцип індивідуально-колективної роботи експертів, коли формується група експертів, і вони можуть здійснювати вибір з різних альтернатив із застосуванням своїх неформалізованих Φ . Одним із підходів, що дозволяє вирішувати проблеми, пов'язані з впливом суб'єктивного бачення експертів, є вичерпне інформаційне представлення предметної області за допомогою певної концептуальної схеми. Практично корисним вважається представлення такої схеми у вигляді онтології, що складається з ієрархічної структури даних. Як відомо, в загальному випадку комп'ютерна онтологія формально представляється впорядкованою трійкою $O = \langle X, R, F \rangle$, де X – множина концептів (понять, термінів) предметної області, R – множина відношень та властивостей між ними, F – функції інтерпретації (визначень) X та/або R .

В роботі експертів можна виділити ще одне коло проблем, пов'язаних з когнітивними труднощами сприйняття інформації та логічним мисленням. У таких ситуаціях для кращого розуміння експертами точок зору один одного може бути корисним моделювання та візуальне порівняння своїх уподобань з іншими. Одним з популярних інструментів для поліпшення розуміння проблеми і, зрештою, прийняття ефективних рішень є візуалізація інформації. При цьому найбільш ефективною вважається графічна візуалізація. У якості такого засобу в ІМ запропонована візуалізація процесу парних порівнянь у вигляді орієнтованого графу (V, E) з синхронним контролем забезпечення транзитивності. Вершини V вказаного графу відповідають альтернативам, а ребра E зі стрілкою вказують на переваги альтернатив. Виходячи зі своїх Φ , експерт може коригувати з'єднання вершин графу.

Когнітивний процес прийняття рішень при розв'язанні неструктурованих багатокритеріальних задач, що підтримується інтегративною методологією, показаний на рис. 2.

На етапі аналізу проблеми проводиться дослідження зібраних даних та на їх основі визначення початкового переліку альтернатив A – «long list» (LL). На етапі розроблення альтернатив часто необхідно відібрати скорочений (зазвичай не більше п'яти) перелік альтернатив – «short list» (SL). Найбільш розповсюдженим способом прийняття колективного рішення в експертних групах при вирішенні подібних задач є голосування.

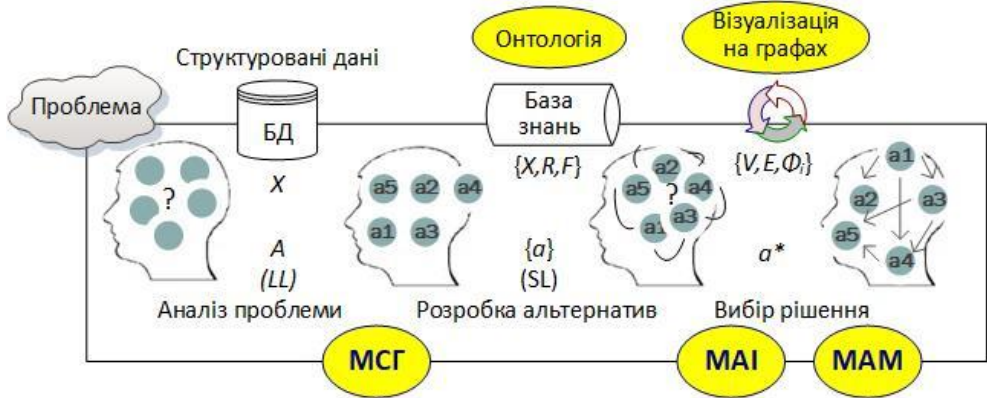


Рис. 2. Когнітивний процес розв'язання неструктурованих багатокритеріальних задач, що підтримується інтегративною методологією

Як відомо, існує декілька різновидів методів голосування, які істотно відрізняються одне від одного. В результаті проведеного аналізу в ІМ за основний прийнято метод схвального голосування, який найменш вразливий до численних парадоксів систем голосування як складових теорії ігор. За цим методом кожний експерт має право підтримати одну або декілька пропозицій (голосування «за») або утриматись від рішення. В такий класичний МСГ авторами внесена модифікація, пов'язана з наданням можливості кожному експерту ще й відхилити будь-яку кількість альтернатив (голосування «проти»). Це дозволяє практично в один тур провести ранжування альтернатив.

В ІМ модифікований МСГ застосовується як основний при вирішенні відносно простих задач і як допоміжний для зменшення кількості альтернатив перед застосуванням МАІ чи МAM.

При виборі базового методу для вирішення більш складних задач з ієрархічною структурою моделі автори ІМ враховували наступні вимоги:

- 1) застосування концепції «векторного» підходу до оцінки альтернатив;
- 2) виконання попарних порівнянь альтернатив за окремими властивостями з використанням як якісних, так і кількісних характеристик з унеможливленням порушення умов транзитивної узгодженості суджень експертів;
- 3) реалізацію композиції експертних оцінок на різних рівнях ієрархії методом вкладення скалярних згорток.

З існуючих методів багатокритеріального аналізу цим вимогам найбільш відповідає метод аналізу ієрархій, який може бути використаний не тільки для вибору альтернатив, а й для визначення відносної важливості самих характеристик. При розробленні ІМ авторами була виконана модифікація МАІ в частині скорочення спеціальної шкали Т. Сааті з дев'яти до п'яти оцінок переваги однієї альтернативи над іншою, що, як показали експериментальні розрахунки, суттєво не впливає на попарні порівняння альтернатив, однак значно спрощує проведення експертами виставлення оцінок за кожним критерієм та відповідно реалізацію цього процесу в програмному інструментарії.

Для забезпечення якісного визначення і подальшого опрацювання ієрархії критеріїв і альтернатив експертами доцільно представити її у вигляді онтологічної моделі разом з атрибутивними описами її складових. Поєднання таксономії предметної області (ПдО) як базових компонент онтологічної системи, що відображають певну ієрархію взаємодії концептів за допомогою бінарних відношень, в єдину онтологічну систему шляхом встановлення відношень між їх концептами утворює інформаційний простір, що має забезпечити експертам вичерпний і чіткий супровід їх діяльності щодо оцінки альтернатив на об'єктивній основі.

Необхідно зазначити, що у складних задачах моделі, які відображають зв'язки між альтернативами і критеріями, можуть мати не ієрархічну, а більш складну – мережеву структуру. У цьому випадку доцільно використати метод аналітичних мереж (Analytic Network Process, ANP), який є розвитком МАІ.

Ілюстративний приклад застосування інтегративної методології. Мета-онтологія предметної області формування та вибору варіантів критеріїв оцінювання діяльності наукових організацій з метою актуалізації методичного забезпечення Державного реєстру наукових установ, яким надається підтримка держави, наведена на рис. 3.



Рис. 3. Мета-онтологія предметної області оцінювання діяльності наукових установ

Інтегративна методологія передбачає декілька етапів роботи експертів. Як показує практика застосування експертних процедур, на підготовчому етапі корисними є побудова таксономії документів, які регламентують діяльність суб'єктів у визначеній предметній області. На рис. 4 наведена таксономія законодавчого та нормативно-методичного забезпечення предметної області «Критеріальна база оцінювання діяльності наукових установ в Державному реєстрі наукових установ, яким надається підтримка держави».

Відповідно до ІМ на першому етапі її застосування, спираючись на мета-онтологію ПДО, формується перелік показників, за якими оцінюється діяльність наукової установи. За результатами голосування отримуємо узгоджений перелік показників, приклад таксономії якого наведений на рис. 5.

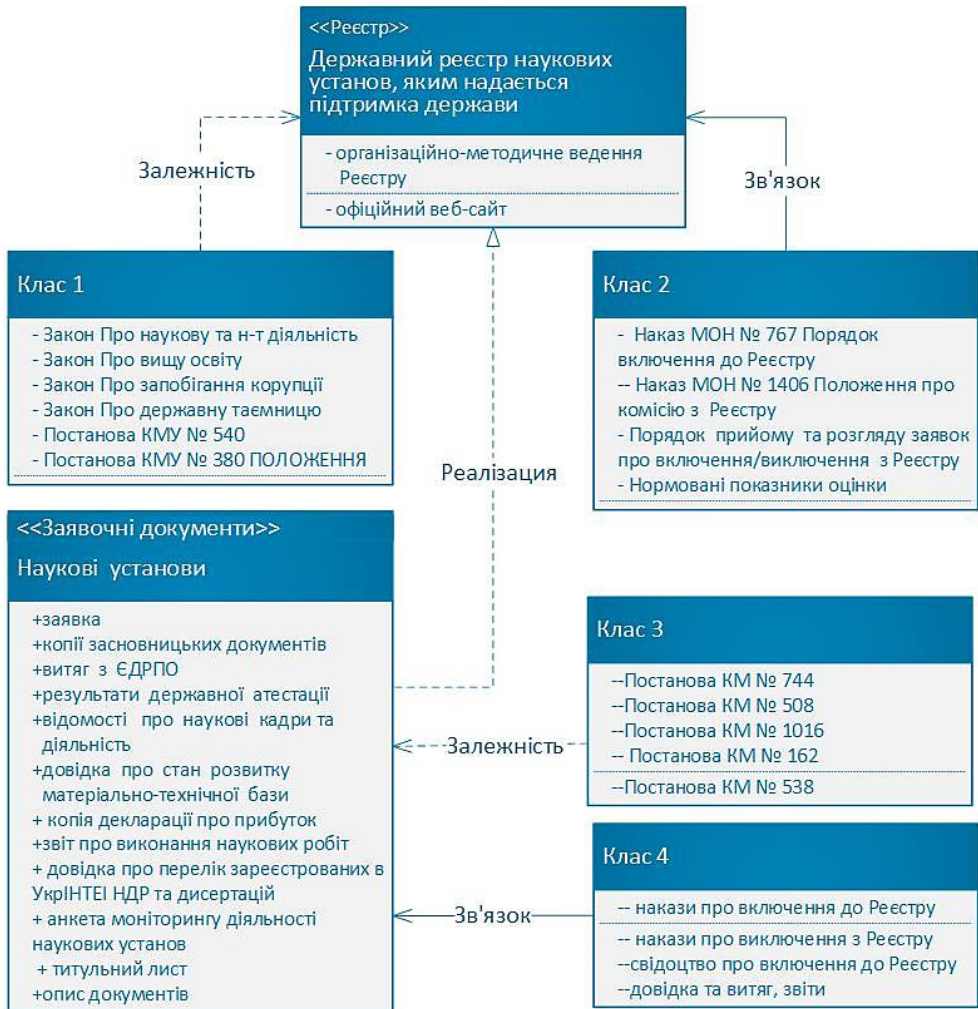


Рис. 4. Таксономія законодавчого та нормативно-методичного забезпечення предметної області

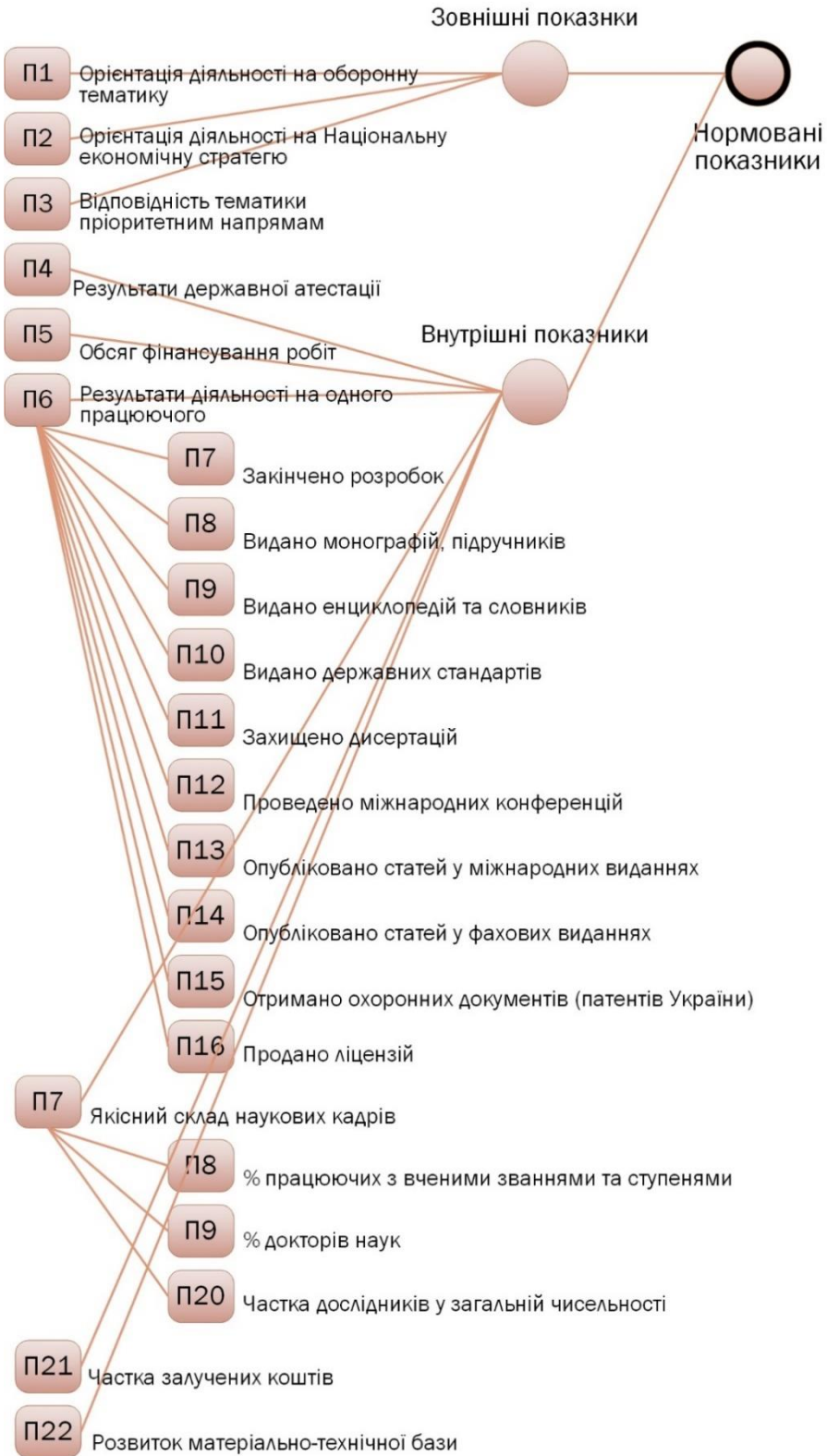


Рис. 5. Таксономія показників, за якими оцінюється діяльність наукової установи

У якості довідкової інформації можуть бути використані статистичні дані та рекомендації, розроблені в наукових організаціях. Для допомоги експертам така інформація має бути структурованою та формалізованою, для чого попередньо формується онтологічна база даних предметної області.

На другому етапі експертами формується перелік альтернатив – варіантів розподілу ваги показників (максимальних оцінок у відсотках в межах сумарного значення 100%). Враховуючи практично необмежену кількість альтернатив у цій предметній області, доцільно сформуувати початковий список (long list) із 7-10 альтернатив, а скорочення списку для спрощення процедур, наприклад, до 5 (short list), може бути виконане методом схвального голосування. Приклад переліку альтернатив А1 – А5 наведений у табл. 1.

Таблиця 1. Перелік альтернатив – варіантів розподілу ваги показників (%)

A1	П1	П2	П3	П4	П5	...	П15	П16	П17	П18	П19	П20
%	15	10	10	10	5	...	5	3	3	3	6	6
A2	П1	П2	П3	П4	П5	...	П15	П16	П17	П18	П19	П20
%	12	12	12	5	5	...	5	3	3	3	8	8
...
A5	П1	П2	П3	П4	П5	...	П15	П16	П17	П18	П19	П20
%	10	10	10	7	7	...	5	3	3	3	9	9

На третьому етапі необхідно побудувати модель критеріїв для оцінювання експертами альтернатив. Зрозуміло, що загальним критерієм при оцінюванні альтернатив є знаходження «розумного» (раціонального) балансу між вагами показників. Враховуючи розподіл показників на зовнішні, які використовуються при оцінюванні орієнтації діяльності НУ на стратегічні цілі держави, і внутрішні, які характеризують потенціал НУ у провадженні наукової діяльності, система критеріїв для ранжування альтернатив може бути наступною:

К1 – збалансованість між сумарною вагою показників, задіяних у визначенні зовнішніх критеріїв оцінювання діяльності НУ (П1 – П3), і сумарною вагою показників, задіяних у визначенні внутрішніх критеріїв оцінювання діяльності НУ (П4 – П22);

К2 – збалансованість між розподілом ваг показників, задіяних у визначенні зовнішніх критеріїв оцінювання діяльності НУ (П1 – П3);

К3 – збалансованість між розподілом ваг показників, задіяних у визначенні внутрішніх критеріїв оцінювання діяльності НУ (П4 – П22).

Загальна модель ПдО «Визначення рейтингу варіантів системи кількісного оцінювання діяльності наукових установ» має ієрархічну структуру (рис. 6), тому на четвертому етапі для ранжування альтернатив (визначення ваги критеріїв) може бути застосований метод аналізу ієрархій.

Результатом застосування МАІ буде узгоджений експертами відранжований перелік альтернатив – варіантів розподілу ваги показників, які пропонуються застосувати при визначенні критеріїв для прийняття рішень щодо включення НУ до Реєстру. На рис. 7–9 наведені результати застосування ІМ з використанням розробленого програмного інструментарію.

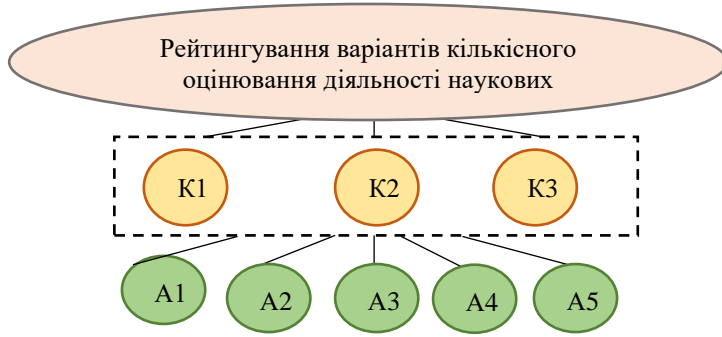


Рис. 6. Ієрархічна модель оцінювання варіантів системи кількісного оцінювання діяльності наукових установ

СПР - Система Прийняття Рішень Василь

Оцінювання діяльності наукових установ • Попарна оцінка альтернатив
Рейтинг критеріїв

Інструменти | Скинути | Зважити всі | Завершити | Допомога

Належність: **Всі**

Критерій↑	Оцінка↑	Експерт↑	Змінено↑
K2 - збалансованість ваг показників зовнішніх критеріїв оцінювання НУ	Підтримую	Василь Ходаківський	< 15 хвилин
K3 - збалансованість ваг показників внутрішніх критеріїв оцінювання НУ	Ознайомлений	Василь Ходаківський	< 15 хвилин
Основні	-	Василь Ходаківський	< 15 хвилин
K1 - збалансованість ваг показників зовнішніх і внутрішніх критеріїв оцінювання НУ	Наполягаю	Василь Ходаківський	< 15 хвилин
K1 - збалансованість ваг показників зовнішніх і внутрішніх критеріїв оцінювання НУ	Підтримую	Юрій Макогонюк	< півгодини
Основні	Ознайомлений	Юрій Макогонюк	< півгодини
K3 - збалансованість ваг показників внутрішніх критеріїв оцінювання НУ	Ознайомлений	Юрій Макогонюк	< півгодини
K2 - збалансованість ваг показників зовнішніх критеріїв оцінювання НУ	Підтримую	Юрій Макогонюк	< півгодини

Рис. 7. Процедура визначення експертами ваг критеріїв для оцінювання альтернатив із застосуванням модифікованого методу схвального голосування

СПР - Система Прийняття Рішень Василь

Оцінювання діяльності наукових установ • Попарна оцінка альтернатив
Критерії

Інструменти | Додати + | Допомога ?

Додати новий рядок

Ім'я↑	Лист	Оцінка	Вага	Активний	Змінено
Основні (2)	o	0	1.000	✓	< години
K1 - збалансованість ваг показників зовнішніх і внутрішніх критеріїв оцінювання НУ	✓	11	0.766	✓	< півгодини
K3 - збалансованість ваг показників внутрішніх критеріїв оцінювання НУ	✓	0	0.051	✓	< півгодини
K2 - збалансованість ваг показників зовнішніх критеріїв оцінювання НУ	✓	2	0.182	✓	< півгодини

Рис. 8. Результати визначення ваг критеріїв

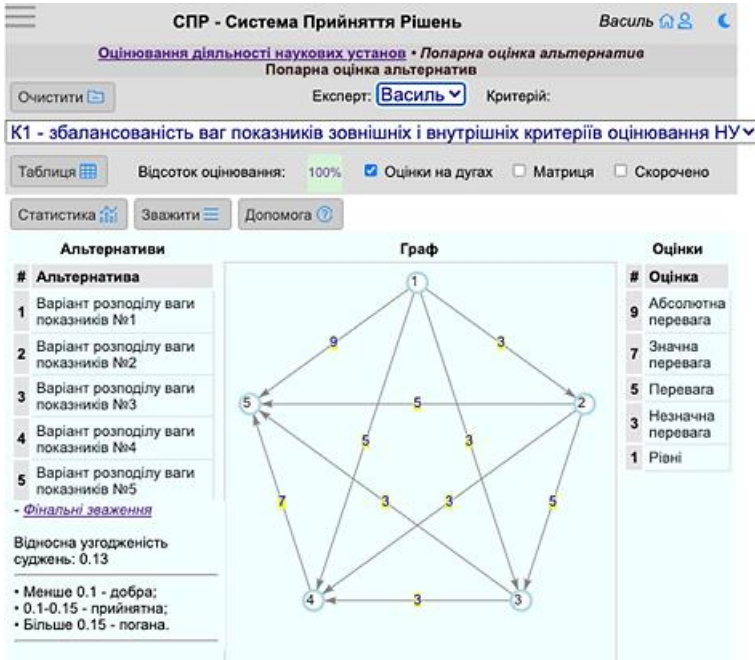


Рис. 9. Проведення попарних порівнянь альтернатив модифікованим методом аналізу ієрархій на основі графової візуалізації

Одним з засобів підтримки прийняття рішень, який реалізує АНР і АНР, є програмне забезпечення Super Decisions, що вільно розповсюджується. Порівняння застосування цього інструменту та розробленого програмного інструментарію показало адекватність отриманих результатів на розглянутій вище задачі. На рис. 10 проілюстрований результат розв'язання задачі методом аналізу ієрархій в середовищі Super Decisions.

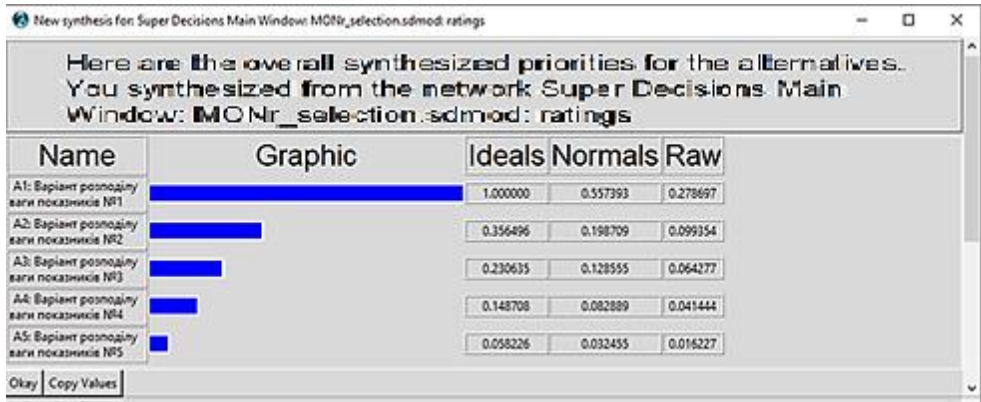


Рис. 10. Результати ранжування альтернатив за всіма критеріями методом аналізу ієрархій в середовищі Super Decisions

На завершення необхідно зазначити, що запропонована методологія і відповідний програмний інструментарій можуть бути використані не тільки при оновленні методичного забезпечення Реєстру, а саме при експертному

ранжуванні альтернативних варіантів складу показників та їх ваг, задіяних у критеріях оцінки НУ, а також безпосередньо при виконанні процедур оцінювання ефективності діяльності конкретних НУ. Особливе значення використання цього методу матиме для уточнення оцінок, отриманих в результаті застосування формального підходу, заснованого на «бальному» оцінюванні, у випадках значної неузгодженості оцінок експертів, виставлених за "традиційними" процедурами або при розгляді апеляцій НУ.

Висновки

Державна політика у науково-технічній сфері повинна бути орієнтованою на підтримку тих наукових організацій, діяльність яких відповідає стратегічним цілям держави на кожному етапі її розвитку. У зв'язку з динамічними змінами у науці і технологіях, військово-політичній ситуації та стані економіки існуюча система визначення пріоритетних напрямів розвитку науково-технічної сфери і оцінювання діяльності наукових установ потребує періодичного перегляду і постійного вдосконалення. Серед інструментів державної підтримки наукової діяльності важливе місце займає Державний реєстр наукових установ, яким надається підтримка держави. Законодавче забезпечення його діяльності вимагає і дозволяє періодично актуалізувати методичне забезпечення оцінювання діяльності наукових установ. Перегляд критеріїв і показників, які застосовуються при оцінюванні НУ, представляє собою багатокритеріальну задачу вибору альтернатив, якими можуть бути варіанти складу критеріїв та бальної оцінки їх внеску у загальну оцінку діяльності наукової установи. Розв'язання цієї задачі можливе на основі відносно простої і у той же час науково обґрунтованої методології, що базується на інтеграції модифікованих методів схвального голосування, аналізу ієрархій, аналітичних мереж з використанням онтологічних моделей даних та візуалізації процесів оцінювання альтернатив на графах. Для підтримки діяльності експертів при виконанні процедур ранжування альтернативних варіантів критеріїв оцінювання діяльності наукових організацій з метою актуалізації методичного забезпечення Реєстру можуть бути застосовані розроблений в Українському науковому центрі розвитку інформаційних технологій відповідний програмний інструментарій та додатково програмне забезпечення Super Decisions, що вільно розповсюджується. Процедура може бути виконана групою експертів із залученням спеціалістів наукових організацій різного профілю, що сприятиме підвищенню об'єктивності у прийнятті рішень. ІМ і відповідний програмний інструментарій можуть також використовуватись безпосередньо при виконанні процедур оцінювання ефективності діяльності конкретних НУ.

Подяки

Автори висловлюють щире подяку колективу науковців та фахівців з розробки програмного забезпечення Державного підприємства «Український науковий центр розвитку інформаційних технологій», в особливості Ходаківському В.М. та Макогонюку Ю.П., за виконану роботу, результати якої узагальнені в даній статті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Brighenti A.M. Science evaluation - As it is, as it could be. *Social Science Information*, 2021, 60(3), Pp. 324–328. <https://doi.org/10.1177/05390184211021205>
2. Pal J. K., Sarkar S. Evaluation of Institutional Research Productivity. *DESIDOC Journal of Library & Information Technology*, 2020, 40 (1). Pp. 58–69. <https://doi.org/10.14429/djlit.40.1.14804>
3. Результативність наукової діяльності: стан, тенденції та проблеми оцінювання / Т. В. Шовкун [та ін.] ; Укр. ін-т наук.-техн. і екон. інформ. Київ : УкрІНТЕІ, 2009. 216 с.
4. Одотюк І. Оцінка результатів наукової діяльності в Україні: нормативно-правовий аспект. *Проблеми інноваційно-інвестиційного розвитку*. 2012. № 3. С. 38–42.
5. Жук Л. В. Системи наукової і науково-технічної діяльності закладів вищої освіти України: формування, оцінювання, управління. Нац. ун-т "Львів. політехніка". Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2019. 335 с.
6. Єгоров І. Ю., Жукович І. А. Розвиток підходів до оцінювання результатів діяльності науково-дослідних установ. *Наука та наукознавство*. 2022. № 3(117). С. 36–50. <https://doi.org/10.15407/sofs2022.03.036>
7. Кубальський О.Н. Феномен науки в системі трансформацій сучасного життя. *Наука та наукознавство*. 2023. № 1 (119). С. 35–46. <https://doi.org/10.15407/sofs2023.01.035>
8. Методи оцінювання продуктивності суб'єктів наукової діяльності : монографія / Білощицький А. О. [та ін.]. Київ : Компринт, 2021. 243 с.
9. Hobday A. J., Boschetti F., Moeseneder C., et al. Quantitative foresighting as a means of improving anticipatory scientific capacity and strategic planning. *One Earth*, 2020. 3(5). 631–644. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.015>
10. Артюхіна М.В., Дьогтева І.О., Жарінов С.С. та ін. Цифровізація процесів управління розвитком міжнародного науково-технічного співробітництва. *Актуальні проблеми економіки*. 2022. № 6-7 (252-253). С. 6–19.
11. Pagano A., Giordano R., Vurro M. A Decision Support System Based on AHP for Ranking Strategies to Manage Emergencies on Drinking Water Supply Systems. *Water Resources Management*. 2021. 35. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02741-y>
12. Padilla L. M., Creem-Regehr S. H., Hegarty M. et al. Decision making with visualizations: a cognitive framework across disciplines. *Cogn. Research*. 2018. 3, 29. <https://doi.org/10.1186/s41235-018-0120-9>
13. Eberhard K. The effects of visualization on judgment and decision-making: a systematic literature review. *Manag Rev Q*. 2021 <https://doi.org/10.1007/s11301-021-00235-8>
14. Nesterenko O., Trofymchuk O. Patterns in forming the ontology-based environment of information-analytical activity in administrative management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 5/2 (101). Pp. 33-42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180107>
15. Xu F.-X., Liu X.-H., Chen W., Zhou C., Cao B.-W. An ontology and AHP based quality evaluation approach for reuse parts of end-of-life construction machinery. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3481030>
16. Nesterenko O., Netesin I., Polischuk V., Selin Y. Multifunctional Methodology of Expert Evaluation Alternatives in Tasks of Different Information Complexity. *IEEE 3rd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*. 2021. Pp. 226–231. <https://doi.org/10.1109/ATIT54053.2021.96787428>
17. Nesterenko O., Netesin I., Polischuk V., Trofymchuk O. Development of a procedure for expert estimation of capabilities in defense planning under multicriterial conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 4/2 (106). P. 33–43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208603>

18. Поліщук В. Б., Нетесін І.Є., Нестеренко О.В. та ін. Інформаційні технології в управлінні оборонними ресурсами: методологічний контекст та приклади практичної реалізації. Частина 2 / Монографія. [За ред. В.Б. Поліщука]. Київ: УкрНЦ РІТ, 2021. 205 с.

Стаття надійшла до редакції 14.09.2023 і прийнята до друку після рецензування 13.12.2023

REFERENCES

1. Brighenti, A.M. (2021). Science evaluation – As it is, as it could be. *Social Science Information*, 60(3), 324–328. <https://doi.org/10.1177/05390184211021205>
2. Pal, J.K., & Sarkar, S. (2020). Evaluation of Institutional Research Productivity. *DESIDOC Journal of Library & Information Technology*, 40(1), 58–69. <https://doi.org/10.14429/djlit.40.1.14804>
3. Shovkun, T.V. et al. (2009). *Effectiveness of scientific activity: state, trends and assessment problems*. Kyiv: UkrINTEI [in Ukrainian].
4. Odotiuk, I. (2012). Evaluation of the results of scientific activity in Ukraine: regulatory and legal aspect. *Problemy innovatsiino-investytsiinoho rozvytku*, 3, 38–42 [in Ukrainian].
5. Zhuk, L.V. (2019). *Systems of scientific and scientific and technical activity of institutions of higher education of Ukraine: formation, evaluation, management*. Lviv: Vyd-vo Lviv. politekhniki [in Ukrainian].
6. Yehorov, I.Yu., & Zhukovych, I.A. (2022). The development of approaches to the evaluation of the results of the activities of research institutions. *Nauka ta naukoznavstvo*, 3(117), 36–50. <https://doi.org/10.15407/sofs2022.03.036> [in Ukrainian].
7. Kubalskyi, O.N. (2023). The phenomenon of science in the system of transformations of modern life. *Nauka ta naukoznavstvo*, 1(119), 35–46. <https://doi.org/10.15407/sofs2023.01.035> [in Ukrainian].
8. Biloshchytskyi, A.O., et al. (2021). *Methods of evaluating the productivity of subjects of scientific activity*. Kyiv: Komprynt [in Ukrainian].
9. Hobday, A.J., Boschetti, F., Moeseneder, C., et al. (2020). Quantitative foresighting as a means of improving anticipatory scientific capacity and strategic planning. *One Earth*, 3(5), 631–644. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.015>
10. Artiukhina, M.V., Dohtieva, I.O., Zharinov, S.S. et al. (2022). Digitization of management processes for the development of international scientific and technical cooperation. *Aktualni problemy ekonomiky*, 6-7 (252-253), 6–19 [in Ukrainian].
11. Pagano, A., Giordano, R., & Vurro, M.A. (2021). Decision Support System Based on AHP for Ranking Strategies to Manage Emergencies on Drinking Water Supply Systems. *Water Resources Management*, 35, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02741-y>
12. Padilla, L.M., Creem-Regehr, S.H., Hegarty, M. et al. (2018). Decision making with visualizations: a cognitive framework across disciplines. *Cogn. Research*, 3, 29. <https://doi.org/10.1186/s41235-018-0120-9>
13. Eberhard, K. (2021). The effects of visualization on judgment and decision-making: a systematic literature review. *Manag Rev Q.* <https://doi.org/10.1007/s11301-021-00235-8>
14. Nesterenko, O., & Trofymchuk O. (2019). Patterns in forming the ontology-based environment of information-analytical activity in administrative management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5/2 (101). 33-42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180107>
15. Xu, F.-X., Liu, X.-H., Chen, W., Zhou, C., & Cao, B.-W. (2018). An ontology and AHP based quality evaluation approach for reuse parts of end-of-life construction machinery. *Mathematical Problems in Engineering*. 3481030. <https://doi.org/10.1155/2018/3481030>
16. Nesterenko, O., Netesin, I., Polischuk, V., & Selin, Y. (2021). Multifunctional Methodology of Expert Evaluation Alternatives in Tasks of Different Information

- Complexity. Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), 226–231. <https://doi.org/10.1109/ATIT54053.2021.96787428>
17. Nesterenko, O., Netesin, I., Polishchuk, V., & Trofymchuk, O. (2020). Development of a procedure for expert estimation of capabilities in defense planning under multicriterial conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/2 (106), 33–43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.208603>
18. Polishchuk, V.B., Netesin, I.E., Nesterenko, O.V. et al. (2021). *Information technologies in the management of defense resources: methodological context and examples of practical implementation*. Part 2. [Ed. V. B. Polishchuk]. Kyiv: UkrNTs RIT [in Ukrainian].

The article was received 14.09.2023 and was accepted after revision 13.12.2023

Нестеренко Олександр Васильович

доктор технічних наук, доцент, старший дослідник, завідувач кафедри інформаційних технологій, Міжнародний європейський університет

Адреса робоча: 03187, Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42В

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5329-889X>

e-mail: oleksandr_nesterenko@ie.u.edu.ua

Поліщук Валерій Борисович

кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник, Державне підприємство «Український науковий центр розвитку інформаційних технологій»

Адреса робоча: 03187, Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 44

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6991-0617> **e-mail:** valery.polischuk@ukr.net

Жарінов Сергій Сергійович

директор, Державне підприємство «Український науковий центр розвитку інформаційних технологій»

Адреса робоча: 03187, Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 44

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3568-8127> **e-mail:** serhii.zharinov@gmail.com

УДК 502/504:355.4:681.004.94

Vasyl Trysnyuk¹, Doctor of Technical Sciences, professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** trysnyuk@ukr.net

Volodymyr Dziuba¹, postgraduate
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-9576-814X> **e-mail:** navvon@ukr.net

Volodymyr Tymchuk², Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3549-2813>
e-mail: volodymyrtymchukasv@gmail.com

¹Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²National Army Academy, Lviv, Ukraine

INFORMATION-TECHNICAL SIMULATION OF THE ELIMINATION OF THE CONSEQUENCES OF MILITARY ACTIONS AND MAN-MADE DISASTERS IN THE TERRITORY OF UKRAINE

Abstract. *The work is devoted to solving the scientific and practical task of modeling the elimination of the consequences of military operations and man-made disasters on the territory of Ukraine.*

Military actions and emergency situations are situations that lead to harmful social, economic and environmental consequences. In the crisis period, rescue measures are carried out, aimed at localizing the consequences of the manifestation of the sources of threat and increasing the survivability of regional components in the affected areas. Territorial distribution, heterogeneity, multi-connectivity and dynamism of impactful impacts and protective measures significantly complicate the processes of managing natural and man-made safety. The purpose of the article is to formulate the formulation of the problem of modeling the liquidation of the consequences of military operations and man-made disasters on the territory of Ukraine, using the principles of a systemic approach. The classification of sources of emergency situations based on the causes of their occurrence, different types of affected objects depending on the nature of behavior in extreme conditions, different types of protection resources that implement the necessary protective measures is given. To find the optimal plan for the use of forces and means of the man-made security system at the stage of liquidation of the consequences of military disasters and man-made disasters, a program-target approach to planning using the Pareto function of the system was used. Direct and inverse problems of finding the optimal plan are considered. The selection of objects for a direct task is carried out in order according to their priority. When solving the inverse problem, objects are selected until a given level of system effect is reached, which accumulates during the selection process. In crisis situations caused by dangerous events, it is important to take effective rescue measures to localize and reduce the consequences of accidental and threatening situations. The main goal of such measures is not only to increase the survivability of the regions in the affected areas, but also to ensure the rapid restoration of the normal functioning of society after the crisis.

Key words: *information technology; ecosystem; military operations; man-made disasters; target efficiency; Pareto function; modeling.*

В.М. Триснюк¹, В.А. Дзюба¹, В.Ю. Тимчук²

¹Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

²Національна академія Сухопутних військ, м. Львів, Україна

ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ ТА ТЕХНОГЕННИХ КАТАСТРОФ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

***Анотація.** Роботу присвячено розв'язанню науково-практичного завдання моделювання ліквідації наслідків військових дій та техногенних катастроф на території України.*

*Військові дії та надзвичайні ситуації представляють собою обстановку, що призводить до шкідливих соціальних, економічних та екологічних наслідків. У кризовому періоді виконуються рятувальні заходи, що спрямовані на локалізацію наслідків прояву джерел загрози і збільшення живучості регіональних компонентів у зонах ураження. Територіальна розподіленість, різномірність, багатозв'язність і динамічність уражаючих впливів і захисних заходів значно ускладнюють процеси управління природно-техногенною безпекою. **Метою статті** є формулювання постановки задачі моделювання ліквідації наслідків військових дій та техногенних катастроф на території України, користуючись принципами системного підходу. Наведена класифікація джерел надзвичайних ситуацій, виходячи із причин виникнення, різних видів об'єктів ураження в залежності від характеру поведінки в екстремальних умовах, різні види ресурсів захисту, які реалізують необхідні захисні заходи. Для пошуку оптимального плану застосування сил і засобів системи техногенної безпеки на етапі ліквідації наслідків військових дій та техногенних катастроф використаний програмно-цільовий підхід до планування з використанням Парето-функції системи. Розглянуті пряма та обернена задачі пошуку оптимального плану. Відбір об'єктів для прямої задачі проводиться у відповідності до їхньої пріоритетності. При вирішенні оберненої задачі відбір об'єктів проводиться до досягнення заданого рівня системного ефекту, що накопичується в процесі відбору. У кризових ситуаціях, спричинених небезпечними подіями, важливо вживати ефективні рятувальні заходи для локалізації та зменшення наслідків випадкових і загрозових ситуацій. Головною метою таких заходів є не тільки збільшення живучості регіонів у зонах ураження, але й забезпечення швидкого відновлення нормального функціонування суспільства після кризи.*

***Ключові слова:** інформаційні технології; екосистема; військові дії; техногенні катастрофи; цільова ефективність; Парето-функція; моделювання; системний підхід.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.143-154>

Вступ

Зміст поняття надзвичайної ситуації (НС) в нормативно-правових джерелах визначається як порушення нормальних умов життя і діяльності людей на об'єкті або території, спричинене військовими діями, аварією, катастрофою, стихійним лихом, епідемією, епізоотією, епіфітотією, великою пожежею, застосуванням засобів ураження, що призвели або можуть призвести до людських і матеріальних втрат [1]. Виконувани у післякризовий період

відновлювальні заходи покликані ліквідувати наслідки прояву джерел небезпеки і збільшити реабілітованість регіональних компонентів у зонах післядії. У контексті введених понять будемо визначати природно-техногенну безпеку як такий стан компонентів даного регіону, що характеризується наявністю необхідних ресурсів захисту для можливих чи реальних об'єктів-реципієнтів ураження у кожному періоді розвитку будь-яких НС техногенного походження. Територіальна розподіленість, різномірність, багатозв'язність і динамічність уражаючих впливів і захисних заходів значно ускладнюють процеси управління природно-техногенною безпекою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Експериментальні дослідження техногенних чинників, пов'язаних із моделюванням ліквідації наслідків військових дій та техногенних катастроф на території України за матеріалами мультиспектральних космоснімків територій, ґрунтуються на використанні методики експертної оцінки та інформаційних технологій (ІТ). В праці А. Гусєва, С. Козьменка, О. Козьменко [2] уточнюється, що під НС мається на увазі обстановка на певній території, що склалася в результаті катастрофічної події і пов'язана з людськими жертвами, зі шкодою навколишньому природному середовищу та здоров'ю людей, із значними матеріальними втратами та порушенням умов життєдіяльності. В праці П. Белова [3] підкреслюється, що це несподівана обстановка, яка виникає раптово і характеризується стрімким порушенням сталого процесу. С. Дорогунцов і В. Гречанинов [4] надзвичайною ситуацією називають раптово виниклу ситуацію, яка характеризується значним соціально-екологічним і економічним збитком, необхідністю захисту населення від дії шкідливих для здоров'я факторів (хімічно агресивні і радіоактивні речовини, мікроби, віруси, риккетсії, переохолодження, перегрівання, травмуючі і психогенні фактори), проведення рятувальних, невідкладних медичних і евакуаційних заходів, а також ліквідації негативних наслідків, які склалися. У Кодексі Цивільного захисту України дається таке визначення: «НС – обстановка на окремій території чи суб'єкті господарювання на ній або водному об'єкті, яка характеризується порушенням нормальних умов життєдіяльності населення, спричинена катастрофою, аварією, пожежею, стихійним лихом, епідемією, епізоотією, епіфітотією, застосуванням засобів ураження або іншою небезпечною подією, що призвела (може призвести) до виникнення загрози життю або здоров'ю населення, великої кількості загиблих і постраждалих, завданням значних матеріальних збитків, а також неможливістю проживання населення на такій території чи об'єкті, впровадженням на ній господарської діяльності» [5].

Спільним для визначень є те, що надзвичайні ситуації представляють собою обстановку, викликану випадковими причинами, таку, що призводить до шкідливих соціальних, економічних та екологічних наслідків.

Додатково зазначимо, що у кризовому періоді виконуються рятувальні заходи, що спрямовані на локалізацію наслідків прояву джерел загрози і збільшення живучості регіональних компонентів у зонах ураження.

Мета роботи. Формулювання постановки задачі ліквідації наслідків військових дій та техногенних катастроф на території України, користуючись принципами системного підходу.

Виклад основного матеріалу дослідження

У світлі виявлених проблем управління техногенною безпекою в конкретному регіоні, де реєструються надзвичайні ситуації, логічним є висновок обрати систему техногенної безпеки та цивільного захисту як об'єкт дослідження.

До об'єктів застосування такої системи включаються:

- потенційно небезпечні об'єкти (ПНО) та об'єкти підвищеної небезпеки (ОПН): об'єкти, які становлять потенційну техногенну загрозу, або які вже є об'єктами підвищеної небезпеки, на які може вплинути негативна діяльність;

- об'єкти-реципієнти або об'єкти захисту і відновлення: об'єкти, на які поширюються негативні впливи у разі реалізації техногенних небезпек.

Зовнішніми до організаційно-технічної системи, що розглядається, є соціально-економічна система регіону і навколишнє природне середовище.

Отримати опис досліджуваної системи і оточуючого її середовища можна, користуючись принципами системного підходу. Згідно з цими принципами [7] під системою маємо на увазі сукупність об'єктів (компонентів системи) з набором зв'язків між ними та між їхніми властивостями.

Крім того, система як складний об'єкт повинна мати такі системні ознаки:

- наявність мети за призначенням;
- наявність системного ефекту, рівень якого пов'язують з досягненням мети;

- наявність ресурсного потенціалу (людські, матеріальні, інформаційні ресурси);

- наявність структури (керуючої і виконавчої частин, пристосованих до продукування системного ефекту);

- наявність процесу (перетворення ресурсного потенціалу в системний ефект);

- наявність цілеспрямованого управління (алгоритму);

- наявність емерджентності.

Для початку визначимо (через класифікацію) надзвичайну ситуацію як ключове поняття у розгляді системи техногенної безпеки.

Відомо, що для спрощення складнощів аналізу фактори ураження і захисту класифікуються та структуруються. Це дозволяє виділити тільки суттєві властивості об'єктів і зв'язків, значущих у даному контексті.

При описі компонентів системи, їхніх властивостей та зв'язків треба враховувати основну особливість системного підходу, яка полягає в тому, що всі складові системи функціонують як єдине ціле заради загальної мети. Функціонування системи техногенної безпеки здійснюється безперервно з метою запобігання надзвичайним ситуаціям або ліквідації їх наслідків. Це дозволяє при аналізі системи виділити тільки певні властивості об'єктів і зв'язки, які є суттєвими в даному контексті.

Класифікація факторів ураження та захисту в системі техногенної безпеки включає розрізнення за причинами виникнення НС [6, 7]:

1. Техногенні надзвичайні ситуації (ті, що зумовлені технічними або технологічними порушеннями, що можуть призвести до аварій, витоків, вибухів та інших техногенних аварій);

2. Надзвичайні ситуації військового походження (ті, що виникають внаслідок воєнних конфліктів та їхніх наслідків);

3. Природні надзвичайні ситуації (ті, що спричинені природними явищами, як-от землетрусами, повеннями, ураганами і т.п.);

4. Соціально-політичні надзвичайні ситуації (ті, що викликані соціальними конфліктами, політичною нестабільністю, терористичними або воєнними діями).

Ця класифікація становить основу для подальшого аналізу та розробки стратегій управління системою техногенної безпеки та цивільного захисту населення.

Розглянемо детальніше види НС.

Техногенні джерела (V_1) проявляються у вигляді аварій на об'єктах та пошкодження в результаті військових дій, продукція або технологічні процеси яких пов'язані з використанням високого тиску, значних енергетичних потужностей, агресивних, вибухонебезпечних чи легкозаймистих речовин. Для України реальну загрозу становлять такі види аварій:

- на об'єктах критичної інфраструктури;
- на хімічно, радіаційно і біологічно небезпечних виробництвах при ушкодженні технологічного обладнання, несправній системі запуску, контролю і відключення, помилках обслуговуючого персоналу;
- на залізничному, автомобільному, повітряному і водному транспорті при розгерметизації ємностей для перевезення небезпечних речовин, при порушенні правил транспортування, при веденні військових дій (табл. 1);

Таблиця 1. Відомості про техногенну катастрофу

№	НС, тип	Об'єкт	Дата	Опис НС	Причина	Наслідки
1	Фосфорна екологічна катастрофа	Мережа залізничного транспорту публ. н.п. Ожидів Львівської області	16.07.2007, 17:00	На перегоні Красне – Ожидів зійшли з колії та перекинулися 15 цистерн із жовтим фосфором товарного потягу № 2005 (всього у складі потягу було 58 вагонів). Цистерни слідували зі станції Асса (Джамбул, Казахстан) до станції Оклеса (Республіка Польща). Через витік фосфору із однієї цистерни сталося самозаймання 6 цистерн.	н/в	Пошкоджено 50 м залізничної колії, близько 100 м контактної мережі та три опори. Під час гасіння пожежі утворилася хмара з продуктів горіння (зона ураження близько 90 км ²). Почалась евакуація із зони ураження. До 10 осіб (учасники ліквідації) стан середньої тяжкості.

- на газо-, нафто-, електро-, тепло-, водо- і каналізаційних мережах при їхньому пошкодженні або руйнуванні та веденні військових дій;

- на гідротехнічних спорудах при прориві напірних гребель, захисних дамб або водопропускних шлюзів, або при веденні військових дій;
- на будівельних об'єктах при руйнуванні виробничих споруд або житлових будинків, залізничних та автодорожніх мостів.

В таблиці 1 наведено відомості про техногенну катастрофу в Україні.

Природні джерела (V_2) зумовлені руйнівними стихійними явищами, серед яких реальну загрозу для України становлять:

- геологічні, у вигляді землетрусів, зсувів, провалів і карсту;
- гідрологічні, у вигляді селів, підтоплень, паводків і повеней;
- метеорологічні, у вигляді циклонів, ураганів, смерчів, хуртовин, снігопадів, ожеледі, злив, градобобою, заморозків й посух;
- геліофізичні, у вигляді природних пожеж, включаючи лісові, степові і торф'яні;
- астрофізичні, у вигляді гравітаційних, магнітних і електромагнітних збурень від космічних об'єктів і випромінювань.

Екологічні джерела (V_3) виникають внаслідок надмірного антропогенного навантаження на навколишнє середовище, в Україні спостерігаються такі:

- у літосфері – деградація ґрунтів, виснаження надр, зменшення захисних лісосмуг;
- у гідросфері – забруднення, заболочення, і пересихання водоймищ, рік і озер;
- в атмосфері – руйнування озонового шару, збільшення кислотних дощів, зростання концентрації токсичних і радіоактивних речовин;
- у біосфері – втрата генофонду, зменшення біопродуктивності, зростання отруєнь, епідемій, епізоотій та епіфітотій;
- в екосфері в цілому – руйнування самовідновлюючих (рекреаційних) природних механізмів.

Соціальні джерела (V_4) є результатом взаємовпливу економічних, політичних, психологічних, інформаційних та інших факторів і передумов.

Військові джерела (V_5) пов'язані з використанням засобів збройного протиборства під час прикордонних конфліктів і в локальних війнах, а також у стратегічних планах глобальної конфронтації. Серед цих засобів розрізняються такі:

- звичайна і високоточна зброя;
- боєприпаси об'ємного вибуху, запальні, фугасні, осколкові, кулькові, кумулятивні і бетонобійні;
- ядерна зброя;
- хімічна зброя;
- бактеріологічна зброя.

У загальному випадку можливий взаємозумовлений комбінований прояв різних джерел небезпеки.

За несприятливими наслідками розрізняються НС, що призводять до людських жертв, збитків господарським об'єктам та ураження природного середовища. Залежно від характеру поведінки в екстремальних умовах спостерігаються різні види об'єктів ураження.

Серед населення (X_1) розрізняються: непрацездатні, включаючи дітей, старих і тяжкохворих; працівники виробничої сфери; працівники сфери послуг; невоєнізовані формування; воєнізовані формування (Збройні Сили

України, Національна гвардія України, Державна прикордонна служба України, Державна служба України з надзвичайних ситуацій).

Серед господарських об'єктів (X_2) можна виділити такі: об'єкти критичної інфраструктури; об'єкти виробничої сфери; об'єкти сфери послуг; історико-культурні цінності; науково-технічну документацію; коштовне технологічне обладнання.

У природному середовищі (X_3) вирізняються: представники тваринного світу (фауна); представники рослинного світу (флора); водні джерела; корисні копалини; заповідні зони.

За протидіючими чинниками розрізняються НС, що спричиняють використання різних видів ресурсів захисту, які реалізують необхідні захисні заходи.

Розвідувально-контролюючі ресурси (Z_1) призначені для ведення розвідки і контролю за станом і зміною обстановки в зонах можливого чи реального прояву уражаючих впливів за допомогою військових формувань:

- інженерної розвідки для виявлення меж і ступеня руйнування житлових будинків і виробничих споруд, визначення вторинних наслідків уражаючих впливів, знаходження місць перебування потерпілих і підходів до них;

- хімічної розвідки для виявлення меж хімічного зараження, визначення концентрації отруйних речовин і напрямку поширення зараженого повітря, спостереження і лабораторного контролю за зміною хімічної обстановки;

- радіаційної розвідки для виявлення меж і рівнів радіоактивного забруднення, встановлення режимів радіаційного захисту, спостереження і дозиметричного контролю за зміною радіаційної обстановки;

- медичної розвідки для виявлення постраждалих людей, визначення їхнього стану й умов надання першої медичної і лікарської допомоги;

- ветеринарної та агротехнічної розвідки для виявлення постраждалих тварин і рослин, визначення їхнього стану й умов надання ветеринарної й агротехнічної допомоги.

Інженерно-технічні ресурси (Z_2) спрямовані на зменшення збитків господарським об'єктам (захист техносфери) за допомогою формувань:

- інженерного захисту для підвищення фізичної стійкості виробничих споруд і житлових будинків, будівництва й обслуговування захисних споруд, розчищення проходів і розбирання завалів, облаштування під'їзних шляхів і маршрутів евакуації;

- хімічного захисту для забезпечення населення індивідуальними засобами захисту, локалізації вогнищ викиду й обваловки місць розливу отруйних речовин, дегазації прилягаючої місцевості, приміщень, устаткування, одягу і продуктів харчування;

- радіаційного захисту для забезпечення населення протирадіаційними сховищами, організації й одної профілактики, збору і поховання небезпечних радіоактивних осколків, дезактивації прилягаючої місцевості;

- пожежного захисту для забезпечення господарських об'єктів засобами автоматичної сигналізації і пожежогасіння, локалізації і ліквідації пожеж у житлових будинках і виробничих спорудах, боротьби з лісовими, степовими, торф'яними і підземними пожежами;

- технічного захисту для підвищення безпеки технологічного обладнання за допомогою засобів автоматичного контролю і відключення, виконання

профілактичних і ремонтно-відновлювальних робіт на комунально-енергетичних мережах, а також для ремонту транспортної, інженерної, протипожежної та іншої техніки.

Медико-біологічні ресурси (Z_3) спрямовані на зменшення негативних наслідків для населення, тварин і рослин (захист біосфери), за допомогою формувань:

- медичного захисту для надання першої медичної і лікарської допомоги постраждалим безпосередньо в зонах ураження, посадки їх на транспорт і супроводу під час евакуації;
- лікарського захисту для надання спеціалізованої медичної допомоги і стаціонарного лікування потерпілих за межами зон ураження в клініках, лікарнях і шпиталях;
- епідеміологічного захисту для санітарного очищення зон ураження, профілактики і лікування інфекційних захворювань;
- ветеринарного захисту для санітарної обробки і лікування тварин, локалізації і ліквідації епізоотій;
- агротехнічного захисту для знезаражування рослин і фуражу, локалізації і ліквідації епіфітотій.

Транспортно-комунікаційні ресурси (Z_4) забезпечують переміщення об'єктів біо- і техносфери усередині і поза зонами ураження за допомогою різних видів транспорту і засобів зв'язку. Для цього залучаються формування:

- забезпечення евакуації потерпілих;
- забезпечення передислокації формувань;
- забезпечення підвозу матеріально-технічних засобів;
- забезпечення підвозу води, продуктів харчування і предметів першої необхідності;
- забезпечення евакуації унікального обладнання і культурних цінностей.

Матеріально-продовольчі ресурси (Z_5) забезпечують процеси виконання захисних заходів необхідними матеріалами і засобами за допомогою формувань:

- матеріального забезпечення для зберігання і розподілення будівельних, дегазаційних, медичних та інших матеріалів і засобів;
- енергозабезпечення для заправлення транспорту горючо-мастильними матеріалами, підзарядки і заміни акумуляторних батарей, організації автономного електроживлення;
- речового забезпечення для зберігання і розподілення спецодягу серед особового складу формувань і предметів першої необхідності серед евакуйованого населення;
- комунального забезпечення для розселення і комунально-побутового обслуговування евакуйованого населення;
- продовольчого забезпечення для зберігання і розподілення продуктів харчування серед формувань і населення.

При пошуку оптимального плану застосування сил і засобів системи техногенної безпеки на етапі ліквідації наслідків НС доцільно використовувати програмно-цільовий підхід до планування.

Початковим етапом циклу планування є розробка мети програми (цілеполягання). Головною системною метою програми робіт з ліквідації

наслідків НС вважаємо підвищення їхньої цільової ефективності, яку можна розрахувати у такий спосіб:

$$e_{\ddot{O}i} = F/B, \quad (1)$$

де показниками ефективності є: F – значення очікуваного системного ефекту (зменшення збитку від наслідків НС) програми робіт з ліквідації наслідків НС; B – витрати бюджетних ресурсів B , якими досягнуто значення першого показника.

Здійснимо постановку задачі розробки оптимальної програми робіт з ліквідації наслідків НС.

Якщо на множині планів використання бюджетних ресурсів $\mathfrak{R} = \{R_i\}$ кожний з елементів R_i задовольняє системі обмежень на застосування ресурсів (тобто належить області припустимих рішень):

$$G(R_i) < G_0, \quad (2)$$

то слід знайти такий (оптимальний) план R_0 , що максимізує ефективність програми:

$$e_{\ddot{O}i}(R_0) = \frac{F(R_0)}{B(R_0)} = \max e_{\ddot{O}i}. \quad (3)$$

Побудуємо область припустимих рішень на Парето-функції системи (див. рис. 1).

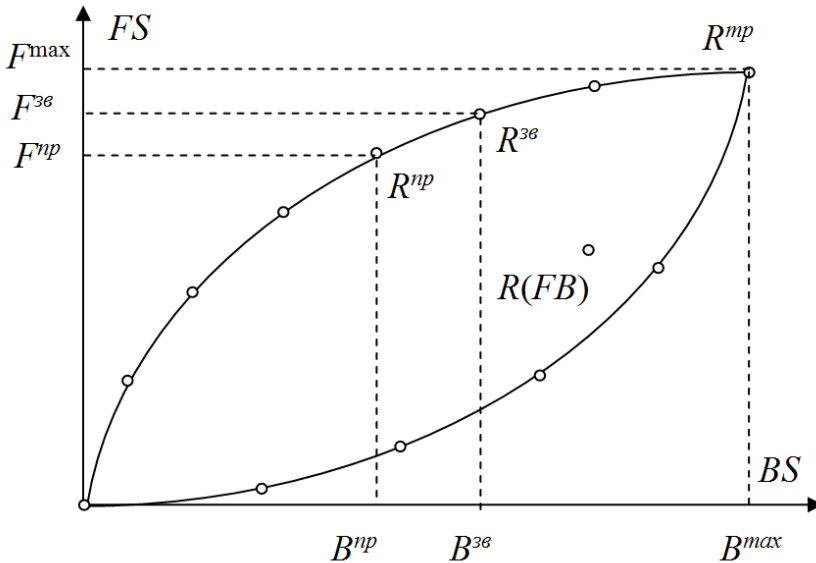


Рис. 1. Область припустимих рішень на Парето-функції системи

На рис. 1 позначено: BS – бюджетні витрати на програму, FS – цільовий ефект, що досягнуто витратами BS .

Природно, що існує множина можливих планів \mathfrak{R} , кожний з елементів котрої представляється точкою з координатами $R(F, B)$.

Очевидно, що для кожної точки області припустимих рішень F планом R цілком визначається рівень використання ресурсів B . Множина «ефективних» планів, для котрих співвідношення (F/B) є найкращим, – ліва верхня межа області припустимих планів, бо кожний ефективний план переважає за F рівноцінні йому плани за B або поступається за B рівноцінним планам за F .

Множина ефективних планів складає множину Парето, що утворює функцію Парето $F(B)$.

Оскільки прагнення підвищення ефективності системи обмежується точкою $R^{mp}(F^{\max}, B^{\max})$ як планом «абсолютної досконалості» системи, то потрібних для цього бюджетних коштів B^{\max} може не вистачити і треба трохи «поступитися» цільовим ефектом F .

Якщо можливі витрати B^{mp} , то їм відповідає значення Парето-функції F^{mp} , що є результатом вирішення «прямої» задачі оптимального планування використання обмежених ресурсів, що максимізує ефект.

Якщо значення F^{mp} не задовольняє і його можна підвищити до F^{36} , то новому F^{36} відповідає нове значення витрат бюджету B^{36} , що є результатом вирішення «оберненої» задачі оптимального використання ресурсів, що мінімізує потрібний бюджет. Такий підхід визначає компромісний рівень цільового ефекту програми і бюджет для його досягнення.

Висновки

Проведений аналіз проблем управління техногенною безпекою конкретного регіону, де зафіксована надзвичайна ситуація. Отриманий формальний опис досліджуваної системи і оточуючого її середовища, виходячи із принципів системного підходу. У рамках локалізації наслідків надзвичайних ситуацій важливо визначити та обмежити зони ураження. Це передбачає ефективне керування впливом подій та забезпечення контролю за їхніми наслідками. Локалізація може включати в себе евакуацію, створення зон безпеки, ізоляцію джерел загрози та інші заходи. Рятувальні заходи орієнтовані на надання допомоги та підтримки тим, хто постраждав від надзвичайної ситуації. Це включає медичну допомогу, евакуацію, надання необхідних ресурсів та матеріальної допомоги. Організація координації між рятувальними службами та владними структурами грає ключову роль у забезпеченні ефективності цих заходів. Поняття «живучість» в контексті надзвичайних ситуацій означає здатність регіонів ефективно впоратися з кризовими ситуаціями та швидко відновити нормальне функціонування. Застосування сучасних технологій, розробка планів екстреного реагування та забезпечення здатності спільноти мобілізуватися і співпрацювати є важливими аспектами впровадження концепції живучості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України "Про Цивільну оборону України" від 28.02.1991 р.
2. Гусев А.А., Козьменко С.Н., Козьменко О.В. Чрезвычайные ситуации: экономический ущерб и инвестиции в предупреждение // Экономика и математические методы, 2000. – Т.36, №1. – С. 36–46.
3. Белов П.Г. Моделирование опасных процессов в техносфере: Методическое пособие. – К.: КМУГА, 1999. – 124 с.

4. Загальні вимоги до розвитку і розміщення потенційно небезпечних виробництв з урахуванням ризику надзвичайних ситуацій техногенного походження / НАН України, Рада по вивченню продуктивних сил України. Наукові керівники: чл.-кор. НАН України С.І. Дорогунцов і генерал-лейтенант В.Ф. Гречанинов. – К., 1995. – 120 с.
5. Кодекс цивільного захисту України. Затверджений Верховною Радою України 02.10.2012 № 5403-VI у редакції станом на 01.01.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> (дата звернення: 26.01.2024).
6. Трофимчук О.М., Адаменко О.М., Триснюк В.М. Геоінформаційні технології захисту довкілля природно-заповідного фонду / Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України; Івано-Франківський нац. тех. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ : Супрун В.П., 2021. – 343 с. // ISBN 978-617-7468-53-9.
7. V. Trysnyuk, T. Trysnyuk, V. Okhariev, V. Shumeiko, A. Nikitin. Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare – UTPRESS* ISSN 1582-0548, №1, 2018. P. 61–67.

Стаття надійшла до редакції 27.11.2023 і прийнята до друку після рецензування 12.02.2024

REFERENCES

1. Law of Ukraine "On Civil Defense of Ukraine" dated February 28, 1991.
2. Gusev, A.A., Kozmenko, S.N., & Kozmenko, O.V. (2000). Emergency situations: economic damage and investments in prevention. *Economics and mathematical methods*, 36(1), 36–46.
3. Belov, P.G. (1999). Modeling of hazardous processes in the technosphere: Methodological manual. Kyiv: KMUGA.
4. General requirements for the development and location of potentially dangerous industries, taking into account the risk of emergency situations of man-made origin. (1995). National Academy of Sciences of Ukraine, Council for the Study of Productive Forces of Ukraine. Scientific supervisors: member-cor. NAS of Ukraine S.I. Doroguntsov and Lieutenant General V.F. Grechaninov. Kyiv [in Ukrainian].
5. Civil Protection Code of Ukraine dated 02.10.2012 No. 5403-VI. Retrieved January, 26, 2024 from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> [in Ukrainian].
6. Trofymchuk, O.M., Adamenko, O.M., & Trysnyuk, V.M. (2021). Geoinformation technologies for environmental protection of the nature reserve fund. Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine; Ivano-Frankivsk national technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk: Suprun V.P. ISBN 978-617-7468-53-9 [in Ukrainian].
7. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., & Nikitin, A. (2018). Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare*, 1, 61–67.

The article was received 27.11.2023 and was accepted after revision 12.02.2024

Триснюк Василь Миколайович

доктор технічних наук, професор, завідувач відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** trysnyuk@ukr.net

Дзюба Володимир Андрійович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору
Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-9576-814X> **e-mail:** navvon@ukr.net

Тимчук Володимир Юрійович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, докторант штатний
науково-організаційного відділу Національної академії Сухопутних військ

Адреса робоча: Україна, м. Львів, Україна, вул. Героїв Майдану 32

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3549-2813>

e-mail: volodymyrtymchukasv@gmail.com

УДК 004.4-047

Evgeny Nagorny, postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7050-9310> **e-mail:** rhbz777@ukr.net

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

INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE CONSTRUCTION OF THE FIELD OF RADIATION POLLUTION OF THE LOCALITY AND FORECASTING

Abstract. *The article examines the improvement of information technologies in the construction of the field of radiation contamination of the area based on the measured values of the impact factors of a nuclear explosion. Forecasting uses summaries of radioactive contamination centers and meteorological information. This process is quite well formalized and its practical implementation does not present great difficulties in automated systems for monitoring the radiation environment.*

Studies have shown that with a large heterogeneity of the source data by location (the presence of significant zones in which measurements were not carried out), this approach can unjustifiably overestimate or underestimate the calculated values in these zones. The local interpolation method was used to correct this effect. It is based on the assumption of the presence of local linear dependencies in the source data.

In automated radiation monitoring systems, interpolation methods are used in the presence of a widespread network of stationary sensors connected to communication channels.

The interpretation of radiation reconnaissance data using interpolation methods does not allow using a priori information about the parameters of the cell and the conditions for the formation of radiation contamination of the area. Joint accounting in the processing of these data allows you to combine the stages of forecasting and detection of the actual situation into a single process.

Key words: *radiation situation; radiation situation monitoring systems; the field of radiation pollution of the area; mapping; contaminated territory; radioactive pollution; radiation situation forecast; radioactive substances.*

Є.І. Нагорний

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

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИ ПОБУДОВІ ПОЛЯ РАДІАЦІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ МІСЦЕВОСТІ І ПРОГНОЗУВАННІ

Анотація. *В статті розглянуто вдосконалення інформаційних технологій при побудові поля радіаційного забруднення місцевості по вимірних значеннях уражаючих факторів ядерного вибуху. При прогнозуванні використовуються зведення про осередки радіоактивного забруднення і метеорологічна інформація. Цей процес досить добре формалізований і його практична реалізація не представляє великих труднощів в автоматизованих системах контролю радіаційної обстановки.*

Дослідження показали, що при великій неоднорідності вихідних даних по місцезональному (наявність значних зон, в яких вимірювання не проводилися) такий підхід може невиправдано завищувати або занижувати розрахункові значення в цих зонах. Для корекції цього ефекту був застосований метод локальної інтерполяції. Він заснований на припущенні про наявність у вихідних даних локальних лінійних залежностей.

У автоматизованих системах контролю радіаційної обстановки інтерполяційні методи використовуються за наявності широко розгалуженої мережі стаціонарних датчиків, зв'язаних з каналами зв'язку.

Інтерпретація даних радіаційної розвідки за допомогою інтерполяційних методів не дозволяє використати апріорну інформацію про параметри осередку і умови формування радіаційного забруднення місцевості. Спільний облік в обробці цих даних дозволяє поєднати етапи прогнозування і виявлення фактичної обстановки в єдиний процес.

Ключові слова: радіаційна обстановка; системи моніторингу радіаційної обстановки; поле радіаційного забруднення місцевості; картографування території забруднення; радіоактивне забруднення; прогноз радіаційної обстановки; радіоактивні речовини.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.155-160>

Вступ

Радіоактивне забруднення місцевості є потужним фактором, що робить істотний вплив на життєдіяльність населення, роботу адміністративних структур і органів державного управління в цілому. Осередками радіоактивного забруднення в мирний час можуть бути:

- аварії ядерних енергетичних установок з викидом продуктів реакції;
- руйнування сховищ (контейнерів) з радіоактивними речовинами;
- руйнування активної зони або системи теплоносія ядерних енергетичних установок в результаті терористичних актів;
- руйнування могильників радіоактивних відходів.

Усім структурам управління пропонується при оцінці обстановки вивчати її радіаційну складову [4, 5].

У низці законів України, таких як «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про охорону земель», «Про моніторинг», «Про державний контроль за використанням та охороною земель», йдеться про охорону земель, водних об'єктів, що потребують особливої уваги з боку держави, чому сприяють дані ДЗЗ. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) охоплюють систему принципів, критеріїв, нормативів та правил, виконання яких є обов'язковим в політиці держави щодо забезпечення протирадіаційного захисту людини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В Україні основними науковцями в області радіаційної безпеки територій являються: Д.М. Гродзинський – спектральні характеристики рослинного покриву [1]; В.Г. Бар'яхтар – дослідження аварії на Чорнобильській АЕС [2]; О.М. Трофимчук, І.П. Ковальчук, Є.О. Яковлев, М.П. Константінов, Г.Д. Коваленко – моніторинг радіаційного забруднення земель [3, 5, 7].

Мета роботи. Мета роботи полягає у вдосконаленні інформаційних технологій при побудові поля радіаційного захисту місцевості в автоматизованих системах контролю радіаційної обстановки.

Виклад основного матеріалу дослідження

У результаті Чорнобильської катастрофи в навколишнє природне середовище потрапило близько 3% радіонуклідів, які на момент катастрофи були накопичені в четвертому енергоблоці, що становить, за підрахунками різних авторів, понад 300 Мкі, або $1,3 \cdot 10^{19}$ Бк радіонуклідів [6]. В атмосферу під час Чорнобильської катастрофи було викинуто до 100% радіоактивних благородних газів, 20–50% ізотопів йоду, 12–30% цезію і 3–4% інших важких радіонуклідів від їхнього вмісту в реакторі [1]. В перші години після аварії найбільший вплив на довкілля мали радіонукліди – йоду-131 (^{131}I), йоду-133 (^{133}I), а також телуру-132 (^{132}Te), барію-140 (^{140}Ba), лантану-140 (^{140}La) і нептунію-239 (^{239}Np). Через декілька місяців після аварії рівень забруднення визначали радіонукліди стронцію-89 (^{89}Sr) і цирконію-95 (^{95}Zr), а два роки по тому – рутенію-106 (^{106}Ru), цезію-134 (^{134}Cs) і ^{137}Cs . Рух хмар, з яких радіонукліди у складі опадів потрапляли на земну поверхню, спричинив формування радіоактивних слідів (рис. 1). Найчіткіше виявився західний слід, який являє собою досить вузьку смугу, що тягнеться через Польщу аж до Німеччини і Франції. Набагато ширшим і найінтенсивнішим є північний слід – це забруднення радіонуклідами Білорусі і країн Скандинавії (особливо Швеції і Фінляндії). Широким, віялоподібним є південний слід, який досягає Австрії і Швейцарії, а також Румунії, Болгарії і Греції.

Для вирішення задач моніторингу територій використовуються дані космічних зйомок у видимому (Visible), ближньому (Near Infrared, NIR), середньому (Short-Wave Infrared, SWIR) і далекому (Thermal Infrared, TIR) інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектра. До сенсорів, що забезпечують збір даних теплових зйомок середньої просторової роздільної здатності, слід віднести ETM+ (супутник Landsat-7), ASTER (супутник Terra), TIRS (супутник Landsat-8), MODIS (супутники Terra, Aqua), AVHRR (супутники NOAA) та ін. Дані супутників застосовуються для вирішення задач температурного картографування: визначення температури земної поверхні. Ці технології орієнтовані на розробку програм та алгоритмів, які забезпечують обробку растрових зображень, отриманих з космічних зйомок. Вони включають методи сегментації, класифікації, фільтрації, покращення якості зображень та інші техніки обробки зображень.

Питання про необхідну щільність точок контролю радіаційної обстановки заслуговує окремого розгляду. Так, дослідження, проведені в [9], показали, що оптимальний об'єм інформації про фактичну радіаційну обстановку (PO) забезпечується за наявності одного виміру на 3–6 км² на регіональному рівні і на 25–30 км² – в державних органах управління. Ці дослідження проводилися на слідах тих, що повністю відповідають модельним, і не враховували похибки роботи датчиків. Інші дослідження в цій області [6], проведені вже з урахуванням похибок виміру ПДВ, показали, що на регіональному рівні необхідна щільність складе 2,3–2,9 км², а в масштабі держави – 3,2–4,0 км² на одну точку.

Сьогодні прийнято, що при веденні радіаційної розвідки один вимір повинен проводитися на площі 3–6 км². Слід зазначити, що визначення необхідної щільності точок контролю проводилося з розрахунку на використання методу інтерполяції. Застосування інших методів [8] для відновлення характеристик радіаційного поля, топологія якого близька до

модельного, показало можливість виявлення фактичного РЗМ за наявності одного виміру на 10 км². До таких методів відноситься метод лінійної оптимальної інтерполяції (МЛОІ), що дозволяє підвищувати достовірність інформації в процесі обробки.

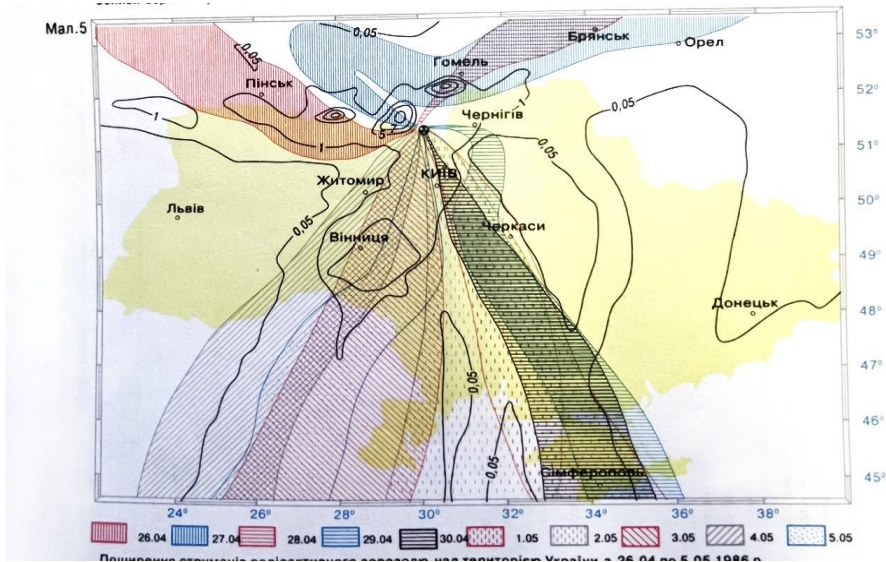


Рис. 1. Поширення радіоактивних хмар після Чорнобильської катастрофи (Атлас Чорнобильської зони відчуження, 1996 р.)

Таким чином, при оцінці достовірності інформації, виявленої за даними радіаційної розвідки, необхідно враховувати не лише похибки виміру ПДВ і щільність точок контролю, але також топологію поля РЗМ і метод, який використовується для обробки даних.

Застосування структурної функції в якості функції зв'язку не передбачає використання апріорної інформації про структуру поля РЗМ. Відновлення характеристик в перерізах поля робиться на основі обробки усїєї вибірки значень ПДВ, причому об'єм обчислень збільшується в геометричній прогресії по відношенню до кількості точок вимірювань. Тому, реалізація такого підходу потребуватиме значних обчислювальних ресурсів.

В якості вихідних даних, що вимагаються для роботи даної методики, зокрема, потрібні координати осередка радіоактивного забруднення. З практичної точки зору, це накладає певні обмеження на використання методу, оскільки така інформація при застосуванні диверсійних методів може бути відсутньою.

Висновки

Дослідження показали досить хорошу відновлюваність характеристик поля, коли як вихідні дані використовувалися результати аерогаммазйомки, проведені в районі аварії Чорнобильської АЕС. Такі дані є згладженими, вони фіксують не усі локальні неоднорідності поля. По суті, сам метод отримання вимірювань в даному випадку виступав фільтром.

Використання цього методу інтерполяції для обробки даних радіоактивного забруднення дозволяє добитися хорошої відновлюваності поля при високій щільності вимірювань потужності дози випромінювання і нескладній його топології. Проте при ускладненні РО виникає необхідність збільшення дискретності сітки, тобто зменшення її кроку. Це у свою чергу призводить до різкого збільшення часу обробки даних. Крім того, при великій кількості вузлів сітки алгоритм може працювати нестійко.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гродзинський Д.М. Радіобіологія : – Київ: Либідь, 2000. – 448 с.
2. Бар'яхтар В.Г. Чорнобильська катастрофа. – Київ: Наукова думка, 1996. – 576 с.
3. Trofymchuk O. Geo-information Technologies for Decision Issues of Municipal Solid Waste / O. Trofymchuk, V. Trysnyuk, N. Novokhatska, I. Radchuk // *Journal of Environmental Science and Engineering A* 3 (2014) s. 183–187.
4. Коваленко Г.Д. Радіоекологія України : Монографія. – Харків: І.Д “Інжек”, 2008. – 264 с.
5. Іванов Є. Радіоекологічні дослідження : Навч. посібник – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2004. – 149 с.
6. В.М. Триснюк, А.А. Нікітін, В.О. Шумейко. Алгоритм оброблення інформації про радіоактивне забруднення місцевості з використанням даних ДЗЗ та ГІС. // Системи управління, навігації та зв'язку. Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. Випуск 6 (46) 2017 р. – С. 102–110.
7. O. Trofymchuk, Y. Yakovliev, V. Klymenko, Y. Anpilova. Geomodeling and monitoring of pollution of waters and soils by the earth remote sensing. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference – SGEM*, 19, 1.4 (2019).
8. Триснюк В. М., Нагорний Є. І., Триснюк Т. В., Конецька О. О., Курило А. В. Методика виявлення радіаційного забруднення місцевості та його ризиків. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Випуск 3(69) 2022 С. 112–115. ISSN 2073-7394. <http://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/2618>
9. Krasovska I. Complex space monitoring data analysis to determine environmental trends of Poland-Ukraine border areas / I. Krasovska, O. Butenko, S. Horelik, Y. Zakharchuk // *Architecture civil engineering environment*. – Vol. 13. 2020. – № 2. – P. 39–56.

Стаття надійшла до редакції 29.01.2024 і прийнята до друку після рецензування 08.03.2024

REFERENCES

1. Grodzinsky, D.M. (2000). Radiobiology. Kyiv: Lybid [in Ukrainian].
2. Baryakhtar, V.G. (1996). Chernobyl disaster. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
3. Trofymchuk, O., Trysnyuk, V., Novokhatska, N., & Radchuk, I. (2014). Geo-information Technologies for Decision Issues of Municipal Solid Waste. *Journal of Environmental Science and Engineering, A* 3 (2014) s. 183-187 [in Ukrainian].
4. Kovalenko, G.D. (2008). Radioecology of Ukraine: Monograph. Kharkiv: I.D. "Inzhek" [in Ukrainian].
5. Ivanov, E. (2004). Radioecological studies: Education. manual. Lviv: Ivan Franko LNU Publishing Center [in Ukrainian].
6. Trysnyuk, V.M., Nikitin, A.A., & Shumeiko, V.O. (2017). Algorithm for processing information on radioactive contamination of the area using data from DZZ and GIS. *Management, navigation and communication systems*, 6 (46), 102-110. Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk. Poltava [in Ukrainian].

7. Trofymchuk, O., Yakovliev, Y., Klymenko, V., & Anpilova, Y. (2019). Geomodeling and monitoring of pollution of waters and soils by the earth remote sensing. In *International Multidisciplinary Scientific GeoConference – SGEM*, 19, 1.4 (2019).
8. Trysnyuk, V.M., Nagornyi, E.I., Trysnyuk, T.V., Konetska, O.O., & Kurylo, A.V. (2022). Methods of detecting radiation contamination of the area and its risks. *Control, navigation and communication systems. Collection of scientific works*, 3(69), 112-115. Poltava National Technical University named after Yury Kondratyuk. ISSN 2073-7394. Retrieved from <http://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/2618> [in Ukrainian].
9. Krasovska, I., Butenko, O., Horelik, S., & Zakharchuk Y. (2020). Complex space monitoring data analysis to determine environmental trends of Poland-Ukraine border areas. *Architecture civil engineering environment*, 13 (2), 39-56.

The article was received 29.01.2024 and was accepted after revision 08.03.2024

Нагорний Євген Ігорович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору
Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7050-9310> **e-mail:** rhbz777@ukr.net

УДК 502:556

Daniil Marshall, graduate student of the Department of Environmental Protection and Labor Protection Technologies

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2984-3979> **e-mail:** daniil.marshall@icloud.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF RIVER COURSE CLEANING SYSTEMS FROM MECHANICAL CLOCKS

Abstract. *In this research, attention is focused on the removal of mechanical blockages in river ecosystems in order to eliminate the consequences of intensive anthropogenic impact on water bodies. The article proposes an automated system for separating mechanical blockages, which is a conveyor-type mechanical barrier. The specified system can be the first in a series of the following launch complexes: separation of mechanical blockages; sorting, drying and preparation; emission-free combustion in the innovative Univastum complex, as well as an independent separation system. As a result of the study, the main factors of the influence of river system cleaning systems on the environment were determined, aspects of the variability of such models were described and what they are related to, advantages and disadvantages were described in different cases of cleaning systems of different types, which allowed during further research to focus on finding ways solving local problems, taking into account the available approaches depending on the nature of anthropogenic influence. The group of systems proposed as the basis of effective variability was combined into systems with an average degree of impact on natural systems that, due to the diversity of approaches to different types of conditions, will be able to provide successful results in eliminating the effects of the impact on the water body. Tools for reducing anthropogenic impact, similar to the described systems, belong to the group that must be implemented in the shortest possible time, and will significantly lose their effectiveness over time due to the critical complexity of factors affecting the river system and limited access to information about the components of this impact in the post-war period. The research results will allow further development of recommendations for effective engineering protection of water resources from pollution and depletion in a particular region.*

Key words: *anthropogenic impact; river systems; impact of hostilities; clogging; treatment systems; filtration; water resources.*

Д.І. Маршалл

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

ПІДХОДИ ДО РОЗРОБКИ СИСТЕМ ОЧИЩЕННЯ РІЧКОВОЇ ТЕЧІЇ ВІД МЕХАНІЧНИХ ЗАСМІЧЕНЬ

Анотація. *У даному дослідженні зосереджено увагу на видаленні механічних засмічень в річкових екосистемах з метою усунення наслідків інтенсивного антропогенного впливу на водні об'єкти. В статті запропонована автоматизована система відокремлення механічних засмічень, яка являє собою механічний бар'єр конвеєрного типу. Зазначена система може бути як першою в серії наступних пускових комплексів: виокремлення механічних засмічень; сортування, висушування та підготовки; безвिकидного спалювання у інноваційному комплексі Univastum, так і самостійною*

системою виокремлення. У результаті дослідження було визначено основні фактори впливу систем очистки річкових систем на довкілля, описано аспекти варіабельності подібних моделей і з чим вони пов'язані, описані переваги та недоліки у різних випадках систем очистки різних типів, що дозволило під час подальших досліджень фокусовано шукати шляхи вирішення локальної проблематики, приймаючи до уваги існуючі наявні підходи в залежності від характеру антропогенного впливу. Запропоновану як основу ефективної варіабельності групу систем було об'єднано у системи середнього ступеня впливу на природні системи, що за рахунок різноманітності підходів до різнотипових умов зможуть забезпечувати успішні результати усунення наслідків впливу на водний об'єкт. Подібні до описуваних систем інструменти зменшення антропогенного впливу відносяться до тієї групи, що мають бути реалізовані у найкоротші терміни, та суттєво втрачають свою ефективність з плином часу через критичну комплексність факторів впливу на річкову систему та обмеженість доступу до інформації про складові даного впливу у післявоєнний період. Результати досліджень дозволять в подальшому розробити рекомендації щодо ефективного інженерного захисту водних ресурсів від забруднення та виснаження в окремо взятому регіоні.

Ключові слова: антропогенний вплив; річкові системи; вплив бойових дій; засмічення; очисні системи; фільтрація; водні ресурси.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.1.161-168>

Вступ

Сьогоднішня проблема стану водних ресурсів та стану річкових систем зокрема знаходиться під повним та практично повсякмісним впливом бойових дій та потребує врахування даного впливу в комплексному підході до вирішення. Дана проблема є непостійною та важкопередбачуваною через різноманітність першоджерел даного впливу, серед яких основними можна виділити:

1. Нестандартний шкодочинний підхід до організації побутових відходів. Дане першоджерело впливу може мати локальний масштаб у вигляді безвідповідального та незаконного звалювання відходів, наприклад, будівельного майданчика (будівельні відходи) у річку або на прирічковій ділянці. Окрім цього, засмічення річкової системи може бути також і результатом масштабних звалювань відходів у безпосередній близькості до водного об'єкта.

2. Глобальні динамічні зміни довкілля, які можуть бути пов'язані як з бойовими діями, так і з катастрофами різного типу (природними або техногенними). Даний тип відрізняється ступенем впливу на водний об'єкт. Дані джерела впливу здатні спричинити прямий та опосередкований вплив інтенсивності, що вимагатиме проведення моніторингу об'єкта частіше за стандартний ритм через скороплинність багатьох властивих таким прикладам процесів, що потребують фіксації та аналізу.

Існуючі світові рішення та моделі, орієнтовані на вирішення локальних проблем, визначені в роботах [1–7 та інш.]. Ефективніше за все процеси виокремлення засмічень відбуваються на річкових спорудах, вдосконалених для даних цілей, але у порівнянні із запропонованими моделями відзначається умовна адаптивність, компактність та обережність по відношенню до природних систем, що вступають в контакт з даними спорудами. Технологічність існуючих підходів варіюється, але у питанні вирішення проблеми післявоєнного відновлення на десятках річок потребується новий підхід з врахуванням нових вимог.

Мета дослідження – розробка технічних рішень та підходів щодо систем очистки водних об'єктів внаслідок інтенсивного антропогенного впливу цивільного або воєнного походження.

Постановка проблеми

Антропогенний вплив на водні об'єкти мав переважно цивільне походження, окрім окремих регіонів за останні десять років. Питаннями антропогенного впливу на водні об'єкти в Україні у різний час займались науковці [8–10 та інш.], проте переважна більшість досліджень засновані на антропогенному впливі не воєнного походження, що створює необхідність на підґрунті існуючих результатів досліджень розробки нових підходів з максимальним врахуванням сучасної ситуації. Питання актуальності сучасної інформації стоятиме дуже гостро у післявоєнний період, що вимагає проведення досліджень безпосередньо під час наявності індикаторних показників, адже ретроспективне дослідження зразків ґрунту та води для якісного аналізу та оцінки вимагатиме розуміння хронології впливу та типів сполук, що брали у цьому впливі участь. Проблема полягатиме у специфіці у доступі до інформації щодо компонентів озброєння, його типів та об'ємів і локацій застосування. У зазначеному випадку саме оперативний моніторинг, аналіз та вплив дозволять вчасно вплинути на ситуацію.

Питання очищення річкових систем від засмічень внаслідок ведення бойових дій стає актуальним на певній території після деокупації, проведення розмінувальних заходів та проведення діагностичного моніторингу для оцінки стану водних ресурсів на досліджуваній території.

Серед досліджень у сфері впливу бойових дій на довкілля є немало комплексних робіт [11–13], однак спеціалізованих на вивченні впливу на річкові системи недостатньо, а даний тип досліджень надасть дані та складові для проведення досліджень у тематиці впливу бойових дій на стан довкілля.

Результати дослідження

Одним з фундаментальних та першочергових етапів, що суттєво зменшують кількість засмічень у річковій системі, є механічна очистка, або фільтрація. Даний тип впливу на річкову систему несе у собі численні ризики для перебігу природних процесів у системі. У зв'язку з даним ризиковим фактором, першим аспектом варіабельності потенційних систем для фільтрації засмічень у річковій течії можна визначити умовний ступінь впливу на природні екосистеми, який можна структурувати як: легкий (здіяння верхнього приповерхневого шару без створення споруд та фундаментів), середній (створення споруд для функціонування системи із задіянням верхнього шару річкової течії) та жорсткий (створення колекторної системи з повною фільтрацією примусового типу). В кожному із зазначених трьох ступенів можна навести приклади легкого ступеня впливу у вигляді примітивних систем із залученням неспеціалізованих інструментів та механізмів для локального точкового, частіше за все – разового, процесу очистки водного об'єкта. Системи, що підпадають під опис даної групи [14–16], мають зазвичай умовний, незначний та недовгостроковий вплив на водний об'єкт, однак їх ефективність є умовною та має своє застосування у вирішенні кризових

«кейсів», враховуючи наявність впливу на водні системи комплексів споруд. На противагу пропонується група жорсткого впливу, що включає в себе дамби, колекторні системи та шлюзи і має значний безпосередній вплив на перебіг більшості природних процесів обміну у водному середовищі на певній ділянці. У більшості випадків системи даної групи не є фільтраційними за первинним призначенням, але за принципом дії придатні до відповідних вдосконалень. Створення нових систем даного типу матиме місце у локальних масштабах на середніх та малих річках, які вже зазнали катастрофічного антропогенного впливу і стан природних систем у яких не буде суттєво змінено даним типом конструкцій. В успішно функціонуючих системах даного типу мають бути також враховані питання забруднення води у річковій системі, що неодмінно буде присутньою проблемою за зазначених умов. Як вже було описано – такі системи функціонують за принципом примусової фільтрації, де існуючі вимоги потребують обробки усього річкового потоку як на предмет очистки від механічних засмічень, так і на предмет фізико-хімічної очистки від забруднень.

Граничні умови розвитку технічних систем за їх впливом на водну екосистему визначають необхідність пошуку таких характеристик, які балансуватимуть між інтенсивністю впливу на довкілля та ефективністю виконання своїх основних функцій. У даному випадку орієнтація йде на системи, що можуть включати споруди (в основному для зведення кріплень та основних осей функціонування механізмів та розташування конструкцій), але матимуть обмежений вплив на водний об'єкт у такому обсязі, що дозволить його природне відновлення до показників, визначених як «задовільні» після завершення проекту його очистки.

Ступінь впливу систем на природні комплекси повинен гарантувати адаптивність до конкретних локальних вимог. Дана складова різноманітності, або варіабельності технічних систем, що стають об'єктом фільтрації, на практиці визначається двома типами систем: умовно м'якої дії та інтенсивної фільтрації.

Умовно м'якою дією визначено комплекс заходів із застосуванням приладів та механізмів, не спеціалізованих на даному виді діяльності, найчастіше в рамках певного заходу, пов'язаного з наслідками певних подій. Як було зазначено, основною ознакою підходів м'якої та середньої дії можна визначити фокусований вплив на окрему складову системи, що у питанні засмічень є поверхневим шаром води. В залежності від параметрів водного об'єкта, підходи до фільтраційних систем мають змінювати свої механізми та принципи дії через відсутність єдиного підходу для параметрів усіх типів річкових систем. Саме зміна параметрів у системах середнього впливу і має забезпечувати їх ефективність за рахунок уваги до компонентів проблематики кожного «кейсу» окремо.

Важливо відзначити, що у більшості із зазначених підходів мова буде йти саме про очистку від засмічень по течії водотоку на конкретних ділянках, які визначаються відстанню від локації розміщення очисної системи до точки, в якій ефект проведеної фільтрації буде нівельовано. У такому випадку можна зазначити, що за умови наявності у річковій системі тільки одного джерела засмічення, фільтраційна система (одна або послідовний комплекс), розміщена у відповідній локації, зможе суттєво знизити вплив даного джерела на загальний стан водного об'єкта.

На фоні першого умовного ступеня впливу досліджуваних систем на природні екосистеми, визначається другий – характер антропогенного впливу,

що мав місце. Даний аспект є вразливою ланкою досліджень даної проблематики, через те що саме тут має місце обмеження доступу до даних про складові впливу, оскільки на сьогодні моніторинг впливу бойових дій на стан водних об'єктів для природних умов України є вкрай обмеженим і серед існуючої інформації про сполуки та озброєння, залучені на певній території, буває недостатньо даних для проведення комплексних досліджень. У свою чергу, задля подальшого планування заходів із запобігання наслідкам, потребуватиметься доступ до інформації про усі компоненти впливу, залучені у ньому.

Як приклад системи середнього ступеня впливу можна навести схему облаштування комплексу споруд подібних технічних систем (рис. 1).

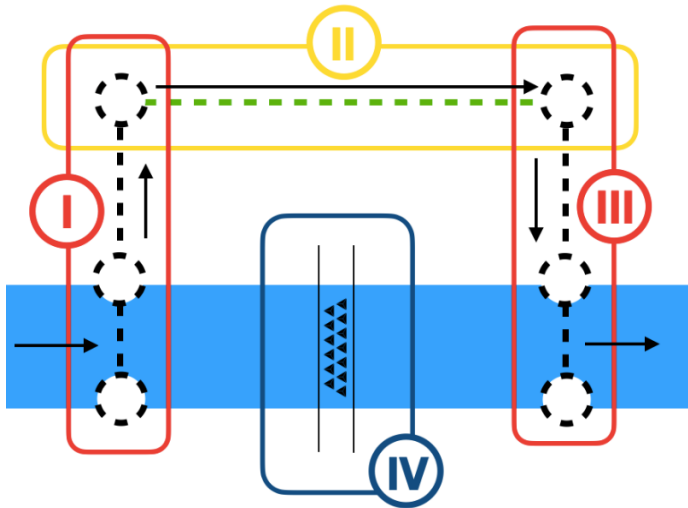


Рис. 1. Конфігурація етапів системи очистки річкової течії середнього ступеня впливу на природні системи, де: I – варіабельна складова (система виокремлення механічних засмічень); II – стадія сортування та очистки; III – опціональна стадія внесення виокремлених елементів природного походження; IV – опціональні комплекси систем очистки води у течії від забруднень

Системи такого вигляду можуть бути застосовані на середніх та малих річках за рахунок мінімального об'єму робіт зі зведення та можливості облаштування систем, які зможуть повністю впливати на поверхневий рівень течії та ефективно функціонувати за відповідних до локальних факторів впливу умов.

У даному дослідженні приділяється велика увага такому параметру системи, як варіабельність через різноманітність факторів впливу під час інтенсивного антропогенного впливу, особливо – пов'язаного з веденням бойових дій. Як приклад варіабельності на рис. 2 наведено схеми розміщення споруд та застосування різних методів виокремлення механічних засмічень з водного об'єкта.

Наведені системи відмінні як за потенційними для застосування системами сіток/решіток/бар'єрів, так і за розташуванням споруд відносно річкового русла у залежності від параметрів водного об'єкта. Окрім цього, схема С на рис. 2 описує циклічний принцип конвеєрного виокремлення засмічень, при якому конвеєрна сітка не тільки виокремлює засмічення, але і у подальшому слугує етапом внесення механічних елементів природного походження назад у водний об'єкт. Дані системи, що представлені на рис. 2, є прикладами для

подальшого вдосконалення у відповідності до локальних умов та вихідних факторів впливу, що обумовлюватимуть як загальний вигляд підходу, так і потенційні необхідні, можливо унікальні, вдосконалення систем як відповідь на непередбачувані виклики.

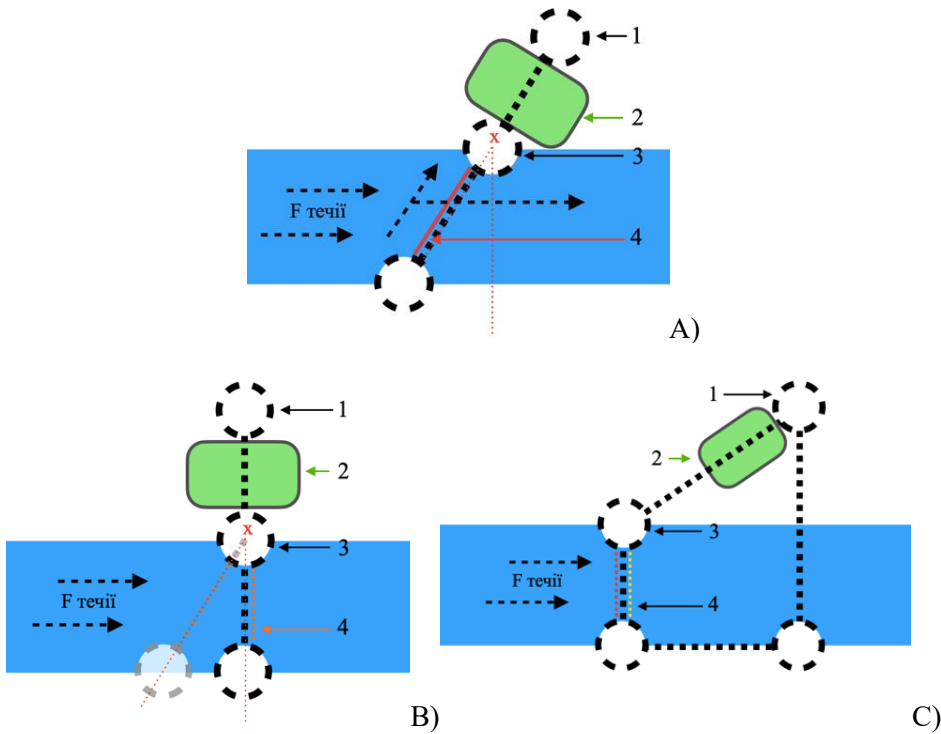


Рис. 2. Схеми (А, В, С) прикладів функціонування систем виокремлення механічних засмічень з річкової течії: 1 – опора, 2 – зона подальшого сортування, 3 – функціональна опора, 4 – варіаційний механізм виокремлення засмічень

Висновки

Проведене дослідження мало на меті систематизувати та структурувати підходи та принципи розвитку систем очистки водних об'єктів, що зазнали інтенсивного антропогенного впливу цивільного або воєнного походження. У результаті дослідження було визначено основні фактори впливу систем очистки річкових систем на довкілля та відповідно описано аспекти варіабельності подібних моделей і з чим вони пов'язані. Було визначено такі аспекти варіабельності, як ступінь впливу на річкові системи, що є певною характеристикою, яка визначає доцільність застосування даної схеми у тому чи іншому випадку. У дослідженні були описані переваги та недоліки систем очистки різних типів, що дозволить під час подальших досліджень фокусовано шукати шляхи вирішення локальної проблеми з врахуванням наявних підходів на базі оцінки характеру антропогенного впливу. Як було зазначено вище, подібні до описуваних систем інструменти зменшення антропогенного впливу відносяться до тієї групи, що мають бути реалізовані у найкоротші терміни, та суттєво втрачатимуть свою ефективність з плином часу через критичну комплексність факторів впливу на річкову систему та обмеженість доступу до інформації про складові даного впливу у післявоєнний період.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kaurwar, Amrita, et al. Effect of Local Industrial Waste Additives on the Arsenic (V) Removal and Strength of Clay Ceramics for Use in Water Filtration. *Re-Use and Recycling of Materials*. River Publishers, 2022. 141-152.
2. Sarkodee, Augustus Poku. Mechanical Optimization of Ceramic-based Composites for Water Filtration. Diss. Ashesi University, 2022.
3. Cabrera, Sandra Motta, et al. Industrial application of ceramic nanofiltration membranes for water treatment in oil sands mines. *Separation and Purification Technology* 256 (2021): 117821.
4. Jarvis, Peter, et al. Ceramic vs polymeric membrane implementation for potable water treatment. *Water Research* 215 (2022): 118269.
5. Loi-Brügger, A., et al. Ceramic membranes for direct river water treatment applying coagulation and microfiltration. *Water Science and Technology: Water Supply* 6.4 (2006): 89-98.
6. Lerch, André, et al. Direct river water treatment using coagulation/ceramic membrane microfiltration. *Desalination* 179.1-3 (2005): 41-50.
7. Yao, Wenmin, et al. Multiscale study of physical and mechanical properties of sandstone in three Gorges reservoir region subjected to cyclic wetting-drying of Yangtze river water. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 53.5 (2020): 2215-2231.
8. Коржов Є. І. Антропогенний вплив на екосистему пониззя Дніпра та можливі шляхи його послаблення // Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. – 2015. – №. 267. – С. 102-108.
9. Гончаров О. Ю. Антропогенний вплив станції біологічної очистки «Північна» на Одеську затоку і Хаджибейський лиман в сучасний період // Матеріали Всеукраїнської конференції «Євроінтеграція екологічної політики України». – 2019. – С. 98.
10. Дунаєва Є. А. Екологічне оцінювання впливу антропогенного навантаження на водні об'єкти // Меліорація і водне господарство. – 2013. – № 100 (2). – С. 194-202.
11. Рибалова О. В., Павленко В. С., Алексеєва А. М. Вплив бойових дій на стан поверхневих вод : дис. – Prague, Czech Republic, 2024.
12. Вплив війни на природоохоронні території України. (November, 6, 2023). URL: <https://wwf.ua/?12163316/The-impact-of-war-on-protected-areas-in-Ukraine>
13. Кравченко О. Дослідження впливу військових дій на довкілля на Сході України // Схід. – 2015. – №. 2. – С. 118-123.
14. Scircle A. et al. Single-pot method for the collection and preparation of natural water for microplastic analyses: Microplastics in the Mississippi River system during and after historic flooding // *Environmental toxicology and chemistry*. – 2020. – Т. 39. – №. 5. – С. 986-995.
15. Cleaning Thailand's River of Kings. Royal Thai Embassy, Washington D.C. 2023. URL: <https://washingtondc.thaiembassy.org/en/content/cleaning-thailand-s-river-of-kings>
16. Singapore's river-cleaning robots are producing 80% less carbon emissions than the human-powered boats they replaced. 2023. URL: <https://www.businessinsider.com/singapore-river-cleaning-robots-5g-2023-11>
17. WCU celebrates 40 years cleaning up the Tuckasegee River. 2024. URL: <https://smokymountainnews.com/outdoors/item/37628-wcu-celebrates-40-years-cleaning-up-the-tuckasegee-river>

Стаття надійшла до редакції 21.12.2023 і прийнята до друку після рецензування 01.03.2024

REFERENCES

1. Kaurwar, Amrita, et al. (2022). Effect of Local Industrial Waste Additives on the Arsenic (V) Removal and Strength of Clay Ceramics for Use in Water Filtration. In *Re-Use and Recycling of Materials* (pp. 141-152). River Publishers.

2. Sarkodee, Augustus Poku. (2022). Mechanical Optimization of Ceramic-based Composites for Water Filtration. Diss. Ashesi University.
3. Cabrera, Sandra Motta, et al. (2021). Industrial application of ceramic nanofiltration membranes for water treatment in oil sands mines. *Separation and Purification Technology* 256 (2021): 117821.
4. Jarvis, Peter, et al. (2022). Ceramic vs polymeric membrane implementation for potable water treatment. *Water Research* 215 (2022): 118269.
5. Loi-Brügger, A., et al. (2006). Ceramic membranes for direct river water treatment applying coagulation and microfiltration. *Water Science and Technology: Water Supply* 6.4 (2006): 89-98.
6. Lerch, André, et al. (2005). Direct river water treatment using coagulation/ceramic membrane microfiltration. *Desalination* 179.1-3 (2005): 41-50.
7. Yao, Wenmin, et al. (2020). Multiscale study of physical and mechanical properties of sandstone in three Gorges reservoir region subjected to cyclic wetting-drying of Yangtze river water. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 53.5 (2020): 2215-2231.
8. Korzhov, E. I. (2015). Anthropogenic influence on the ecosystem of the lower Dnieper and possible ways to mitigate it. *Scientific works of the Ukrainian Research Hydrometeorological Institute*, 267, 102-108 [in Ukrainian].
9. Goncharov, O. Yu. (2019). Anthropogenic impact of the "Northern" biological treatment station on the Odesa Bay and Khadzhibey estuary in the modern period. In *Proceedings of Ukrainian conference "European integration of environmental policy of Ukraine"* (p. 98). [in Ukrainian].
10. Dunaeva, E. A. (2013). Ecological assessment of the impact of anthropogenic load on water bodies. *Reclamation and water management*, 100 (2), 194-202 [in Ukrainian].
11. Rybalova, O. V., Pavlenko, V. S., & Alekseeva, A. M. (2024). Impact of hostilities on the state of surface waters: diss. Prague, Czech Republic [in Ukrainian].
12. The impact of the war on nature conservation areas of Ukraine. (November, 6, 2023). Retrieved from <https://wwf.ua/?12163316/The-impact-of-war-on-protected-areas-in-Ukraine> [in Ukrainian].
13. Kravchenko, O. (2015). Study of the impact of military operations on the environment in Eastern Ukraine. *East*, 2, 118-123 [in Ukrainian].
14. Scircle, A. et al. (2020). Single-pot method for the collection and preparation of natural water for microplastic analyses: Microplastics in the Mississippi River system during and after historic flooding. *Environmental toxicology and chemistry*, 39 (5), 986-995.
15. Cleaning Thailand's River of Kings. Royal Thai Embassy, Washington D.C. (2023). Retrieved from <https://washingtondc.thaiembassy.org/en/content/cleaning-thailand-s-river-of-kings>
16. Singapore's river-cleaning robots are producing 80% less carbon emissions than the human-powered boats they replaced. (2023). Retrieved from <https://www.businessinsider.com/singapore-river-cleaning-robots-5g-2023-11>
17. WCU celebrates 40 years cleaning up the Tuckasegee River. (2024). Retrieved from <https://smokymountainnews.com/outdoors/item/37628-wcu-celebrates-40-years-cleaning-up-the-tuckasegee-river>

The article was received 21.12.2023 and was accepted after revision 01.03.2024

Маршалл Данііл Ігорович

аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва та архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2984-3979> **e-mail:** daniil.marshall@icloud.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

**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 29.03.24 Формат 70x108/16. Папір офсетний.
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 14.8
Обл.-вид. арк. 11.25
Замовлення № _____

Тираж 300 примірників

КИЇВ 2024